

MARIA LUIZA AMARAL DE SOUZA

**CORREÇÃO RADIOMÉTRICA DE IMAGENS OBTIDAS ATRAVÉS DE
SENSOR TERMAL DE BAIXO CUSTO A BORDO DE UM RPA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientadora: Nilcilene das Graças Medeiros

**VIÇOSA – MINAS GERAIS
2023**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

S729c
2023 Souza, Maria Luiza Amaral de, 1990-
Correção radiométrica de imagens obtidas através de sensor
termal de baixo custo a bordo de um RPA / Maria Luiza Amaral
de Souza. – Viçosa, MG, 2023.

1 dissertação eletrônica (84 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Nilcilene das Graças Medeiros.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Civil, 2023.

Referências bibliográficas: f. 81-84.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2023.621>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Fotografia infravermelha. 2. Detectores infravermelhos.
3. Drone. 4. Análise por ativação nuclear. I. Medeiros, Nilcilene
das Graças, 1977-. II. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Civil. III. Título.

CDD 22. ed. 621.3672


MARIA LUIZA AMARAL DE SOUZA

**CORREÇÃO RADIOMÉTRICA DE IMAGENS OBTIDAS ATRAVÉS DE
SENSOR TERMAL DE BAIXO CUSTO A BORDO DE UM RPA**


Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil, título *Magister Scientiae*.

APROVADA: 14 de julho de 2023

Assentimento:

Documento assinado digitalmente
 MARIA LUIZA AMARAL DE SOUZA
Data: 25/10/2023 20:51:25-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Maria Luiza Amaral de Souza
Autora

Documento assinado digitalmente
 NILCILENE DAS GRACAS MEDEIROS
Data: 25/10/2023 11:08:25-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Nilcilene das Graças Medeiros
Orientadora

AGRADECIMENTOS

Dedico este espaço para agradecer aos que me ajudaram na realização deste trabalho e sem os quais não teria chegado até aqui, especialmente:

À Deus, que sempre me guia, nos momentos de alegria e dificuldade, que não me desampara nunca.

À minha doce e eterna filha Catarina, que mesmo não estando em meus braços, sinto sua presença diária e levo para minha vida toda sua força como inspiração!

Aos meus filhos João e recém-chegada Júlia, que me mostraram um caminho de muitas alegrias e me deram a oportunidade de seguir a vida, minhas inspirações diárias.

Ao meu esposo Rafael, por ser meu melhor amigo, meu equilíbrio nos momentos difíceis, meu porto seguro.

Aos meus pais: Silvana e João, e irmãs: Nathali e Izabela, por todo amor incondicional, a minha base começa aqui.

À minha orientadora Nilcilene, por toda paciência e prontidão ao longo desses 3 anos de parceria.

Aos meus amigos da Geocar, por toda compreensão no momentos de minha ausência e auxílio quando precisei.

Ao Departamento de Engenharia Civil, por toda estrutura; Departamento de Engenharia Agrícola, por disponibilizar equipamentos para os experimentos; Todos os amigos que fiz e reencontrei nesta jornada.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Gratidão Eterna...

RESUMO

SOUZA, Maria Luiza Amaral de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2023. **Correção Radiométrica de imagens obtidas através de sensor termal de baixo custo a bordo de um RPA.** Orientador: Nilcilene das Graças Medeiros.

O uso de sensores de baixo custo na região do Infravermelho Termal (TIR's) a bordo de uma aeronave pilotada remotamente (RPA) possibilita grandes avanços nos processos de coleta de dados de temperatura, que contribuem para a viabilização de estudos em diversas áreas. Entretanto, apesar da maioria das operações de imagens termais serem de natureza qualitativa, algumas operações requerem a análise de dados quantitativos para determinar temperaturas absolutas. Sensores de baixo custo, geralmente, não são corrigidos radiometricamente, desta forma, o objetivo principal deste estudo foi realizar o processo de Correção Radiométrica visando a calibração dos sensores, definição do melhor horário de coleta devido a interferência solar e a estimativa e correção de efeitos atmosféricos. Na etapa de calibração dos sensores foram realizados experimentos, nas mesmas condições, e determinada a relação das temperaturas aparentes e cinéticas e entre os sensores; a Interferência Solar foi avaliada de acordo com coletas realizadas em diferentes horários; e foram comparadas as coletas dos sensores em diferentes alturas para avaliar os efeitos atmosféricos e a eficiência de duas metodologias de correção destes efeitos: Modelo Teórico *Modtran* e o Modelo Empírico Correlação Ar-Solo. Foram encontradas discrepâncias significativas nos estudos realizados, demonstrando a relevância de realizar a caracterização dos sensores previamente, adotar períodos do dia com maior equilíbrio térmico e estabilidade da atmosfera, além de adotar metodologias eficazes para correção de efeitos atmosféricos. Desta forma, verificou-se neste estudo que a combinação RPA e câmera termal de baixo custo apresentaram resultados satisfatórios após as correções, podendo contribuir positivamente com pesquisas que necessitam de coletas de temperaturas de superfícies e não dispõe de recursos para tecnologias mais robustas, desde que consideradas as incertezas fornecidas pelos fabricantes dos sensores.

Palavras Chaves: Imagens Termais. Sensores de Baixo Custo. RPA. Correção Radiométrica.

ABSTRACT

SOUZA, Maria Luiza Amaral de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2023. **Radiometric Correction of images obtained using a low-cost thermal sensor on board RPA.** Adviser: Nilcilene das Graças Medeiros.

The use of low-cost sensors in the region of Thermal Infrared (TIR) aboard a remotely piloted aircraft (RPA) enables significant advancements in temperature data collection processes, contributing to the feasibility of studies in various areas. However, despite the majority of thermal imaging operations being qualitative in nature, some operations require the analysis of quantitative data to determine absolute temperatures. Low-cost sensors are generally not radiometrically corrected. Therefore, the main objective of this study was to perform Radiometric Correction processes to calibrate the sensors, determine the optimal data collection time due to solar interference, and estimate and correct atmospheric effects. During the sensor calibration stage, experiments were conducted under the same conditions to determine the relationship between apparent and kinetic temperatures and among the sensors. Solar interference was assessed based on collections carried out at different times, and the sensor collections at different altitudes were compared to evaluate atmospheric effects and the efficiency of two methodologies for correcting these effects: the Theoretical Modtran Model and the Empirical Air-Ground Correlation Model. Significant discrepancies were found in the conducted studies, demonstrating the relevance of prior sensor characterization, selecting periods of the day with greater thermal balance and atmospheric stability, and adopting effective methodologies for correcting atmospheric effects. Thus, this study confirmed that the combination of RPA and low-cost thermal cameras yielded satisfactory results after the corrections, potentially contributing positively to research that requires surface temperature collection but lacks resources for more robust technologies, provided that the uncertainties provided by the sensor manufacturers are taken into account.

Keywords: Thermal Imagery. Low Cost Sensors. RPA. Radiometric Correction.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1: Esquema representativo dos quatro elementos fundamentais das técnicas de SR... | 15 |
| Figura 2: Faixa Espectro Eletromagnético | 15 |
| Figura 3: (a) Irradiância: Fluxo incidente na superfície; (b) Exitância: Fluxo emitido pela superfície. | 16 |
| Figura 4: Distribuição Espectral de energia irradiada de vários corpos negros. | 18 |
| Figura 5: (a) Emissividade espectral de um corpo negro, um corpo cinza, e um radiador seletivo hipotético e (b) Distribuição espectral da exitância radiante de um corpo negro, um corpo cinza e um radiador seletivo hipotético..... | 20 |
| Figura 6 : Variação da Temperatura ao longo do dia para elementos com diferentes inércias termiais. | 24 |
| Figura 7: Absorção atmosférica na faixa de comprimento de onda entre 0 a 15 μ m..... | 25 |
| Figura 8: Perfis dos gases atmosféricos; (a) Variação da umidade relativa em função da altitude e (b) Variação do CO ₂ em função à altitude. | 27 |
| Figura 9: Esquema da Radiação captada pelo sensor..... | 28 |
| Figura 10: Curva de calibração de amostra usada para correlacionar a saída do scanner com a temperatura radiante medida pelo radiômetro. | 30 |
| Figura 11: Definição do intervalo FWHM. | 31 |
| Figura 12: Diferentes tipos de diagramas de dispersão de pontos. | 36 |
| Figura 13: Linha de Tendência e as discrepâncias dos dados | 38 |
| Figura 14: Mapa de Localização das áreas de estudo. | 39 |
| Figura 15: Fluxograma com etapas metodológicas..... | 42 |
| Figura 16: (a) e (b) Detalhamento da superfície do Alvo de Referência..... | 42 |
| Figura 17: (a) Momento do registro dos dados; e (b) Esquema representativo do experimento de laboratório..... | 43 |
| Figura 18: (a) Foto tirada no momento da tomada de foto em campo; (b) Esquema representativo do experimento de campo; | 44 |
| Figura 19: Delimitação dos alvos: (a) Vegetação rasteira; (b) Solo exposto; (c) Concreto e (d) Material Betuminoso; | 44 |
| Figura 20: Temporizador adaptado ao sensor e RPA (a) Vista lateral e (b) Vista inferior. | 45 |
| Figura 21: (a) Foto tirada no momento da tomada de foto em campo e (b) Esquema representativo do experimento de campo. | 45 |
| Figura 22: Esquema representativo do experimento de campo..... | 47 |
| Figura 23: (A) Concreto e Material Betuminoso; (b) Solo Exposto e (c) Vegetação Rasteira. | |

| | |
|--|----|
| | 48 |
| Figura 24: Esquema representativo do experimento de campo..... | 51 |
| Figura 25: Gráfico de Discrepâncias – (a) Sensor 1 e (b) Sensor 2. | 51 |
| Figura 26: Gráfico de Discrepâncias – (a) Sensor 1 e (b) Sensor 2. | 53 |
| Figura 27: Gráfico de Dispersão. | 53 |
| Figura 28: Imagens termais dos alvos com o efeito <i>FlirMSX</i> : (a) Vegetação rasteira; (b) Solo exposto; (c) Concreto e (d) Material Betuminoso | 54 |
| Figura 29: Imagens termais (a) 6:00h; (b) 14: 00h; (c) 22:00h e (d) Imagem RGB321. | 55 |
| Figura 30: Gráfico com a variação de temperatura entre os alvos e horários. | 55 |
| Figura 31: Variações de temperatura de elementos que deveriam ter o mesmo comportamento | 57 |
| Figura 32: Gráfico com a variação de temperatura de cada alvo para diferentes horários. (a) Vegetação rasteira; (b) Solo exposto; (c) Concreto e (d) Material Betuminoso | 58 |
| Figura 33: Gráfico de Discrepâncias (a) 6:00h; (b) 14:00h e (c) 22:00h | 60 |
| Figura 34: a) gráfico com os fluxos gerados pelo <i>Modtran</i> ; b) Esquema representativo dos componentes atmosféricos considerados neste estudo | 61 |
| Figura 35: FRE Sensor | 62 |
| Figura 36: Discrepâncias entre as temperaturas dos sensores 1 e 2, a) antes da correção e b) após a correção. | 63 |
| Figura 37: Diagramas de dispersão com as linhas de tendência, a) Vegetação Rasteira, b) Solo Exposto, c) Concreto, d) Material Betuminoso | 64 |
| Figura 38: Discrepâncias entre as temperaturas dos sensores 1 e 2, A) antes da correção e b) após a correção. | 66 |
| Figura 39: a) Imagem com temperaturas aparentes, sob efeito atmosférico; b) Imagem com valores de discrepâncias entre as temperaturas aparentes corrigidas nas duas metodologias; c) Imagem com temperaturas aparentes corrigida pelo modelo teórico <i>Modtran</i> e d) Imagem com temperaturas aparentes corrigidas pelo modelo empírico Correlação Ar-Solo, todas para a categoria Vegetação Rasteira..... | 68 |
| Figura 40: a) Imagem com temperaturas aparentes, sob efeito atmosférico; b) Imagem com valores de discrepâncias entre as temperaturas aparentes corrigidas nas duas metodologias; c) Imagem com temperaturas aparentes corrigida pelo modelo teórico <i>Modtran</i> e d) Imagem com temperaturas aparentes corrigidas pelo modelo empírico Correlação Ar-Solo, todas para a categoria Solo Exposto. | 69 |
| Figura 41: Pontos de Controle e Validação lançados sobre as imagens da categoria Solo | |

| | |
|---|----|
| Exposto. a) Imagem composição RGB321 e b) Imagem composição TIR..... | 70 |
| Figura 42: a) Imagem com temperaturas aparentes, sob efeito atmosférico; b) Imagem com valores de discrepâncias entre as temperaturas aparentes corrigidas nas duas metodologias; c) Imagem com temperaturas aparentes corrigida pelo modelo teórico <i>Modtran</i> e d) Imagem com temperaturas aparentes corrigidas pelo modelo empírico Correlação Ar-Solo, todas para a categoria Concreto..... | 71 |
| Figura 43: a) Imagem com temperaturas aparentes, sob efeito atmosférico; b) Imagem com valores de discrepâncias entre as temperaturas aparentes corrigidas nas duas metodologias; c) Imagem com temperaturas aparentes corrigida pelo modelo teórico <i>Modtran</i> e d) Imagem com temperaturas aparentes corrigidas pelo modelo empírico Correlação Ar-Solo, todas para a categoria Material Betuminoso..... | 72 |
| Figura 44: Variação das temperaturas aparentes dos pontos para variação da altura do Sensor 2, a) Vegetação Rasteira e b) Solo Exposto..... | 75 |
| Figura 45: Variação das temperaturas aparentes dos pontos para variação da altura do Sensor 2, a) Concreto e b) Material Betuminoso. | 75 |
| Figura 46: Variação das temperaturas aparentes médias para variação da altura do Sensor 2, a) Vegetação Rasteira, b) Solo Exposto, c) Concreto e d) Material Betuminoso..... | 76 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1: Emissividade, temperatura cinética e temperatura aparente de objetos selecionados a 300K e 27 °C. | 23 |
| Tabela 2: Especificações Técnicas do Termômetro Infravermelho Termal..... | 40 |
| Tabela 3: Especificações Técnicas da Câmera Termal | 40 |
| Tabela 4: Especificações Técnicas do Termohigrômetro..... | 41 |
| Tabela 5: Especificações Técnicas do Termopar Tipo K..... | 41 |
| Tabela 6: Distribuição de pontos amostrais por categoria..... | 47 |
| Tabela 7: Informações inseridas no <i>software Modtran</i> | 48 |
| Tabela 8: Temperaturas cinéticas, aparentes e corrigidas (°C) | 52 |
| Tabela 9: Temperaturas coletadas em campo (°C)..... | 54 |
| Tabela 10: Variâncias dos valores de temperatura do Sensor 2, metodologia de correção do modelo teórico Modtran e modelo empírico Correlação Ar-Solo para cada categoria. | 74 |

SUMÁRIO

| | | |
|--------|---|----|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 12 |
| 2 | OBJETIVOS..... | 13 |
| 2.1 | OBJETIVO GERAL..... | 13 |
| 2.2 | OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 14 |
| 3 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 14 |
| 3.1 | SENSORIAMENTO REMOTO NO INFRAVERMELHO TERMAL | 14 |
| 3.2 | RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA TIR | 16 |
| 3.2.1 | Leis de Radiação Termal | 17 |
| 3.2.2 | Lei da Radiação de Planck | 17 |
| 3.2.3 | Lei de Stefan-Boltzmann..... | 17 |
| 3.2.4 | Lei de Deslocamento de Wien..... | 18 |
| 3.2.5 | Emissividade | 19 |
| 3.2.6 | Interação da radiação termal com elementos do terreno e a Lei da Radiação de Kirchhoff..... | 20 |
| 3.3 | PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS ELEMENTOS DE TERRENO | 23 |
| 3.4 | CALIBRAÇÃO INTERNA DE SENSORES TERMAIS..... | 24 |
| 3.5 | EFEITOS DA ATMOSFERA | 25 |
| 3.6 | CORREÇÃO DOS EFEITOS ATMOSFÉRICOS..... | 27 |
| 3.7 | SUPERFÍCIE LAMBERTIANA | 30 |
| 3.8 | FUNÇÃO RESPOSTA ESPECTRAL (FRE) DO SENSOR | 30 |
| 3.9 | SENSIBILIDADE ESPECTRAL DO SENSOR | 31 |
| 3.10 | GROUND SAMPLE DISTANCE (GSD) NO SENSORIAMENTO REMOTO | 31 |
| 3.11 | REMOTELY PILOTED AIRCRAFT (RPA) | 32 |
| 3.12 | ESTATÍSTICA DESCRITIVA | 33 |
| 3.12.1 | Variância e Desvio Padrão | 34 |
| 3.13 | INFERÊNCIA ESTATÍSTICA | 34 |
| 3.13.1 | Correlação..... | 35 |
| 3.13.2 | Regressão Linear Simples | 37 |
| 3.13.3 | Teste Estatístico de Mann-Whitney | 38 |
| 4 | MATERIAIS E MÉTODOS | 38 |
| 4.1 | ÁREA DE ESTUDO | 38 |
| 4.2 | MATERIAIS | 39 |
| 4.3 | METODOLOGIA | 41 |

| | | |
|-------|---|----|
| 4.3.1 | Calibração dos Sensores | 42 |
| 4.3.2 | Interferência Solar | 44 |
| 4.3.3 | Correção de Efeitos Atmosféricos..... | 46 |
| 5 | RESULTADOS E ANÁLISES | 51 |
| 5.1 | CALIBRAÇÃO DOS SENSORES | 51 |
| 5.2 | INTERFERÊNCIA SOLAR..... | 54 |
| 5.3 | CORREÇÃO DE EFEITOS ATMOSFÉRICOS | 61 |
| 5.3.1 | Modelo Teórico Modtran | 61 |
| 5.3.2 | Modelo Empírico Correlação Ar – Solo..... | 64 |
| 5.3.3 | Relação Efeito Atmosférico x Altura do Sensor | 74 |
| 5.4 | ANÁLISE DOS RESULTADOS | 77 |
| 6 | CONCLUSÕES | 79 |

1 INTRODUÇÃO

Em seu surgimento, o Sensoriamento Remoto orbital teve entre seus principais objetivos a obtenção de informações da superfície terrestre de áreas mais extensas em relação aos levantamentos aéreos convencionais. Com o avanço tecnológico, ainda que não tenha alcançado a mesma qualidade espacial das fotografias aéreas devido à grande altitude, tempo de revisita e outros fatores envolvidos, melhorou muito as características espectrais e se desenvolveu através de estudos e análises, a respeito de tais informações.

Dados obtidos na região do espectro do infravermelho termal (TIR) têm sido utilizados como fonte de pesquisa e aplicação de estudos da temperatura da superfície terrestre, do termo em inglês *Land Surface Temperature (LST)*, podendo ser usado para pesquisas de incêndios florestais (AL-KAFF et al., 2020; VALERO et al., 2020; HENDEL & ROSS, 2020), agricultura de precisão (HEINEMANN et al., 2020; CHANG et al., 2020; MESSINA & MODICA, 2020) evapotranspiração (RAHMAN & ZHANG, 2019; GUILLEVIC et al., 2019, CHEN & LIU, 2020;), ilhas de calor urbana (LEE et al., 2018; SPEAK et al., 2020; MUTANI & TODESCHI, 2020), entre outros.

Segundo Gao et al. (2012), para muitas dessas aplicações os dados TIR são necessários em alta resolução e, assim uma resolução espacial mais precisa é desejada para áreas heterogêneas, particularmente regiões agrícolas contendo campos pequenos. Dessa maneira, a busca por dados TIR mais precisos começou a ser cada vez mais necessária, contudo, de acordo com Jensen (2009), o imageamento TIR aéreo convencional não tem sido largamente utilizado devido ao custo envolvido com sensor termal, mobilização de uma aeronave para aquisição dos dados e dificuldade de calibrar dados TIR e interpretar a imagem.

Com o rápido desenvolvimento tecnológico, larga comercialização e baixo custo, aeronaves remotamente pilotadas (*Remotely Piloted Aircraft - RPA*) vem mudando o cenário atual, oferecendo acessibilidade a levantamentos de dados com maior resolução espacial e temporal.

Pesquisas realizadas sobre a qualidade dos dados coletados com os RPAs vem se mostrando satisfatórias (MATESE et al., 2015; VILBIG et al., 2020), viabilizando cada vez mais a concepção de troca ou complemento das técnicas de aerolevantamentos tradicionais.

Em processo concomitante à adesão do uso dos RPAs, o uso de câmeras TIR não refrigeradas está crescendo, além da disponibilidade de sensores termais de pequeno porte e

baixo peso, eles se adequam facilmente às plataformas RPAs comerciais. Entretanto, o uso deste tipo de câmera tem desafios inerentes que devem ser superados antes que sejam usados para fins de monitoramento (ARAGON et al., 2020).

O uso dessas plataformas com sensores TIR's possibilita grandes avanços nos processos de coleta de dados que contribuem para a viabilização de estudos em diversas áreas do conhecimento, mas sobretudo, é importante avaliar os dados e corrigir erros que incidem sobre eles.

A maioria dos produtos oriundos de imagens termais, como mapeamento geológico e de solos, são de natureza qualitativa. Nesses casos, geralmente não é necessário conhecer temperaturas absolutas do solo e emissividades, mas simplesmente para estudar as diferenças relativas das temperaturas radiantes dentro de uma cena. No entanto, algumas operações com imagens termais requerem análise de dados quantitativos para determinar temperaturas absolutas (LILLESAND et al., 2015).

A Correção Radiométrica é o procedimento que tem por finalidade a eliminação ou minimização dos efeitos que interferem nos valores de brilho das imagens. Segundo Kelly et al. (2019), a não calibração interna do equipamento, efeitos atmosféricos e horários de coleta podem interferir e diminuir a acurácia dos dados coletados.

Alguns autores vêm publicando estudos referentes a correção radiométrica de tais equipamentos (OLIVEIRA, 2017; ARAGON et al., 2020; KELLY et al., 2019), entretanto, não foram encontrados estudos relativos às câmeras de baixo custo, devido suas limitações, mas, acredita-se que com alguns procedimentos de aferição dos dados, bons resultados podem ser encontrados, favorecendo a qualidade de diversos estudos que não adotam o uso de sensores termais a bordo de RPAs por falta de recursos.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Esta pesquisa tem como objetivo principal realizar o processo de correção radiométrica de efeitos externos, avaliando os resultados da aplicação das metodologias propostas e buscar fazer o conjunto “*RPA + câmera termal de baixo custo*” uma oportunidade para viabilizar pesquisas utilizando poucos recursos e ainda sim ter acurácia dos dados encontrados.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

De acordo com o objetivo principal, ressaltam-se os objetivos específicos desta pesquisa:

1. Desenvolver uma metodologia de calibração dos sensores em laboratório, buscando uma relação entre os sensores 1 e 2; e temperaturas aparentes e cinéticas, para identificar possíveis discrepâncias;
2. Analisar a influência do horário de aquisição das imagens termais;
3. Avaliar as metodologias de correção atmosférica: Modelo Empírico Correlação Ar-Solo e Modelo Teórico *Modtran*; e definir qual oferece melhor desempenho de correção;

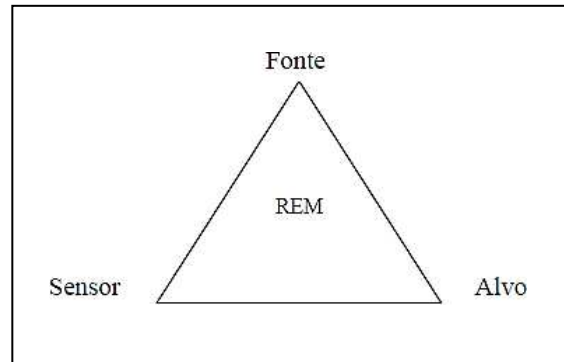
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão abordadas concepções e referências nas quais essa pesquisa atual se baseou. O Sensoriamento Remoto no Infravermelho termal e seus aspectos, envolvendo conceitos sobre radiação eletromagnética, leis de radiação termal desenvolvidas, propriedades térmicas dos elementos e correções através de calibração radiométrica; são os principais itens a serem descritos.

3.1 SENSORIAMENTO REMOTO NO INFRAVERMELHO TERMAL

Segundo Novo e Ponzoni (2001), quatro elementos são fundamentais nas técnicas de Sensoriamento Remoto (SR): a *Radiação Eletromagnética* (REM), que é o elemento de integração entre os demais elementos; a *fonte*, que no caso da aplicação das técnicas de SR é o Sol (para estudo dos recursos naturais, mas também pode ser a Terra, para os sensores passivos termais, e podem ser antenas de micro-ondas para os sistemas radares); o *sensor*, que é o instrumento capaz de coletar e registrar a REM refletida ou emitida pelo objeto; e o *alvo*, que representa o elemento do qual se pretende extrair informações. O esquema entre os elementos supracitados pode ser representado conforme a Figura 1.

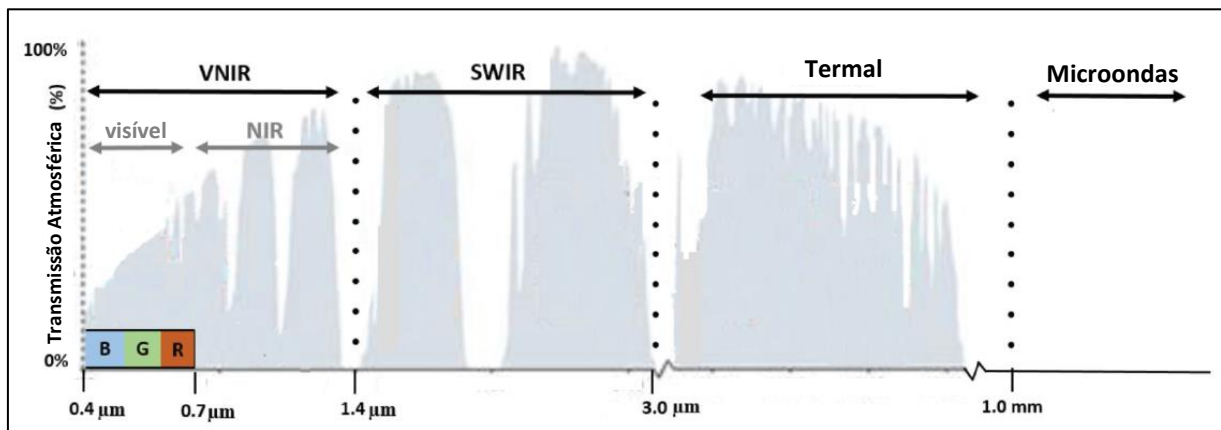
Figura 1: Esquema representativo dos quatro elementos fundamentais das técnicas de SR



Fonte: Novo e Ponzoni (2001).

A região do espectro eletromagnético referente ao infravermelho (IR) é geralmente considerada na faixa de 0,7 a 1000 μ m. Apesar de não haver um consenso, é possível dividir esta porção em infravermelho próximo (0,7 a 1,3 μ m), infravermelho médio (1,3 a 3 μ m) e infravermelho termal (3 a 1000 μ m) (OLIVEIRA, 2017). Mas devido às absorções da atmosfera, apenas a faixa espectral de 8 a 14 μ m é usada nas aplicações de SR terrestre (MENEZES & ALMEIDA, 2012). A Figura 2 ilustra a faixa do espectro eletromagnético e suas principais regiões.

Figura 2: Faixa Espectro Eletromagnético



Fonte: Adaptado CAMPBELL et al. (2023)

3.2 RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA TIR

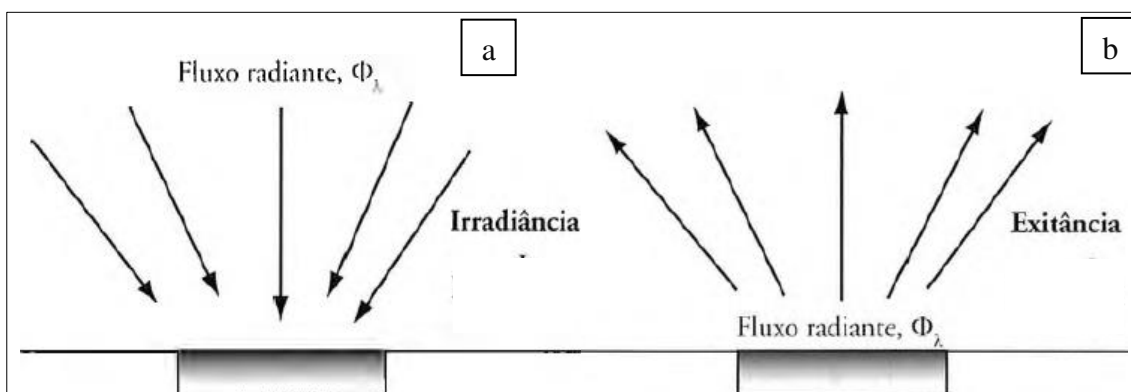
Todos os corpos que apresentam temperatura acima de zero absoluto ou zero Kelvin (-273,15°C) emitem radiação eletromagnética (MENEZES & ALMEIDA, 2012). A energia das partículas da matéria molecular em movimento aleatório é chamada de temperatura cinética, quando essas partículas colidem, elas mudam o estado de energia e emitem radiação eletromagnética (JENSEN, 2009).

Segundo Lillesand et al. (2015), a temperatura cinética é uma manifestação interna das moléculas que constituem o corpo e objetos, e quando irradiam energia em função de sua temperatura, é considerada uma manifestação externa. Essa conversão de temperatura cinética em energia radiante é que permite utilizar as técnicas do SR.

A radiação eletromagnética ou energia radiante deixando um objeto é chamada de fluxo radiante (Φ), medido em Watts. A concentração da quantidade de fluxo radiante emitido por um objeto é a sua temperatura radiante. Para a maioria dos objetos do mundo real, geralmente há uma alta correlação positiva entre a temperatura cinética verdadeira do objeto e a quantidade de fluxo radiante radiado pelo objeto (JENSEN, 2009).

Objetos não emitem toda a energia cinética presente no corpo, ou seja, normalmente a temperatura cinética é maior que a temperatura radiante, sendo a emissividade a responsável por essa diminuição de radiação, apenas o corpo negro possui relação perfeita (temperatura cinética = temperatura radiante). A Figura 3 apresenta os fluxos radiante incidente na superfície, chamada de Irradiância e o fluxo radiante emitido pela superfície, chamado de Exitância.

Figura 3: (a) Irradiância: Fluxo incidente na superfície; (b) Exitância: Fluxo emitido pela superfície.



Fonte: Adaptado Jensen (2009).

3.2.1 Leis de Radiação Termal

Todos os alvos possuem comportamento termal específico, portanto, para analisar os dados obtidos através de SR é de suma importância compreender as leis que envolvem a radiação termal. Para que se possa entender esse comportamento dos alvos, é necessário um referencial padrão, onde é comumente chamado de corpo negro (*blackbody*).

Define-se corpo negro como uma porção idealizada de matéria, constituída de muitos átomos, ou moléculas, absorvendo e emitindo REM em todas as partes do espectro eletromagnético, satisfazendo as seguintes condições: 1. Toda a radiação que incide é completamente absorvida; 2. Em todos os comprimentos de onda, e em todas as direções, a máxima taxa possível de emissão é realizada (LORENZZETI, 2015).

3.2.2 Lei da Radiação de Planck

A emissão termal de Planck fornece a exitância radiante emitida (M_λ) por um corpo negro para uma temperatura e para diferentes comprimentos de onda conforme Equação 01 (LORENZZETTI, 2015).

$$M_\lambda = \frac{2 \pi h c^2}{\lambda^5 [e^{(hc/\lambda kT)} - 1]} \quad (1)$$

Onde:

M_λ = Exitância Radiante [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$];

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-Boltzmann [$1,3806 \times 10^{-23} \text{ m} \cdot \text{K}^{-1}$];

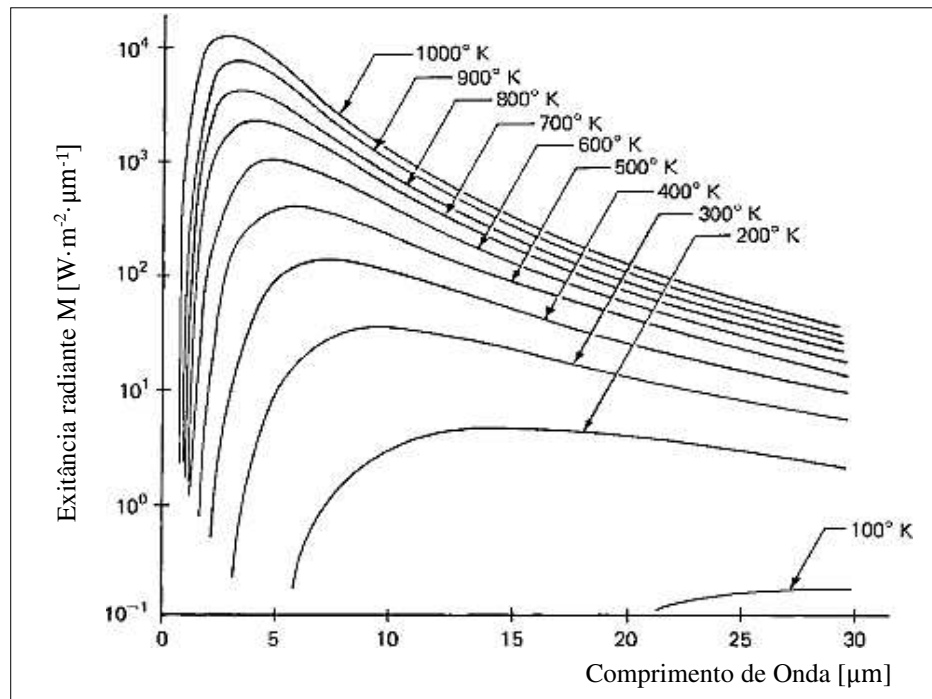
T = Temperatura dada em [K]; e

λ = Comprimento de onda [μm].

3.2.3 Lei de Stefan-Boltzmann

A energia radiante total proveniente da superfície de um corpo negro em qualquer temperatura é dada pela área sob sua curva de saída radiância espectral (LILLESAND et al., 2015). A Figura 4 mostra que o aumento da temperatura implica no aumento da energia radiante total, fazendo com que o pico de energia radiante se desloque em direção às regiões espectrais de ondas menores.

Figura 4: Distribuição Espectral de energia irradiada de vários corpos negros.



Fonte: Adaptado Liessand et al. (2015)

A Equação 02 (LORENZETTI, 2015) expressa a exitância total (M_b) de um corpo negro, sendo proporcional a quarta potência da sua temperatura e a constante de Stefan-Boltzmann.

$$M_b = \sigma T^4 \quad (2)$$

Onde:

M_b = Exitância total [$W \cdot m^{-2}$]

σ = Constante de Stefan-Boltzmann [$5,6697 \times 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$];

T = Temperatura [K];

Para determinar o comprimento de onda dominante para um corpo negro a uma temperatura específica, usa-se a lei do deslocamento de Wien.

3.2.4 Lei de Deslocamento de Wien

A Equação 03 (LORENZETTI, 2015) expressa a relação entre a temperatura cinética de um corpo negro e sua exitância máxima espectral ou comprimento de onda, dada pela Lei de deslocamento de Wien:

$$\lambda_{\text{máx}} = \frac{k}{T} \quad (3)$$

Onde:

$\lambda_{m\acute{a}x}$ = Comprimento de onda [μm];

T = Temperatura (K); e

k = Constante de Wien 2.898 [$\mu\text{m} \cdot \text{K}$].

O comprimento de onda dominante fornece uma informação importante quanto à parte do espectro eletromagnético que deve ser escolhida para observar remotamente um objeto (JENSEN, 2009).

3.2.5 Emissividade

Materiais reais da superfície não se comportam como corpos negros, em vez disso, todos os materiais reais emitem apenas uma fração da energia emitida por um corpo negro numa temperatura equivalente. A "capacidade de emissão" de um material real, em comparação com a de um corpo negro, é referida como Emissividade (LILLESAND et al., 2015).

A Emissividade é dada pela Equação 04 (JENSEN, 2009), uma razão entre radiância real emitida por um corpo real radiando seletivamente e um corpo negro sob a mesma temperatura cinética.

$$\varepsilon = \frac{M_r}{M_b} \quad (4)$$

Onde:

M_r = Exitância radiante por um corpo real radiando seletivamente [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$];

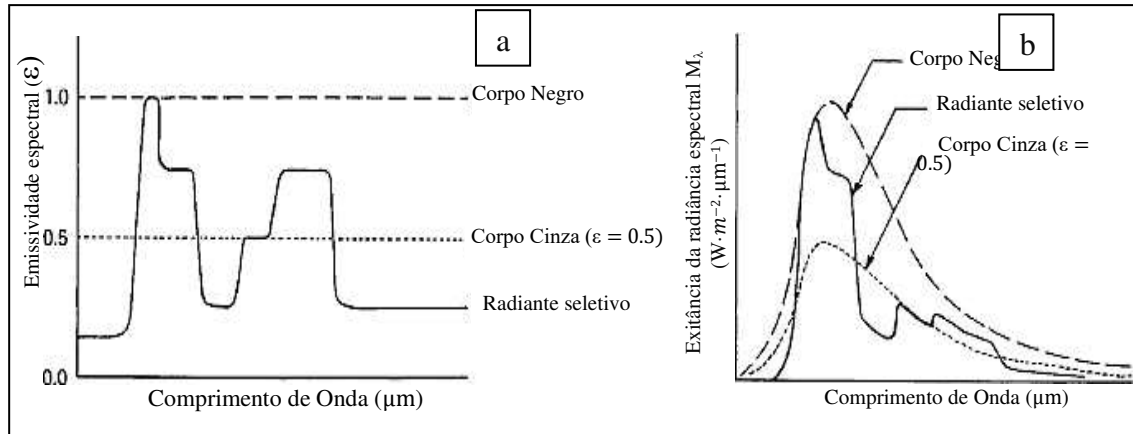
M_b = Exitância radiante por um corpo negro [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]; e

ε = Emissividade do elemento de terreno [adimensional].

A maioria dos corpos se comportam como radiadores seletivos, isto é, sua emissividade espectral varia ao longo do espectro, podendo, entretanto, ser constante dentro de faixas espectrais específicas, ou se comportam como um corpo negro ($\varepsilon = 1$) em algumas faixas (LORENZZETI, 2015). Todos os corpos que radiam seletivamente têm emissividade variando entre 0 e 1, que pode variar de acordo com o comprimento de onda a ser considerado, onde 0 se refere a não emissão de exitância espectral radiante e 1 emissão máxima de exitância espectral radiante.

Um corpo cinza tem uma emissividade constante que é menor que 1 em todos os comprimentos de onda (JENSEN, 2009). As Figuras 5 (a) e (b) mostram o comportamento da emissividade espectral e exitância espectral, respectivamente, para diferentes corpos e comprimentos de onda.

Figura 5: (a) Emissividade espectral de um corpo negro, um corpo cinza, e um radiador seletivo hipotético e (b) Distribuição espectral da exitância radiante de um corpo negro, um corpo cinza e um radiador seletivo hipotético.



Fonte: Adaptado Lillesand et al. (2015)

Segundo Jensen (2009), é importante saber sobre emissividade ao conduzir uma investigação utilizando SR termal, pela razão que dois objetos que estejam próximos no terreno, tendo a mesma temperatura cinética, podem ter diferentes temperaturas aparentes quando medidas através de um radiômetro termal, simplesmente porque suas emissividades são diferentes. A emissividade de um objeto é função de uma série de fatores, tais como cor, composição química, rugosidade da superfície, umidade e tantos outros (MENEZES & ALMEIDA, 2012).

3.2.6 Interação da radiação termal com elementos do terreno e a Lei da Radiação de Kirchhoff

O princípio de conservação de energia considera que existe uma relação entre energia incidente, absorvida, refletida e transmitida com o elemento de terreno. A Equação 05 (JENSEN, 2009) mostra essa relação:

$$\phi_I = \phi_A + \phi_R + \phi_T \quad (5)$$

Onde,

ϕ_I = Energia incidente na superfície do elemento de terreno [W];

ϕ_A = Componente de energia incidente absorvida pelo elemento do terreno [W];

ϕ_R = Componente de energia incidente refletido pelo elemento do terreno [W]; e

ϕ_T = Componente de energia incidente transmitido pelo elemento do terreno [W].

Se dividir os termos da energia incidente na superfície do elemento de terreno (ϕ_I), tem-se a seguinte Equação 06 (JENSEN, 2009):

$$\frac{\Phi_I}{\Phi_I} = \frac{\Phi_A}{\Phi_I} + \frac{\Phi_R}{\Phi_I} + \frac{\Phi_T}{\Phi_I} \quad (6)$$

Os termos do lado direito da Equação 6 compreendem razões que são mais convenientes descrevendo a natureza das interações de energia térmica, portanto, reescrevendo as Equações 07, 08 e 09 (JENSEN, 2009), tem-se:

$$\alpha(\lambda) = \frac{\Phi_A}{\Phi_I}, \quad (7)$$

$$\rho(\lambda) = \frac{\Phi_R}{\Phi_I}, \text{ e} \quad (8)$$

$$\tau(\lambda) = \frac{\Phi_T}{\Phi_I} \quad (9)$$

Onde,

$\alpha(\lambda)$ = Absortância do elemento de terreno [adimensional];

$\rho(\lambda)$ = Reflectância do elemento do terreno [adimensional]; e

$\tau(\lambda)$ = Transmitância do elemento do terreno [adimensional].

Logo, reescrevendo a Equação 06, utilizando as Equações 07, 08 e 09 para substituir alguns termos, tem-se pela Equação 10 (JENSEN, 2009) uma relação entre um elemento do terreno absorvendo, refletindo e transmitindo propriedades:

$$\alpha(\lambda) + \rho(\lambda) + \tau(\lambda) = 1 \quad (10)$$

A Lei Kirchhoff considera que numa porção do infravermelho a emissividade espectral de um objeto geralmente é igual à sua absortância espectral, em função disto, bons absorvedores são bons emissores e bons refletores são maus emissores, de acordo com a Equação 11 (JENSEN, 2009).

$$\varepsilon(\lambda) = \alpha(\lambda) \quad (11)$$

A maioria dos materiais do mundo real geralmente são opacos à radiação infravermelha termal, significando que pouco fluxo radiante emerge do outro lado do elemento do terreno. Portanto, pode-se desconsiderar a transmitância (JENSEN, 2009), $\tau(\lambda) = 0$, tendo a Equação 12.

$$\varepsilon(\lambda) + \rho(\lambda) = 1 \quad (12)$$

Como o terreno teoricamente não perde nenhuma energia por transmitância, toda a energia que é emitida do objeto tem que ser explicada pela relação entre a reflectância e a emissividade. Um exemplo dado por Lorenzetti (2015), diz que a água tem reflectância quase insignificante no espectro termal, portanto, sua emissividade é essencialmente 1. Em contraste, um material como a folha de metal é altamente reflexivo de energia térmica, portanto tem uma emissividade muito menor do que 1.

Desta forma, conhecendo a emissividade dos objetos do mundo real, é possível ajustar a equação de Stefan-Boltzmann, que a princípio era aplicada a Corpos Negros, de acordo com a Equação 13 (JENSEN, 2009).

$$M_r = \varepsilon \sigma T_c^4 \quad (13)$$

Onde:

M_r = Exitância radiante por um corpo real radiando seletivamente [$W \cdot m^{-2}$];

ε = Emissividade do elemento de terreno [adimensional].

T_c = Temperatura cinética [K];

Segundo Jensen (2009), ao medir a temperatura do solo ou de uma superfície d'água, o objetivo do sensoriamento remoto termal é de ter o registro da temperatura radiante aparente (T_a) igual à temperatura cinética (T_c) do objeto, porém, o fluxo radiante de um objeto do mundo real a uma dada temperatura não é igual ao fluxo radiante proveniente de um corpo negro à mesma temperatura, devido aos efeitos da emissividade, portanto a temperatura radiante aparente pode ser dada como:

$$T_a = \varepsilon T_c \quad (14)$$

Onde:

T_a = Temperatura aparente [K];

ε = Emissividade do elemento de terreno [adimensional].

T_c = Temperatura cinética [K];

Assim, assumindo que:

$$M_b = \sigma T_c^4, \quad (15)$$

$$M_r = \varepsilon \sigma T_a^4, \quad (16)$$

$$M_b = \varepsilon M_r, \quad (17)$$

Então,

$$\sigma T_c^4 = \varepsilon \sigma T_a^4 \quad (18)$$

Logo, a temperatura radiante aparente está relacionada a sua temperatura cinética e a sua emissividade de acordo com a Equação 19 (JENSEN, 2009).

$$T_a = \varepsilon^{\frac{1}{4}} \cdot T_c \quad (19)$$

As relações entre temperatura cinética e aparente para diferentes tipos de objetos podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1: Emissividade, temperatura cinética e temperatura aparente de objetos selecionados a 300K e 27 °C.

| Material | Emissividade | Temperatura Cinética | | Temperatura Aparente | |
|-------------------|--------------|----------------------|-------|----------------------|-------|
| | | K | °C | K | °C |
| Corpo Negro | 1,00 | 300 | 26,85 | 300 | 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 Jensen (2009).

3.3 PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS ELEMENTOS DE TERRENO

Segundo Jensen (2009), água, rocha, solo, vegetação, atmosfera e o corpo humano têm capacidade de conduzir calor diretamente através da condutividade térmica para outra superfície e armazenar calor através da capacidade térmica.

A Condutividade Térmica representa a taxa com que a substância transfere energia de um ponto a outro e Capacidade térmica é uma medida de capacidade do material em absorver energia e é dada pela quantidade de calor necessária para elevar a temperatura de 1 grama do material de 1°C (LORENZZETI, 2015).

Entretanto, alguns materiais respondem às variações de temperatura de maneira diferente, onde esse tempo de resposta (mais rápido ou mais lento) é dado pela inércia termal. Essa é uma medida da resposta térmica do material às mudanças de temperatura, dada pela Equação 20 (JENSEN, 2009).

$$P = \sqrt{K \rho c} \quad (20)$$

Onde,

P = inércia termal [$\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2} \cdot \text{°C}^{-1}$];

K = condutividade térmica [$\text{cal} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$];

ρ = densidade [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$]; e

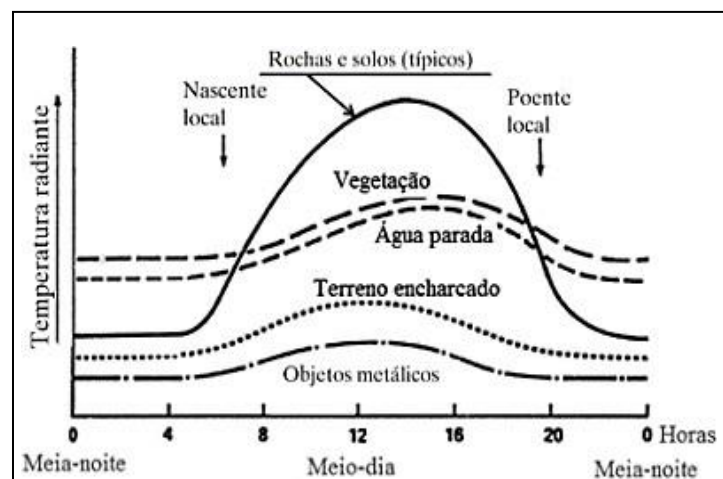
c = calor específico [$\text{cal} \cdot \text{g}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$].

A densidade é uma variável biofísica muito importante nesta equação porque geralmente a inércia termal aumenta linearmente com o aumento da densidade do material (JENSEN, 2009).

Segundo Menezes & Almeida (2012) as condições ambientais e climáticas interferem a todo o momento na temperatura de superfície, modificando-a em curtos intervalos de tempo. Outro fator que pode influenciar as imagens termais é a influência do aquecimento solar sobre os materiais, pois uma imagem termal tomada em dias diferentes onde a insolação é variante, emitirão intensidades diferentes de energia radiante. Ainda, para evitar esse efeito é mais aconselhável obter as imagens termais um pouco antes de amanhecer o dia, quando o calor armazenado pela insolação já tenha se dissipado, estando a temperatura dos materiais mais próxima de suas temperaturas naturais.

A Figura 6 mostra a variação da temperatura radiante de diversos elementos em função do tempo.

Figura 6 : Variação da Temperatura ao longo do dia para elementos com diferentes inércias termais.



Fonte: Lorenzetti (2015).

3.4 CALIBRAÇÃO INTERNA DE SENSORES TERMAIS

Muitas aplicações de imagens termais utilizam diferenças relativas entre os Números Digitais (ND) para verificar características de superfície, não havendo necessidade de quantificar com precisão as temperaturas cinéticas absolutas. Entretanto, ainda existem casos em que é importante extrair informações de temperatura das imagens. Portanto, é necessário

que se faça uma calibração interna dos sensores, visando melhorar a acurácia dos dados extraídos.

Existem inúmeras abordagens para calibração de sensores termais, cada um com seu próprio grau de precisão (LILLESAND et al., 2015). A metodologia mais utilizada adota uma referência de temperatura conhecida, para ajustar todos os demais ND da imagem para o ND de referência. Um Corpo Negro possui uma superfície na qual a sua emissividade é conhecida e sua temperatura termodinâmica pode ser ajustada (OLIVEIRA, 2017), colocando no eixo de varredura do sensor para ser identificado e gravado o ND de referência, sendo uma referência muito utilizada para calibrações.

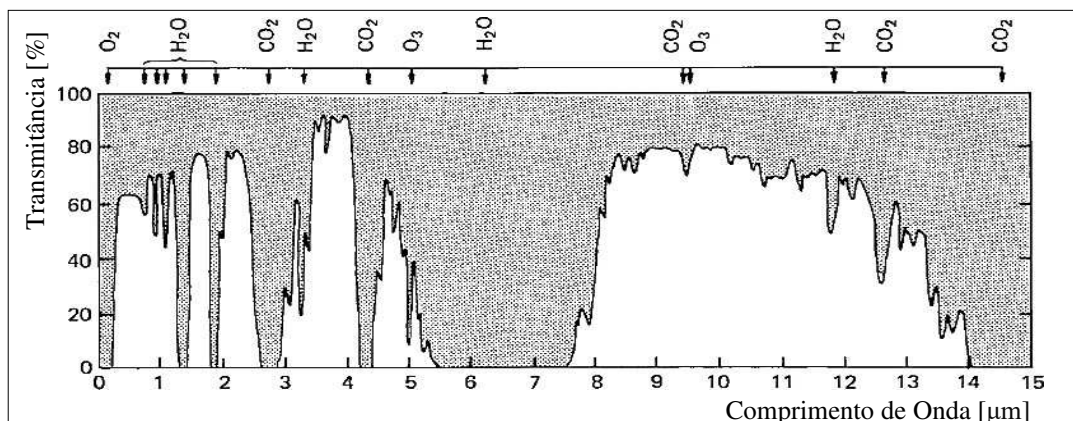
Apesar da solução melhorar os resultados, ela não considera efeitos da atmosfera, sendo necessário outro tipo de correção para o mesmo.

3.5 EFEITOS DA ATMOSFERA

Como é o caso com todos os sistemas passivos de sensoriamento remoto, a atmosfera tem um significativo efeito sobre a intensidade e composição espectral da energia registrada por um sistema termal (LILLESAND et al., 2015).

Algumas regiões do espectro eletromagnético sofrem maior influência dos efeitos da atmosfera que outras, alguns trechos do infravermelho possuem lacunas nas quais é possível detectar energia refletida e emitida, como é o caso do infravermelho próximo e médio (0,7 a 3 μm) e uma parte do infravermelho termal (8-14 μm), essas lacunas são denominadas Janelas Atmosféricas. A Figura 7 apresenta alguns trechos do espectro em que a atmosfera não exerce tanta influência.

Figura 7: Absorção atmosférica na faixa de comprimento de onda entre 0 a 15 μm .



Fonte: Lillesand et al. (2015).

A região do Infravermelho termal (5 - 7,5 μm), absorve a maior parte da energia emitida

pelo terreno, fazendo com que o sensoriamento remoto termal desta região se torne inutilizado. Segundo Jensen (2009), essas regiões são chamadas de bandas de absorção, onde o vapor d'água (H_2O), dióxido de carbono (CO_2) e ozônio (O_3) são responsáveis pela maior parte da absorção.

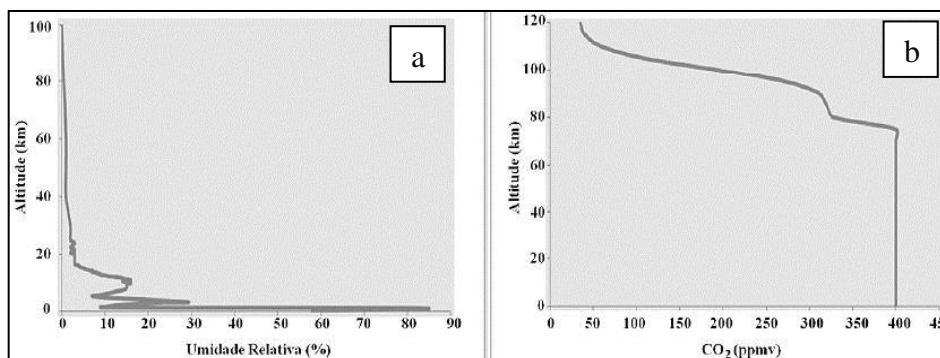
Apesar da região do infravermelho termal (8 - 14 μm) ser a mais utilizada para pesquisas que envolvem termografia por ter menos influência atmosférica, não é totalmente livre desses efeitos. Assim, conhecer as características da composição atmosférica e corrigi-las se faz necessário para que se possa obter resultados acurados.

Gases e partículas suspensas na atmosfera podem emitir radiação própria, aumentando a radiação detectada. Consequentemente, absorção atmosférica e espalhamento tendem a fazer os sinais de objetos no solo parecem mais frios do que são, e a emissão atmosférica tende a fazer objetos no solo parecem mais quentes do que são, dependendo das condições atmosféricas durante a aquisição da imagem, um desses efeitos supera o outro (LILLESAND et al., 2015).

Segundo Markoski (2015), a atmosfera é composta por Troposfera e Estratosfera. A Troposfera engloba a primeira camada acima da superfície da terra (0 - 17km), tendo a sua temperatura diminuindo conforme o aumento da altitude e é responsável por 80% da massa atmosférica. Quase todo vapor d'água que está disponível na atmosfera se encontra na Troposfera. Na Estratosfera, a temperatura aumenta conforme o aumento da altitude, e está localizada entre 17km até 50km de altitude.

O espectro do vapor d'água cobre praticamente toda a região do infravermelho, sendo considerado o absorvedor mais importante. O CO_2 tem sua concentração aumentada globalmente, principalmente como resultado da queima de combustíveis fósseis, e as principais bandas de absorção estão concentradas em 4,3 μm e outra em 15 μm (VIUDEZ-MORA, 2011). A Figura 8 (a) e (b) apresenta o comportamento desses dois componentes em função da altitude.

Figura 8: Perfis dos gases atmosféricos; (a) Variação da umidade relativa em função da altitude e (b) Variação do CO₂ em função à altitude.



Fonte: Oliveira (2017).

O ozônio O₃ e o Metano CH₄ também são importantes absorvedores de energia na faixa do infravermelho termal, entretanto, segundo Maghrabi (2007), o ozônio acumula-se entre 15 e 25km de altitude, e tem concentrações máximas entre 20 e 25km. Já o Metano, possui alta concentração em altitudes baixas, porém, seu impacto sobre a energia eletromagnética é baixo, já que sua concentração total na atmosfera é inferior a 0,0002%. Diante do exposto, para imageamento através de sensores orbitais, tais gases podem ter alguma influência significativa, entretanto, para o presente estudo, que irá trabalhar com baixas altitudes (< 100m), as concentrações desses gases são muito baixas, e serão consideradas insignificantes.

Muitas pesquisas vêm sendo feitas desconsiderando a influência atmosférica para baixas altitudes, seguindo um princípio estabelecido pelo autor Lorenz (1968) em que afirma que sua influência nas medições radiométricas da temperatura superficial é desprezível se a distância ao alvo for menor que aproximadamente 152m. Porém, no estudo feito por Maghrabi (2007), verificou que “acima dos 30km de altitude a emissão atmosférica é desprezível”, deixando uma abertura para novas pesquisas sobre o assunto.

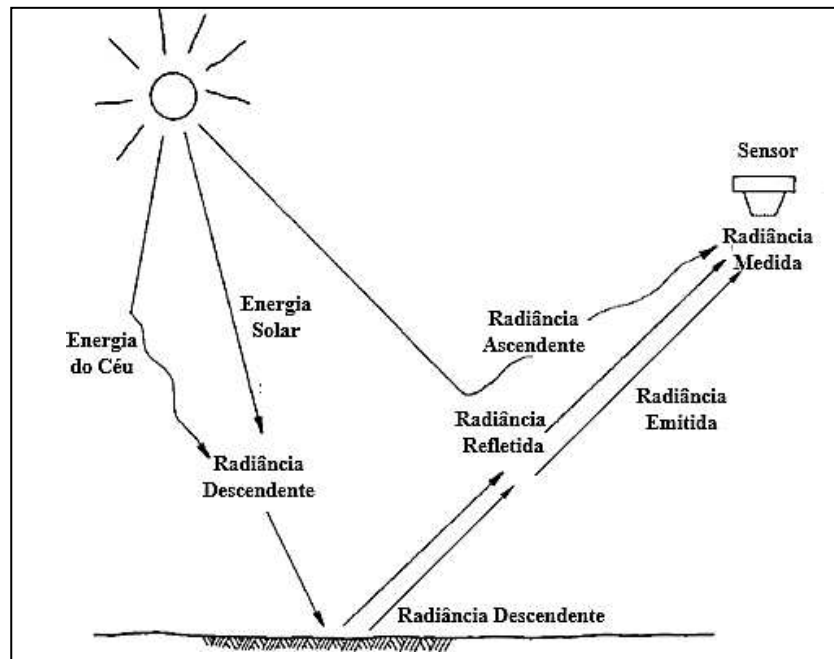
3.6 CORREÇÃO DOS EFEITOS ATMOSFÉRICOS

Os principais efeitos observados nas imagens de satélite são a diminuição da faixa de valores digitais possíveis registrados pelo sensor, diminuição de contraste entre os alvos adjacentes e alteração no brilho de cada ponto da imagem (MARKOSKI, 2015). Assim, os efeitos atmosféricos possuem influência negativa sobre os dados coletados, sendo de suma importância sua correção.

A radiação medida por um sistema sensor é constituída por duas componentes: a do alvo e da atmosfera. A Figura 9 apresenta o esquema das radiações das energias advindas de

solo e atmosfera.

Figura 9: Esquema da Radiação captada pelo sensor.



Fonte: Adaptado de Lillesand et al. (2015).

A radiação que deixa a superfície, a qual é uma combinação entre radiação emitida e refletida, está relacionada à radiação registrada pelo sensor, assim como a transmissão atmosférica e a radiação atmosférica ascendente, a qual é derivada tanto da emissão quanto do espalhamento atmosférico (MARKOSKI, 2015). Desta forma, a radiação recebida pelo sensor pode ser descrita conforme Equação 21 (JENSEN, 2009).

$$L_{\text{sens}} = L_{\text{desc}} \cdot \tau_r + L_{\text{asc}} \quad (21)$$

Onde,

L_{sens} = Radiação registrada pelo sensor [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$];

L_{desc} = Radiação descendente [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$];

L_{asc} = Radiação atmosférica ascendente [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$] e

τ_r = Transmitância atmosférica [adimensional].

Assim, uma equação de transferência radiativa pode ser escrita num dado comprimento de onda (λ) conforme Equação 22 (JENSEN, 2009).

$$L_{\text{sens}} = \frac{1}{\pi} [\varepsilon M_b + (1 - \varepsilon) L_{\text{desc}}] \tau_r + L_{\text{asc}} \quad (22)$$

Onde,

L_{sens} = Radiância registrada pelo sensor [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$];

ε = Emissividade da superfície terrestre [adimensional];

M_b = Exitância radiante do Corpo Negro dada pela lei de Planck [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$];

L_{desc} = Radiância descendente [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$];

τ_r = Transmitância atmosférica [adimensional].

L_{asc} = Radiância atmosférica ascendente [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$] e

$1/\pi$ = Termo que assume a terra como um refletor difuso - uma Superfície Lambertiana (JENSEN, 2009) [sr^{-1}];

Para avaliar e quantificar os efeitos atmosféricos, uma calibração da imagem pode ser feita utilizando modelos atmosféricos empíricos ou teóricos (LILLESAND et al, 2015). Quando se tem conhecimento das propriedades ópticas da atmosfera e do processo de interação da radiação com a atmosfera e a superfície, além de dados meteorológicos auxiliares, é possível modelar a atmosfera com maior precisão utilizando algoritmos que visam estimar os parâmetros físicos característicos da atmosfera em estudo (MARKOSKI, 2015).

O algoritmo MODTRAN (*Moderate Resolution Atmospheric Transmission*) é usado mundialmente por cientistas pesquisadores em agências governamentais, organizações comerciais e instituições educacionais para a previsão e análise de medições ópticas através da atmosfera (BERCK et al., 2014).

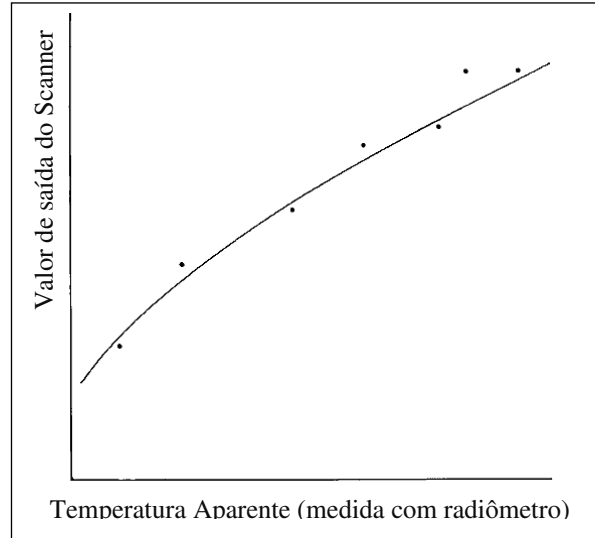
Assim, modelando a atmosfera no momento do sobrevoo, é possível estimar os parâmetros de transmitância, radiância ascendente e descendente e aplicar devida correção (OLIVEIRA, 2017).

Segundo Lillesand et al. (2015), devido à complexidade da medição e modelagem dos fatores atmosféricos, os modelos teóricos estão sendo substituídos pelos modelos empíricos. A Correlação ar-solo é um modelo empírico frequentemente utilizado, para tanto, é feita a medição de temperatura em alguns pontos do solo simultaneamente com a passagem da aeronave. Posteriormente, é feita uma correlação das temperaturas ar x solo, assim, é estabelecida uma relação (normalmente utilizando procedimentos de análise de regressão estatística) onde é possível determinar a temperatura de todos os pontos nas imagens da varredura onde não existem dados terrestres.

A Figura 10 mostra a curva de calibração advinda de uma regressão utilizando dados

coletados no solo.

Figura 10: Curva de calibração de amostra usada para correlacionar a saída do scanner com a temperatura radiante medida pelo radiômetro.



Fonte: Adaptado de Lillensad et al. (2015)

3.7 SUPERFÍCIE LAMBERTIANA

Segundo Schott (2007), um dos desafios do sensoriamento remoto é identificar como a energia que sai da superfície é distribuída angularmente no ambiente superior, por isso, para facilitar os estudos, muitas vezes a superfície é adotada como lambertiana.

Uma Superfície Lambertiana considera que a radiância emitida por uma superfície é a mesma em todas as direções (SCHOTT, 2007). Assim, para fazer essa suposição nos estudos de radiância, tem-se que toda exitância radiante de um objeto está relacionada a uma radiância por um fator π . A Equação 23 (SCHOTT, 2007) descreve a relação entre exitância radiante e radiância emitida por uma superfície considerada como lambertiana.

$$L_{\text{sensor}} = \frac{M}{\pi} \quad (23)$$

L_{sens} = Radiância registrada pelo sensor [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$];

M = Exitância radiante por uma superfície [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$];

$1/\pi$ = Termo que assume a terra como um refletor difuso - uma Superfície Lambertiana (JENSEN, 2009) [sr^{-1}];

3.8 FUNÇÃO RESPOSTA ESPECTRAL (FRE) DO SENSOR

Toda radiância que chega ao um sensor é calculada em função da exitância radiante da

superfície ou objeto. Entretanto, segundo Schott (2007), a radiância detectada pelo sensor é dada pela radiância que chega ao sensor ponderada pela função resposta espectral do sensor (FRE).

A FRE do sensor indica um intervalo espectral na qual o sensor vai ser mais sensível a interferências, assim, a Equação 23 (SCHOTT, 2007) apresenta a ponderação da radiância pela FRE do sensor.

$$L_{det} = L_{sensor} \cdot FRE \quad (24)$$

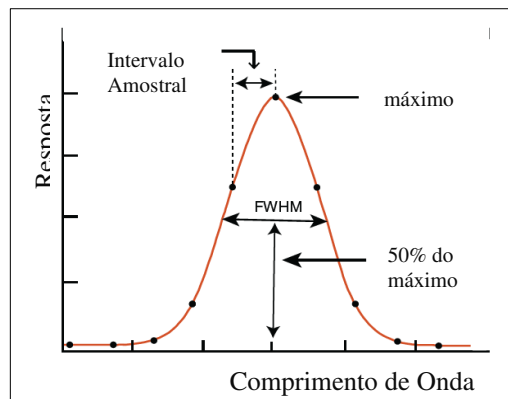
Onde,

L_{det} = Radiância espectral detectada pelo sensor [$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$]

3.9 SENSIBILIDADE ESPECTRAL DO SENSOR

Segundo Campbell et al (2023) a determinação da sensibilidade espectral de um sensor muitas vezes utiliza o conceito da largura total a meia altura do comprimento de onda máximo (*Full Width at Half Maximum – FWHM*). A Figura 11 apresenta o FWHM.

Figura 11: Definição do intervalo FWHM.



Fonte: Adaptado de Campbell et al. (2023)

Nos limites extremos, além dos limites do FWHM, a resposta é fraca e não confiável (CAMPBELL et al., 2023).

3.10 GROUND SAMPLE DISTANCE (GSD) NO SENSORIAMENTO REMOTO

Todo sistema de sensoriamento remoto tem um limite de quão pequeno é um objeto na superfície da Terra que ainda pode ser “visto” por um sensor e ser diferenciado dos seus arredores (LILLESAND et al., 2015). Esse limite de diferenciação é chamado de Distância Amostral no Terreno (*Ground Sample Distance - GSD*), que é utilizado para descrever a resolução espacial de uma imagem ou fotografia aérea.

O GSD é representado por cada pixel da imagem e medido em unidades de

comprimento, como metros ou centímetros por pixel. Quanto menor for o GSD, maior é a resolução espacial, ou seja, mais detalhes podem ser distinguidos na imagem. Ele é influenciado por diversos vários fatores, como altitude do sensor, distância focal da câmera ou a abertura do sensor (IFOV) e tempo de exposição do obturador na aquisição da imagem.

O GSD é importante para analisar imagens no sensoriamento remoto, pois define a capacidade de diferenciar ou generalizar objetos no terreno. Entretanto, ao transferir esse termo para o Sensoriamento Remoto Termal, pode-se verificar a precisão das temperaturas de superfície, sendo menos precisas quando GSD corresponde a áreas mais extensas e mais precisas, quando GSD corresponde a áreas menos extensas.

Para calcular o GSD, é necessário conhecer a altura do sensor, distância focal do sensor e tamanho do pixel da câmera. A Equação 25 (JENSEN, 2009) apresenta o cálculo do GSD.

$$\text{GSD} = \frac{d \cdot H}{f} \quad (25)$$

Onde:

GSD = Distância Amostral no Terreno [m];

d = tamanho do pixel [mm];

H = altura do sensor [mm] e

f = distância focal do sensor [mm].

3.11 REMOTELY PILOTED AIRCRAFT (RPA)

As Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARPs) devem ter minimamente os sistemas: Plataforma (Asa fixa, asa rotativa, multirrotor, dirigível, etc.), Sistema de Comunicação, *Payload* (câmeras, radar, etc.) e Estação de Controle. Dependendo da aplicação operacional, a configuração do sistema poderá variar em tamanho, tipo do motor, autonomia ou tipo de sensor (MUNARETTO, 2017).

Segundo Munaretto (2017), existem vários termos que referem-se a aeronaves remotamente pilotadas, as principais são *Drone* (zangão – traduzido do Inglês), RPV (*Remotely Piloted Vehicle*), termo adotado na década de 60, durante a guerra do Vietnã; RPA (*Remotely Piloted Aircraft*), termo que surgiu na década de 90 e continua sendo utilizado; UAS (*Unmanned Aerial System*), termo que surgiu nos anos 2000 e continua sendo utilizada, principalmente no meio Militar. Atualmente, o RPA (*Remotely Piloted Aircraft*) é a

nomenclatura adotada pela ICAO (*International Civil Aviation Organization*) e no Brasil pela ANAC (Agência Nacional de Aviação Civil) e pelo DECEA (Departamento de Controle do Espaço Aéreo).

Esse sistema pode oferecer alta versatilidade e flexibilidade, em comparação com sistemas aéreos convencionais ou satélites, e pode operar rapidamente sem agendamento planejado. Podendo voar em baixas altitudes e lentamente, com a capacidade de adquirir alta resolução espacial e temporal de dados, representando importantes vantagens em relação as plataformas convencionais que têm sido amplamente utilizadas ao longo dos anos (PAJARES, 2017).

Na última década, o crescentes desenvolvimento e melhoria em plataformas não tripuladas e o desenvolvimento de tecnologias de detecção instaladas a bordo, oferecem excelentes oportunidades para aplicações de sensoriamento remoto.

Os sistemas aerotransportados (aeronaves pilotadas) requerem um planejamento de voo detalhado com antecedência, enquanto a coleta de dados de satélites é limitada pela característica da plataforma da órbita (LILLESAND et al., 2015).

Aplicações civis de RPAs para sensoriamento remoto ainda estão em desenvolvimento, principalmente para aplicações na agricultura, silvicultura e áreas afins (CAMPBELL & WYNNE, 2011).

Segundo Campbell e Wynne (2011), alguns dados a serem coletados em campo simultaneamente com os dados da imagem, podem variar ao longo do tempo e do espaço rapidamente quando se trata de uma grande região, ou seja, dados como temperatura, umidade ou iluminação podem estar mudando em uma mesma imagem enquanto estão sendo coletados por uma aeronave ou satélite. Assim, as plataformas não tripuladas ganham destaque na coleta de dados, facilitando a aquisição de dados mais rapidamente.

3.12 ESTATÍSTICA DESCRITIVA

A estatística descritiva é uma parte da estatística que tem como função principal descrever e analisar os dados de uma amostra ou população, sendo de grande importância a análise estatística, pois ajuda a entender e interpretar os dados de forma significativa. Dentre as principais medidas pode-se citar medidas de posição ou tendência central, variabilidade e dispersão dos dados.

3.12.1 Variância e Desvio Padrão

A variância, denotada por s^2 , é a medida de dispersão mais utilizada, seja pela sua facilidade de compreensão e cálculo ou pela possibilidade de emprego na inferência estatística. A variância é definida como sendo a média dos quadrados dos desvios em relação à média aritmética (PIANA et al, 2009). A Equação 26 (CRESPO, 2009) apresenta a medida de dispersão variância (σ^2).

$$\sigma^2 = \frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n} \quad (26)$$

Onde,

σ^2 = Variância [unidade equivalente ao dado elevado a segunda potência];

x_i = Valor da i-ésima variável analisada [unidade do dado];

\bar{x} = Média aritmética amostral ou populacional [unidade do dado] e

n = número de observações;

Já o desvio padrão, denotado por σ , auxilia no problema da interpretação da variância, pois a unidade é dada na mesma medida do dado. A Equação 27 (CRESPO, 2009) apresenta a medida de dispersão desvio padrão (σ):

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} \quad (27)$$

Onde,

σ = Desvio Padrão [unidade equivalente ao dado].

Segundo Crespo (2009), a variância e o desvio padrão são medidas que levam em consideração a totalidade dos valores da variável em estudo, por isso são índices de variabilidade mais estáveis, sendo os índices mais utilizados.

3.13 INFERÊNCIA ESTATÍSTICA

O conceito de Inferência Estatística é o conjunto de procedimentos estatísticos que tem por finalidade generalizar conclusões de uma amostra para uma população (PIANA et al., 2009). Segundo Morettin (2010), é impraticável observar toda uma população, seja pelo alto custo ou dificuldades adversas, portanto, examina-se uma amostra, que se for bastante representativa, os resultados poderão ser generalizados para toda a população.

Para poder generalizar as conclusões obtidas da amostra para a população, não basta

saber descrever convenientemente os dados da amostra, é preciso garantir que o processo de amostragem seja eficiente, ou seja, que a amostra seja representativa da população. Isto significa que a amostra deve possuir as mesmas características básicas da população no que diz respeito às variáveis que se deseja pesquisar (PIANA et al., 2009).

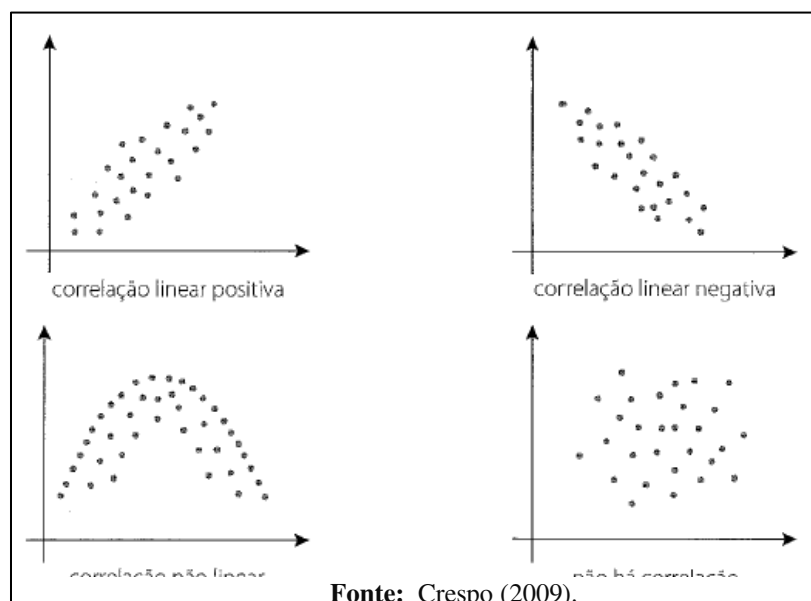
Toda conclusão obtida por uma amostragem, quando generalizada para uma população, virá acompanhada de um grau de incerteza ou risco (MORETTIN, 2010). Portanto, a análise destes resultados requer cautela para assumi-los como verdadeiros e generalizar para toda uma população. Portanto, metodologias estatísticas para análises são imprescindíveis para chegar a conclusões finais.

3.13.1 Correlação

Em um estudo o objetivo principal do pesquisador é utilizar a estatística para definir alguma relação entre os dados para que se possa prever ou estimar variáveis esperadas. Segundo Crespo (2009), se a relação entre as variáveis for de natureza quantitativa, a correlação é o instrumento adequado para descobrir e medir essa relação e pode ser descrita através da regressão, que é o instrumento adequado para determinar os parâmetros dessa função.

Para identificar o tipo de correlação existente entre os dados envolvidos, e consequentemente o tipo de regressão a ser utilizada, o diagrama de dispersão dos dados apresenta uma nuvem de pontos que fornece uma forte ideia do comportamento da correlação. A Figura 12 apresenta nuvens de dispersão de pontos com formatos diferentes.

Os diagramas (a) e (b) indicam uma correlação linear ascendente e descendente,



Fonte: Crespo (2009).

respectivamente. O diagrama (c) indica uma correlação não linear, e o diagrama (d) indica que não há correlação entre os pontos.

Figura 12: Diferentes tipos de diagramas de dispersão de pontos.

O limite do coeficiente de correlação varia de -1 a +1, onde $r = -1$ indica que existe uma correlação negativa perfeita entre as variáveis. Já o $r = +1$ indica que existe uma correlação positiva perfeita entre as variáveis e positiva. E quando $r = 0$ indica que não há correlação entre as variáveis. Crespo (2009) ainda exalta que para se ter uma conclusão significativa o comportamento das variáveis analisadas deve ser $0,6 \leq |r| \leq 1$, entretanto, se $0,3 \leq |r| \leq 0,6$ há uma correlação relativamente fraca entre as variáveis, se $0 \leq |r| \leq 0,3$ a correlação é muito fraca, não podendo inferir nada sobre a relação entre as variáveis em estudo.

3.13.1.1 Correlação de Pearson

A Correlação de *Pearson* é utilizada para medir a relação entre duas variáveis relacionadas linearmente, ou seja, o aumento de uma variável implica no aumento ou diminuição da outra variável relacionada, na mesma proporção. A Equação 28 (CRESPO, 2009) apresenta o Coeficiente da Correlação de *Pearson* em função das variáveis.

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (28)$$

Onde,

r = Coeficiente de Correlação de *Pearson* [$-1 \leq r \leq 1$];

x_i e y_i = Valores das i -ésimas variáveis analisadas [unidade dos dados];

\bar{x} e \bar{y} = Média aritmética amostral ou populacional das variáveis analisadas [unidade dos dados].

3.13.1.2 Correlação de Spearman

Enquanto a Correlação de *Pearson* é conhecida como correlação paramétrica, pois depende da distribuição dos dados, a Correlação de *Spearman* é um teste não paramétrico e pode ser utilizada para análises não lineares. A correlação de *Spearman* é mais eficaz para identificar relações entre as variáveis, uma vez que é um índice de maior sensibilidade. A Correlação de *Spearman* é dada pela Equação 29 (GEEKSFORGEES, 2023).

$$\rho = 1 - \frac{6 \cdot \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (29)$$

Onde,

ρ = Coeficiente de Correlação de *Spearman* [$-1 \leq r \leq 1$];

x_i e y_i = Valores dos dados analisados [unidade dos dados];

\bar{x} e \bar{y} = Média aritmética dos valores dos dados analisados [unidade dos dados];

n = número total de observações [adimensional];

d_i = diferença entre as classificações de observações [adimensional].

3.13.2 Regressão Linear Simples

Após identificar uma correlação consistente entre as variáveis, é possível fazer uma modelagem matemática através de uma regressão, que deverá ajustar uma linha de tendência aos pontos que mais se adequam a ela, podendo assumir o tipo linear, logarítmica, polinômio, exponencial e etc.

A regressão linear simples é linear porque a relação entre X e Y é expressa por uma equação de primeiro grau, representada graficamente por uma reta, e simples porque envolve apenas duas variáveis (PIANA et al, 2009). Assim, segundo Montgomery e Runger (2003) a variável aleatória Y está relacionada com X pela relação linear indicada na modelo empírico da Equação 30.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x + \epsilon \quad (30)$$

Onde,

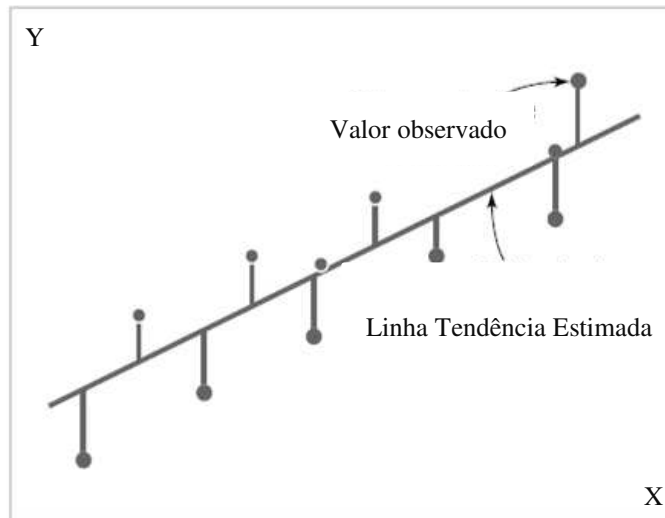
β_0 = intercepto populacional

β_1 = inclinação populacional

ϵ = resíduo

O intercepto e a inclinação da linha são chamados de coeficientes de regressão (MONTGOMERY & RUNGER, 2003).

O Coeficiente de determinação (R^2) é frequentemente usado para julgar a adequação de um modelo de regressão (MONTGOMERY & RUNGER, 2003). Ele indica quanto a linha de tendência está próxima e ajustada aos dados, variando de 0 a 1, onde $R^2 = 0$ indica que o modelo não se ajusta aos dados ao seu redor e $R^2 = 1$ indica que o modelo se ajusta totalmente aos dados ao redor. A Figura 13 apresenta uma linha de tendência e as discrepâncias dos dados.

Figura 13: Linha de Tendência e as discrepâncias dos dados

Fonte: Adaptado de Montgomery e Runger (2003)

3.13.3 Teste Estatístico de Mann-Whitney

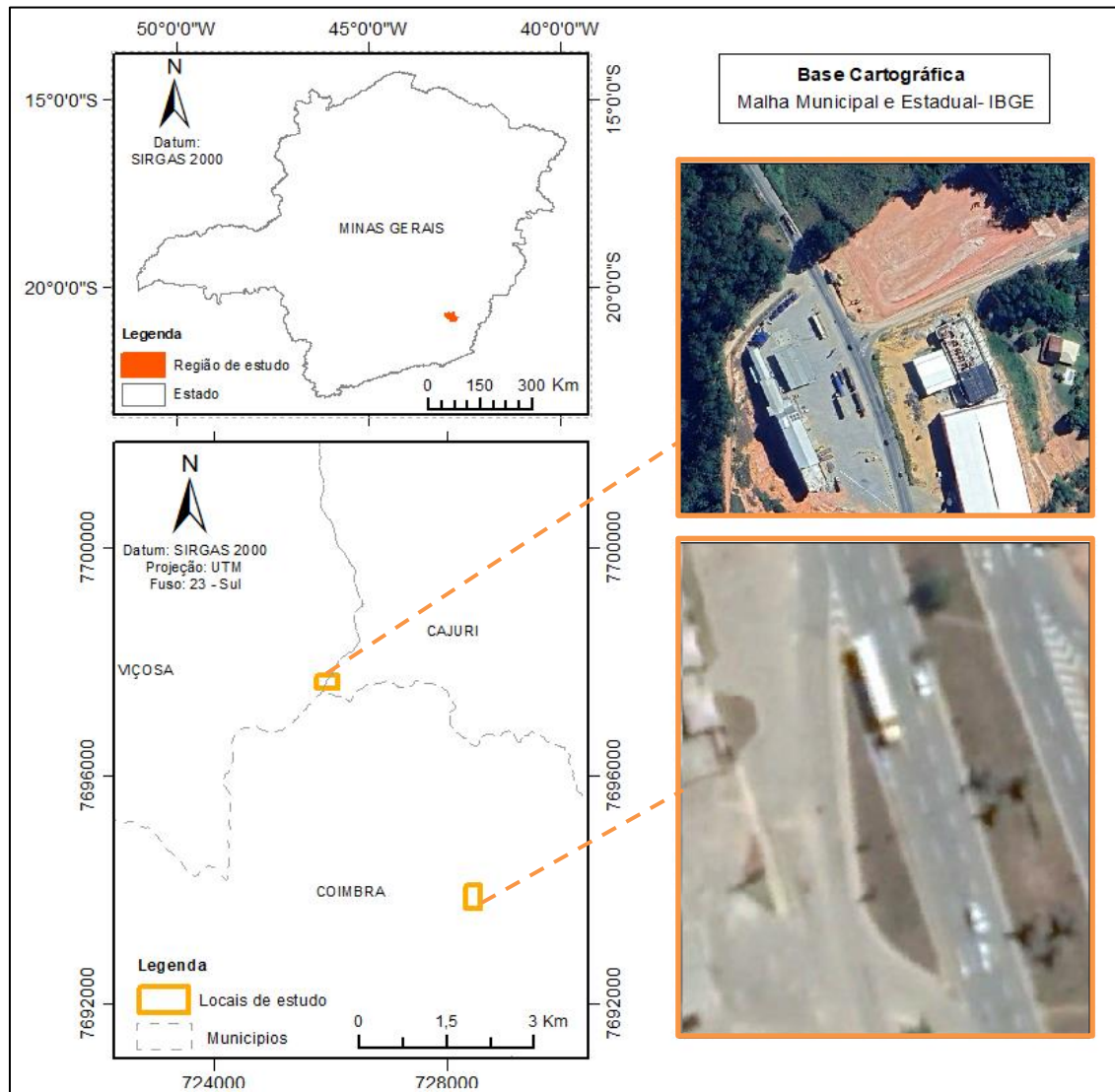
Segundo Geeksforgeeks (2023) é o teste Estatístico de Mann-Whitney é um teste de hipótese estatística não paramétrica usado para analisar a diferença entre duas amostras independentes de dados ordinais. A hipótese nula do teste de Mann-Whitney é que as médias dos grupos são maiores ou iguais, enquanto a hipótese alternativa é que as médias de um grupo são menores que as demais.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 ÁREA DE ESTUDO

A Figura 14 apresenta as áreas de estudo onde foram realizadas as coletas de campo. A área contempla as categorias de alvos adotadas (vegetação rasteira, solo exposto, concreto e material betuminoso). Os locais foram definidos de modo a conter uma área consideravelmente satisfatória de uma mesma categoria e/ou possuir as categorias adjacentes para serem englobados em uma mesma cena.

Figura 14: Mapa de Localização das áreas de estudo.



Fonte: Autoria própria (2023).

4.2 MATERIAIS

Para a realização da presente pesquisa foram utilizados os seguintes equipamentos:

1. Um aquecedor elétrico portátil, para calibrar o sensor em laboratório; Marca: Fix, Informações Técnicas: controlador de temperatura, chapa metálica com pintura preta fosca, antiaderente.
2. Um Termômetro Infravermelho, Marca: *Fluke*, Modelo: *59 MAX*, para medir os dados termais de superfície. A Tabela 2 apresenta as características técnicas do equipamento.

Tabela 2: Especificações Técnicas do Termômetro Infravermelho Termal

| Descrição | Características Técnicas |
|---|---------------------------------|
| Emissividade | 0,10 a 1,00 |
| Faixa Espectral | 8,0 - 14 μ m |
| Faixa de Temperatura | -30°C a 350°C |
| Precisão (para $T \geq 0^\circ\text{C}$) | $\pm 2^\circ\text{C}$ |
| Tempo de Resposta (95% das respostas) | <500ms |
| Relação Distância x Ponto | 8:1 |

Fonte: Fluke Corporation (2013).

3. Uma Câmera termal marca *FLIR*, modelo *C2*, para registrar os dados termais de superfície. A Tabela 3 apresenta as características técnicas do sensor termal do equipamento.

Tabela 3: Especificações Técnicas da Câmera Termal

| Descrição | Características Técnicas |
|------------------------------|---------------------------------|
| Tamanho do Sensor | 80 x 60mm (4.800 pixels) |
| Campo de Visada (FOV) | 41°x 31° |
| Distância Focal | 1,54mm (0,061in.) |
| Resolução Espacial (IFOV) | 11 mrad |
| Sensibilidade Térmica (NETD) | 0,10 K |
| Frequência | 9Hz |
| Dados do Detector | |
| Tipo de Detector | Uncooled microbolometer |
| Faixa Espectral | 7,5 - 14 μ m |
| Tamanho do Pixel | 17 μ m |
| Medição | |
| Faixa de Temperatura | -10°C a 150°C |
| Precisão | $\pm 2^\circ\text{C}$ |

Fonte: FLIR System (2017).

4. RPA, da marca DJI, modelo Phantom 3 Professional, para apoiar o sensor termal e coletar os dados termais;

5. Termohigrômetro, marca Kasvi, modelo K29-5070H, para coletar informações durante o vôo de temperatura. A Tabela 4 apresenta especificações técnicas do termohigrômetro:

Tabela 4: Especificações Técnicas do Termohigrômetro

| Descrição | Características Técnicas |
|--------------------------|--------------------------|
| Faixa de Temperatura | -50°C a 70°C |
| Faixa Medição de Umidade | 20 a 99% |
| Precisão | + 1°C / 5% |

Fonte: Kasvi (2015).

6. Termopar do tipo K, um sensor constituído de dois tipos de metais (Cromel e Alumel), unidos pelas extremidades e revestido de tranças de fio de amianto (resistência térmica). A Tabela 5 apresenta especificações técnicas do sensor, de acordo com o fabricante.

Tabela 5: Especificações Técnicas do Termopar Tipo K

| Descrição | Características Técnicas |
|----------------------|--------------------------------------|
| Faixa de Temperatura | -200°C a 1250°C |
| Precisão | $\pm 2.2^\circ\text{C} / \pm 0.75\%$ |

Fonte: Fabricante (2022).

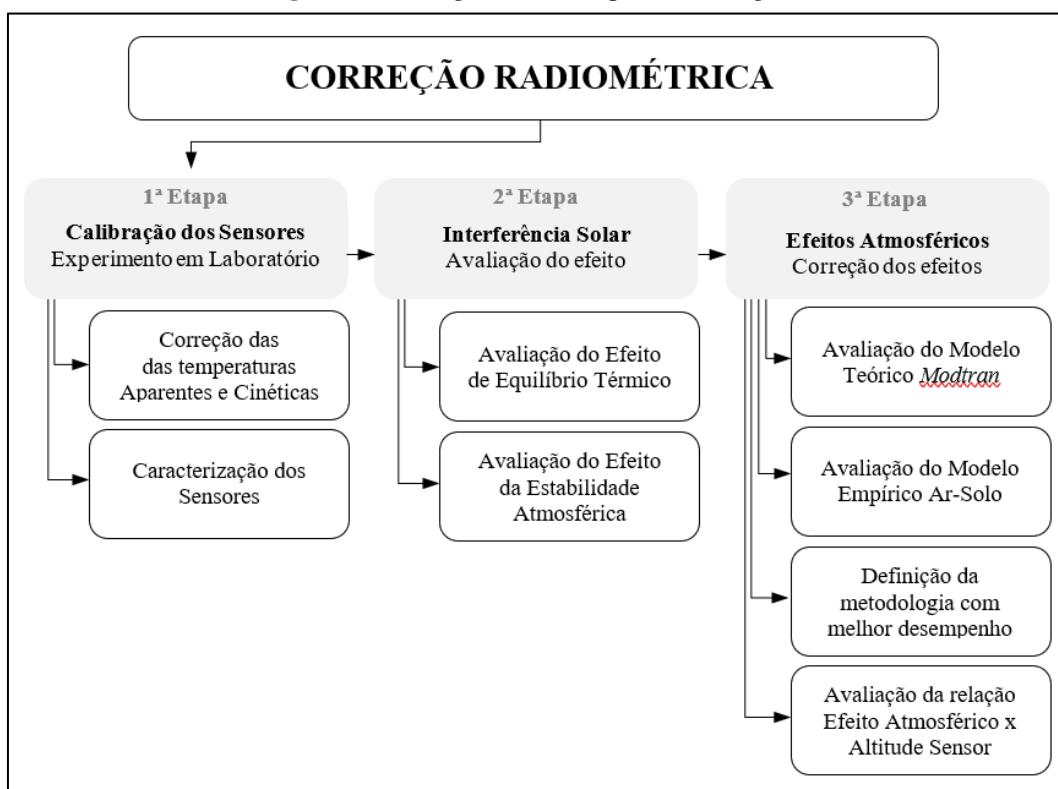
Alguns *softwares* como:

1. *Flir Tools*, para processamento das imagens e extração de informações das imagens;
2. *Modtran* - Interface online, para modelagem atmosférica;
3. *Microsoft Excel*, para cálculos de correções de temperaturas, construção de gráficos e testes estatísticos para análises dos resultados;
4. *Octave*, para conversão de matrizes de temperatura em imagem *raster*;
5. *ArcGIS*, para classificação de imagens *raster*;

4.3 METODOLOGIA

A Figura 15 apresenta um fluxograma com as etapas metodológicas desenvolvidas, que teve como objetivo principal avaliar os dados coletados e desenvolver modelos de melhor desempenho para melhorar a acurácia dos produtos finais.

Figura 15: Fluxograma com etapas metodológicas.

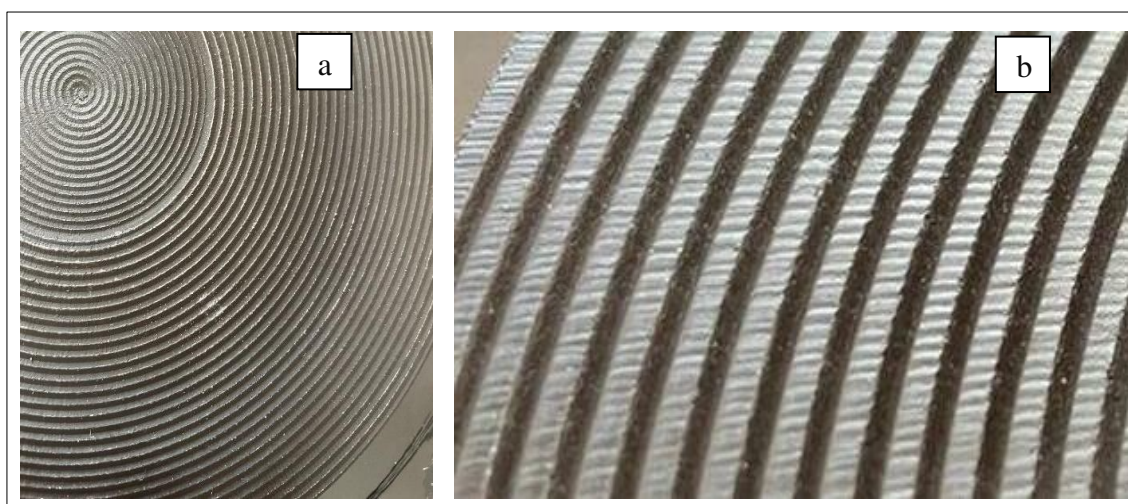


Fonte: Autoria própria (2023).

4.3.1 Calibração dos Sensores

Na primeira etapa, em laboratório, foi utilizado um aquecedor elétrico como um emissor de calor com temperatura monitorada por um termopar. Considerando que o aquecedor possui sua superfície em ferro fundido com pintura preta fosca e superfície rugosa, fatores que aumentam a emissividade ($\varepsilon \cong 0,96$) e o termopar do tipo K possui pequena imprecisão ($\cong 0,75\%$), este arranjo foi denominado Alvo de Referência (AR). A Figura 16 apresenta o detalhe da superfície do AR considerado.

Figura 16: (a) e (b) Detalhamento da superfície do Alvo de Referência

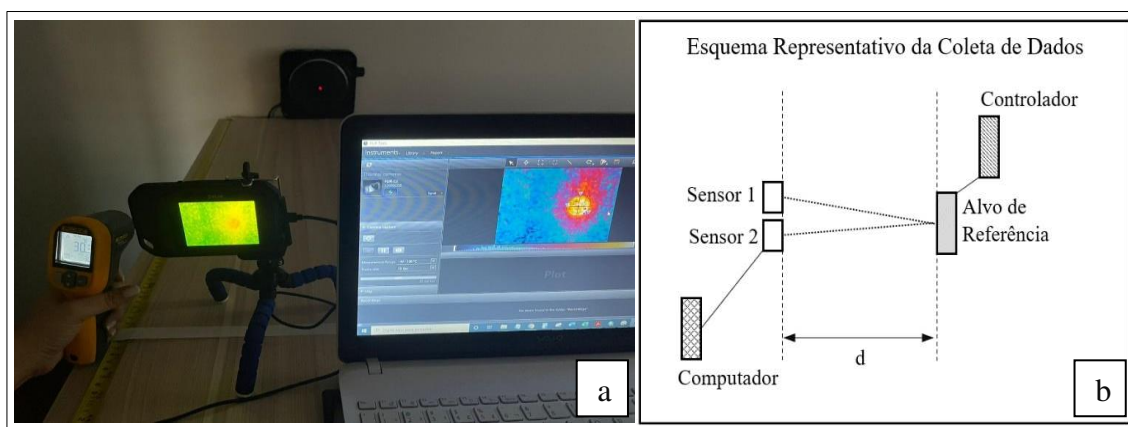


Fonte: Autoria própria (2023).

Dois sensores foram utilizados para medir as temperaturas, o Termômetro Infravermelho (Sensor 1) e a Câmera Termal (Sensor 2), foram considerados o tempo de 5 minutos de calibração da câmera, como indica o fornecedor, testes foram feitos no intervalo de 20 a 100°C, variando de 5 em 5°C.

Foram registrados os dados do Sensor 1 concomitante ao Sensor 2, a uma distância de 1,00 metro do AR para verificar a relação das temperaturas obtidas pelos sensores, através de análises, foram ajustadas equações de comparação entre Sensor 1 e 2. A Figura 17 apresenta o esquema do experimento de laboratório.

Figura 17: (a) Momento do registro dos dados; e (b) Esquema representativo do experimento de laboratório.

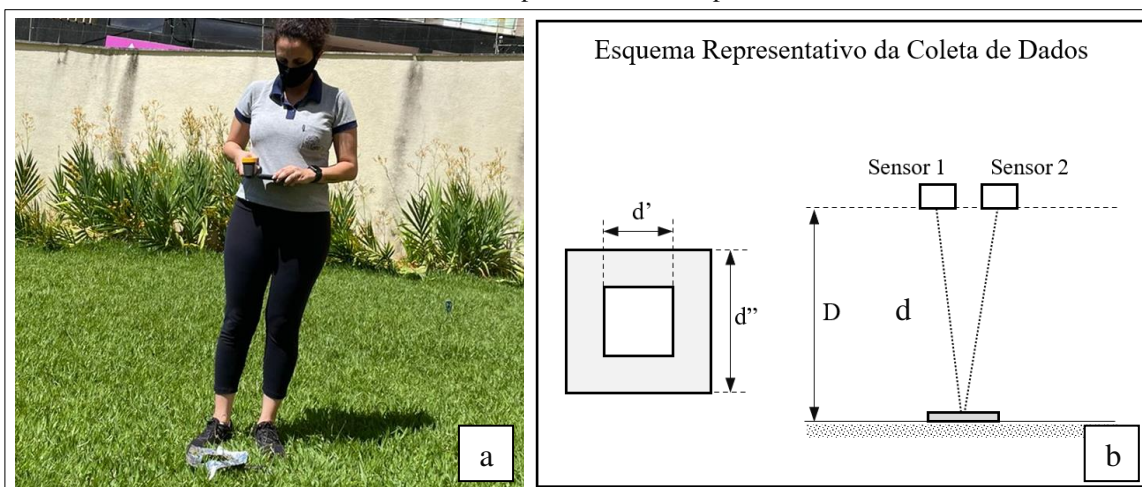


Fonte: Autoria própria (2023).

Para a validação da modelagem, foi feito um levantamento em campo, coletando seis valores de temperatura para cada categoria de alvo concomitantemente: 1) Foi apontado o Sensor 1 para o solo ($d \cong 1,00\text{m}$) para obter um ponto de temperatura e; 2) o Sensor 2 coletou uma imagem do solo ($d \cong 1,00\text{m}$). Os dados fornecidos desta coleta serviram de referência para avaliar o desempenho da equação de calibração gerada anteriormente.

Para que os alvos fossem termoidentificados foram preparados alvos com lâmina de alumínio, pela baixa emissividade ($\varepsilon \cong 0,09$), para conseguir diferenciação relativa na imagem, o alvo possuía uma borda de alumínio e era vazado no interior (largura externa - $d'' \cong 0,25\text{m}$ e abertura interna - $d' \cong 0,15\text{m}$). A Figura 18 apresenta o esquema da identificação dos alvos:

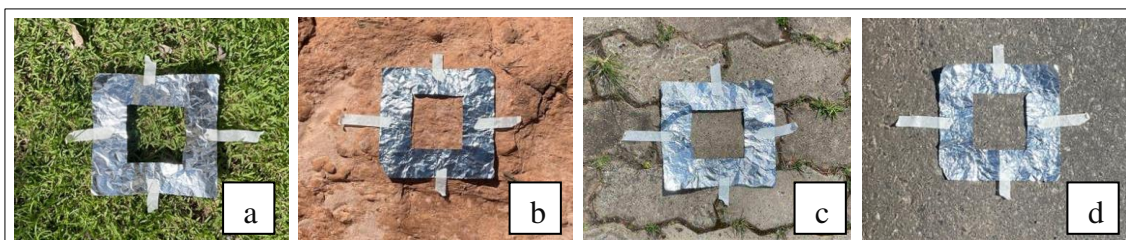
Figura 18: (a) Foto tirada no momento da tomada de foto em campo; (b) Esquema representativo do experimento de campo;



Fonte: Autoria própria (2023).

Os dados consideraram os alvos das categorias vegetação rasteira (grama), solo exposto, concreto (calçamento) e material betuminoso (asfalto). A Figura 19 apresenta as categorias com os alvos termoidentificados.

Figura 19: Delimitação dos alvos: (a) Vegetação rasteira; (b) Solo exposto; (c) Concreto e (d) Material Betuminoso;

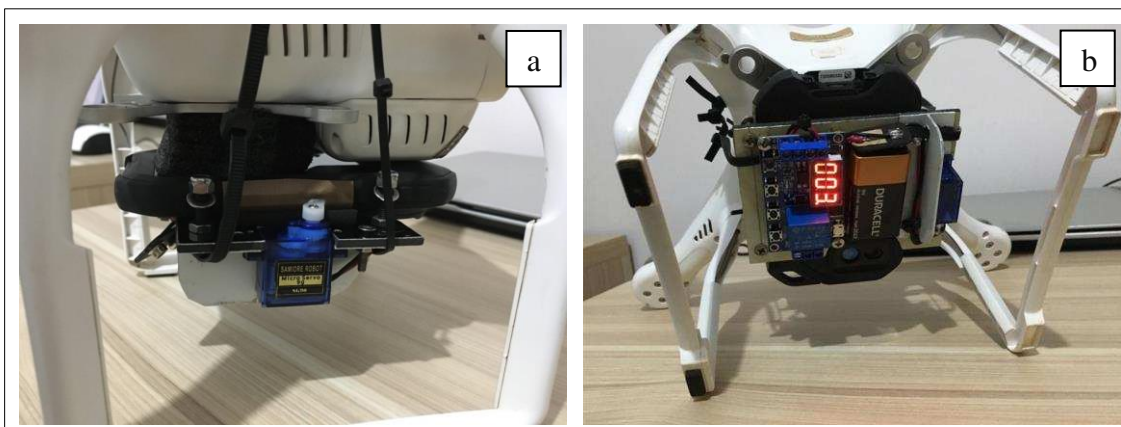


Fonte: Autoria própria (2023).

4.3.2 Interferência Solar

Para a preparação deste estudo, como o Sensor 2 é comercializado como uma “câmera de bolso”, não possui suporte para ser apoiado a um RPA, tanto de maneira física - para acomodação do equipamento, quanto elétrico - para acionamento automático das tomadas de fotos. Portanto, foi adaptado ao RPA um suporte para o sensor com um temporizador do tipo Arduino, alimentado por uma bateria de 9V, na qual acionou o arranjo que pressionava o botão para tirar as fotos em intervalos de tempo pré-estabelecidos, o temporizador foi ajustado para 20”, tempo suficiente para decolar e estabilizar a aeronave. A Figura 20 apresenta o temporizador fixado ao sensor e ao RPA.

Figura 20: Temporizador adaptado ao sensor e RPA (a) Vista lateral e (b) Vista inferior.

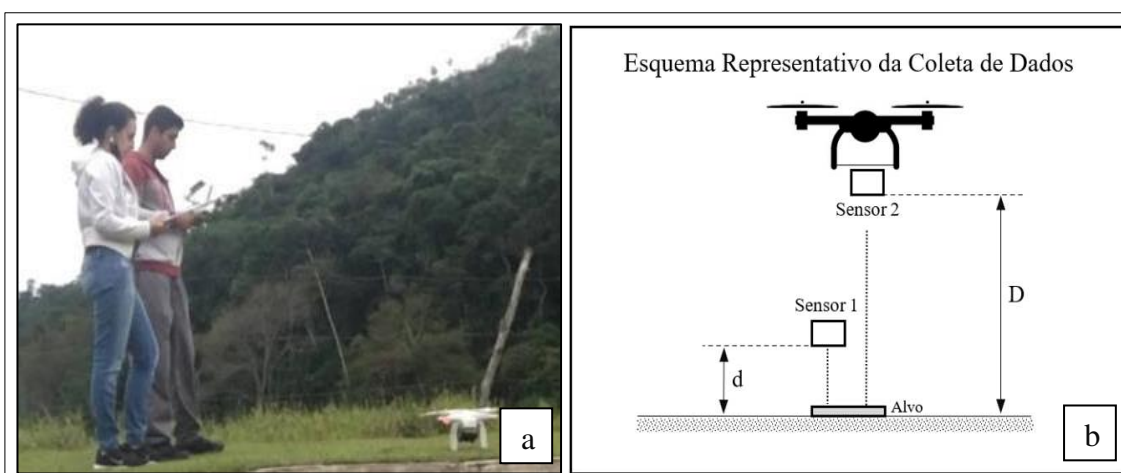


Fonte: Autoria própria (2023).

As coletas de dados foram realizadas em um único dia, porém, em horários distintos (6:00, 14:00 e 22:00h) e foram consideradas quatro categorias: vegetação rasteira, solo exposto, concreto e material betuminoso. As coletas foram feitas individualizadas por categoria e uma coleta geral, para verificar o comportamento de todas as categorias adjacentes.

Utilizando o Sensor 2 foi tomada uma foto ($D \cong 120,00\text{m}$); em processo concomitante foram coletados dados de temperatura do solo com o Sensor 1 ($d \cong 1,00\text{m}$). A Figura 19 apresenta o esquema representativo do estudo:

Figura 21: (a) Foto tirada no momento da tomada de foto em campo e (b) Esquema representativo do experimento de campo.



Fonte: Autoria própria (2023).

Para a marcação dos pontos amostrais, foram colocados alvos em formato de cruz com fitas adesivas de papel (alta emissividade – informações da FLIR *Coporation*) para serem identificadas nas imagens obtidas pelo Sensor 2. Por se tratar de uma imagem termal, é evidente pensar em utilizar marcações que poderiam ser termo identificadas, ou seja, marcações com

emissividade distinta da categoria em estudo, como por exemplo o papel alumínio - com baixa emissividade seria mais adequado, entretanto, devido à altura adotada do Sensor 2 e um GSD equivalente a 1,32m, as temperaturas do alvo poderiam se misturar com as temperaturas do estudo, proporcionando resultados equivocados.

Para tanto, a câmera termal possui uma funcionalidade denominada *FlirMSX (Multi-Spectral Dynamic Imaging)*, ela proporciona detalhes do espectro visível à imagem termal, como detalhes de contorno possibilitando maior clareza para interpretação das imagens termais. O *software FlirTools*, fornecido pelo fabricante, permite a sobreposição das imagens RGB e infravermelho termal, e que os alvos determinados em uma imagem possam ser identificados na mesma posição das outras. Dessa forma, os alvos de fita adesiva foram adotados e para a imagem coletada as 22:00h, onde não era possível fazer associação das imagens RGB e infravermelho termal de maneira visual, os alvos foram transferidos de outras imagens.

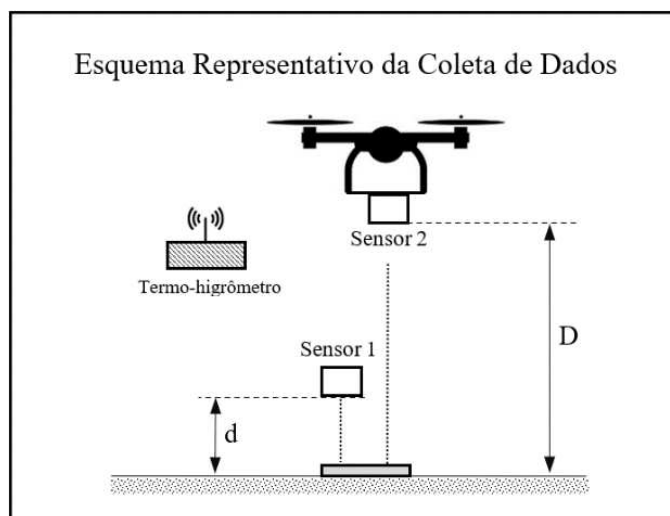
Para as análises, foram utilizadas cenas das categorias individualizadas para verificar o comportamento dos alvos. Ao final das ponderações, foram feitas análises estatísticas para avaliar o desempenho dos melhores horários de coleta.

4.3.3 Correção de Efeitos Atmosféricos

Esta etapa do estudo buscou avaliar o efeito da atmosfera sobre os dados de temperatura de uma imagem utilizando dois modelos de correção frequentemente utilizados, o Modelo Teórico *Modtran* e o Modelo Empírico Correlação Ar-Solo.

Enquanto a modelagem teórica envolve o monitoramento de vários elementos do ambiente, baseado em métodos científicos mais criteriosos, o que pode se tornar uma metodologia mais complexa; uma modelagem empírica se dá por uma metodologia mais simplificada, baseada em experiências ou observações, tornando-se mais viável em situações cotidianas.

No campo foram coletadas informações de temperatura do solo utilizando o Sensor 1 ($d \cong 1,00\text{m}$) e tomada uma foto através do Sensor 2 apoiado a um RPA ($D \cong 120,00\text{m}$), as coletas dos sensores para cada categoria foram realizadas de maneira concomitante. A Figura 22 apresenta o esquema representativo da coleta.

Figura 22: Esquema representativo do experimento de campo.

Fonte: Autoria própria (2023).

Desta forma foram adquiridas informações de temperatura do ar e Visibilidade através de um termo-higrômetro (altura indiferente) e aplicativo de condições atmosféricas locais, respectivamente, para inserir no *Modtran* interface online para a modelagem radiativa.

Além disso, foram distribuídos pontos amostrais (controle/validação) em cada cenário das categorias vegetação rasteira, solo exposto, concreto e material betuminoso. A Tabela 6 apresenta a distribuição dos pontos amostrais para cada categoria.

Tabela 6: Distribuição de pontos amostrais por categoria

| Categoria | Pontos Totais | Pontos de Controle | Pontos de Validação |
|---------------------|----------------------|---------------------------|----------------------------|
| Vegetação Rasteira | 11 | 7 | 4 |
| Solo Exposto | 11 | 7 | 4 |
| Concreto | 13 | 8 | 5 |
| Material Betuminoso | 10 | 6 | 4 |

Fonte: Autoria própria (2023)

Para as análises, foram utilizadas cenas das categorias individualizadas, devido a emissividade ser variável de acordo com o tipo de alvo, foram consideradas emissividade equivalente a 0,97 para vegetação rasteira e 0,95 para concreto, material betuminoso e solo exposto. A Figura 23 apresenta um recorte das categorias consideradas.

Figura 23: (A) Concreto e Material Betuminoso; (b) Solo Exposto e (c) Vegetação Rasteira.



Fonte: Autoria própria (2023)

4.3.3.1 Modelo Teórico Modtran

De posse dos dados coletados das 14:00h, as informações foram inseridas no *software Modtran* interface online para estimar parâmetros para gerar uma modelagem de correção atmosférica, considerando os seguintes dados apresentados na Tabela 7.

Tabela 7: Informações inseridas no *software Modtran*.

| Descrição | Características Técnicas |
|--------------------------|--------------------------|
| Modelo de Atmosfera | Tropical |
| Modelo Aerosol | Rural |
| Visibilidade | 32km |
| Temperatura do Ar | 40,0°C (313K) |
| Albedo | 0,30 |
| Altitude do Sensor | 1km |
| Ângulo Zenital do Sensor | 180° |
| Intervalo Espectral | 7,5 a 14μm |

Fonte: Autoria Própria.

O *Software Modtran* fornece perfis de alguns modelos para o usuário, como o modelo atmosférico, que combina características de localização, temperatura, estação do ano e componentes aerossóis. Segundo recomendações do fabricante NV5 *Geospatial* que utiliza a modelagem *Modtran*, o modelo de atmosfera Tropical é indicado em determinadas situações, como o local estar compreendido entre latitudes -20 e -30° e as coletas realizadas no mês de novembro, que é o caso do estudo atual.

O modelo aerossol está associado a quantidade e qualidade de aerossol próximo ao solo, sendo o modelo Rural utilizado em regiões onde não há atividades industriais e urbanas

significativas, onde o aerossol tipo poeira é o principal componente presente. A visibilidade pode ser ajustada para cada tipo de modelo.

Sendo Albedo a refletividade da superfície, que varia entre 0-1, dependendo do material da superfície, o cálculo da emissão de superfície do solo também depende desse parâmetro (MODTRAN, 2014). Entretanto, como a área imageada é pequena, foi considerado um valor médio de 0,3.

A altitude do sensor foi considerada equivalente a 1 km, por ser a menor altitude permitida, o ângulo zenital do sensor adotado foi de 180° com o intervalo espectral (7,5 a $14\mu\text{m}$) foi fornecido pelo fabricante. Os valores padrão do *software* foram adotados, sendo: Coluna de água = 5.119,4 [atm-cm], Coluna de ozônio = 0,27727 [atm-cm], CO_2 = 400 [ppmv], CO = 0,15 [ppmv], CH_4 = 1,8 [ppmv].

Considerando que o Sensor 1 ficou próximo ao solo, foram desconsiderados os efeitos atmosféricos ($L_{\text{asc}} \cong 0$, $L_{\text{desc}} \cong 0$ e $\tau_r \cong 1$), a correção foi feita somente nos dados coletados do Sensor 2 devido a sua altitude ($L_{\text{asc}} \neq 0$, $L_{\text{desc}} \neq 0$ e $\tau_r \neq 1$).

Os parâmetros estimados diretamente pelo *software Modtran* – Interface Online foram: Radiância Ascendente (L_{asc}) e Transmitância Atmosférica (τ_r). A Radiância Descendente (L_{desc}) é obtida indiretamente, sendo o produto da soma da irradiância solar direta e a irradiância descendente difusa, ponderado pela reflectância do alvo e um fator de transmitância, o valor final foi dividido por π por considerar a superfície lambertiana.

O fabricante da câmera termal forneceu a FRE do sensor, onde foi determinado o intervalo espectral que o sensor é mais sensível aos efeitos atmosféricos utilizando o conceito FWHM. Todos os componentes atmosféricos foram estimados e o fator de correção foi gerado a partir da Equação (22).

Os pontos amostrais foram utilizados como pontos de validação para as correções e foram feitas análises para avaliar o desempenho da metodologia proposta.

4.3.3.2 Modelo Empírico Correlação Ar - Solo

Os dados coletados em campo foram processados e a partir dos pontos de controle foi feita a correlação entre os dados do Sensor 1 e 2, para cada categoria, através de uma Regressão Linear. Assim, uma equação de correção foi gerada e os pontos de validação foram corrigidos. Ao final das correções, foram feitas análises estatísticas para avaliar o desempenho da

metodologia proposta.

4.3.3.3 Avaliação do desempenho das metodologias

A fim de identificar a metodologia com melhor desempenho, as cenas individualizadas por categoria foram convertidas em matrizes de pontos, onde cada célula representa um valor de temperatura (°C). O *software FlirTools* fornecido pelo fabricante faz a conversão da imagem do tipo *raster* em uma matriz de pontos de uma área determinada pelo usuário.

As correções das duas metodologias foram aplicadas separadamente, e com o auxílio do *software Octave*, as matrizes de pontos foram convertidas novamente em imagens do tipo *raster*.

As imagens foram classificadas com o auxílio do *software ArcGis*, para melhor visualização das diferenças de temperaturas. Ao final, foram feitas análises estatísticas para avaliar a metodologia com melhor desempenho.

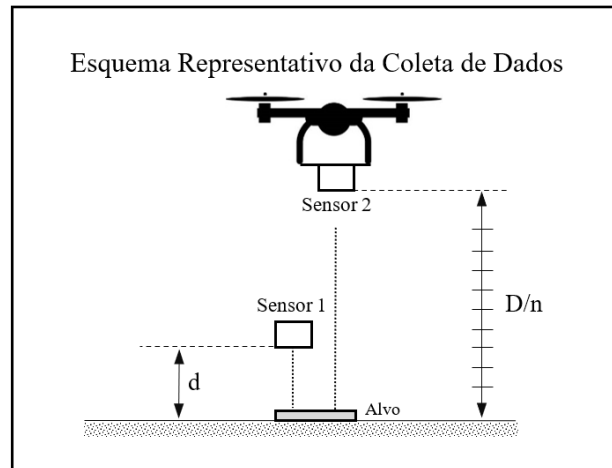
4.3.3.4 Relação Efeito Atmosférico x Altura do Sensor

O efeito atmosférico é mais efetivo em alturas maiores, afetando imagens tomadas a partir de sensores orbitais ou a bordo de aeronaves pilotadas, entretanto, como existem poucos estudos englobando câmeras termais a bordo de RPAs (OLIVEIRA, 2017; ARAGON et al., 2020; KELLY et al., 2019), essa metodologia buscou investigar se existe uma tendência de aumento do efeito atmosférico em relação à altura do sensor.

O intervalo escolhido foi entre 120 e 200m, variando de 20 em 20m, a altura mínima priorizou englobar todos os pontos amostrais, para que as análises fossem feitas sob as mesmas condições climáticas para todos os pontos em determinada altura, quanto a altura máxima considerada, foi o limite de resposta do RPA à central de controle.

Para cada altura ($n \cong 20m$) da tomada da foto com o Sensor 2 a bordo do RPA até a altura limite ($D \cong 120,00$), foram coletadas de maneira concomitante informações de temperatura do solo com o Sensor 1 ($d \cong 1,00m$) para cada tipo de categoria, vegetação rasteira, solo exposto, concreto e material betuminoso. A Figura 24 apresenta o esquema representativo da coleta:

Figura 24: Esquema representativo do experimento de campo.



Fonte: Autoria própria (2023)

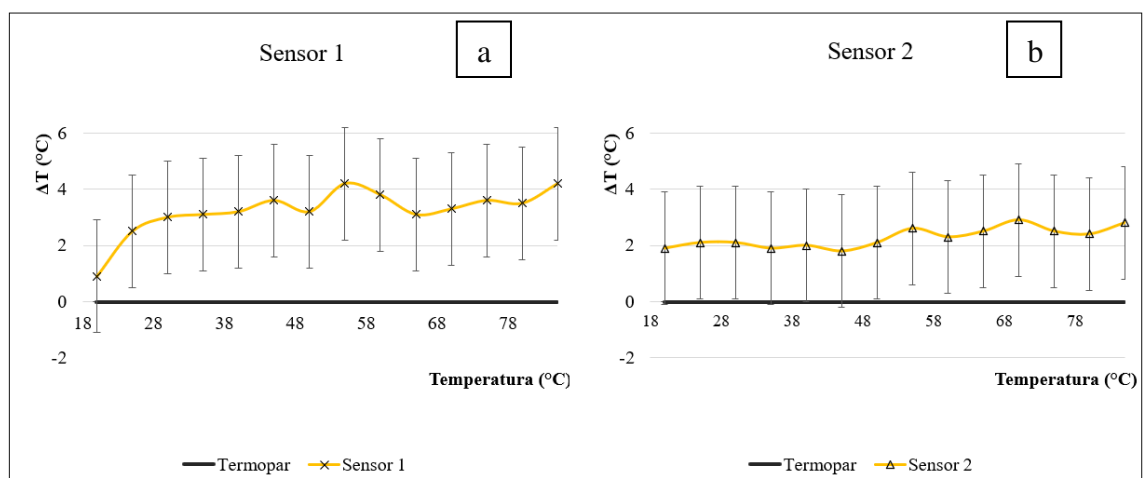
Os dados coletados foram processados e investigado se existia alguma tendência de aumento do efeito atmosférico com o aumento da altura. Ao final, foram feitas análises estatísticas para avaliar os resultados encontrados.

5 RESULTADOS E ANÁLISES

5.1 CALIBRAÇÃO DOS SENSORES

A partir das coletas realizadas pelos sensores 1 e 2, foi feita a caracterização radiométrica dos mesmos, tendo como referência o AR (AR – Sensor). Segundo os fabricantes, existe uma incerteza de $\pm 2^\circ\text{C}$ para ambos os equipamentos, a Figura 25 apresenta os gráficos das discrepâncias encontradas.

Figura 25: Gráfico de Discrepâncias – (a) Sensor 1 e (b) Sensor 2.



Fonte: Autoria própria (2023)

Observa-se que o Sensor 1 apresentou diferenças entre 0,90 a 4,20 $^\circ\text{C}$, e quase 93% das

amostras estavam fora da incerteza prevista pelo fabricante. O Sensor 2 apresentou diferenças entre 1,90 a 2,90°C, e quase 86% das amostras estavam fora da incerteza prevista pelo fabricante.

Considerando que no arranjo AR o termopar do tipo K obteve a temperatura através de contato (cinética) com a superfície e os sensores 1 e 2 obtiveram a temperatura aparente, sendo influenciada pela temperatura do meio, de acordo com a equação Equação 14, as discrepâncias foram minimizadas corrigindo as temperaturas aparentes pelo fator de emissividade do AR, equiparando as medidas dos três sensores.

Como o termopar do tipo K possui baixa incerteza segundo o fabricante, será desconsiderada neste estudo, assim, os valores de temperatura obtidos pelos sensores foram corrigidos somente estimando a emissividade média do condutor de calor, considerando o tipo de material (ferro fundido), cobertura (tinta opaca) e rugosidade da placa ($\varepsilon \cong 0,96$). A Tabela 8 apresenta os valores de temperatura cinética (T_{cin}) do termopar, temperatura aparente (T_{ap}) e temperatura corrigida (T_{corr}) dos sensores 1 e 2.

Tabela 8: Temperaturas cinéticas, aparentes e corrigidas (°C)

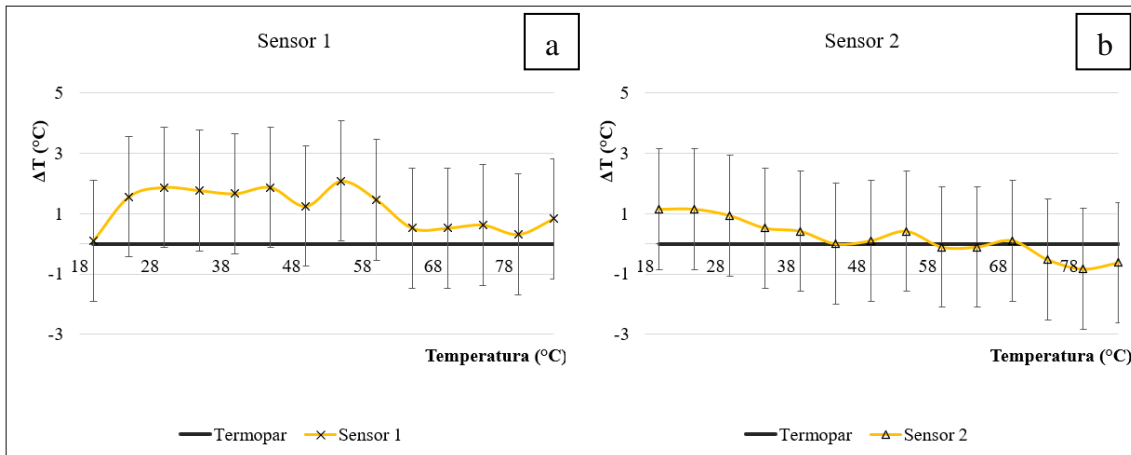
| Termopar | Sensor 1 | | | | Sensor 2 | | | |
|----------|----------|------------|--------------------|----------------------|----------|------------|--------------------|----------------------|
| | T_{ap} | T_{corr} | $T_{cin} - T_{ap}$ | $T_{cin} - T_{corr}$ | T_{ap} | T_{corr} | $T_{cin} - T_{ap}$ | $T_{cin} - T_{corr}$ |
| 85,00 | 80,80 | 84,17 | 4,20 | 0,83 | 82,20 | 85,63 | 2,80 | -0,63 |
| 80,00 | 76,50 | 79,69 | 3,50 | 0,31 | 77,60 | 80,83 | 2,40 | -0,83 |
| 75,00 | 71,40 | 74,38 | 3,60 | 0,62 | 72,50 | 75,52 | 2,50 | -0,52 |
| 70,00 | 66,70 | 69,48 | 3,30 | 0,52 | 67,10 | 69,90 | 2,90 | 0,10 |
| 65,00 | 61,90 | 64,48 | 3,10 | 0,52 | 62,50 | 65,10 | 2,50 | -0,10 |
| 60,00 | 56,20 | 58,54 | 3,80 | 1,46 | 57,70 | 60,10 | 2,30 | -0,10 |
| 55,00 | 50,80 | 52,92 | 4,20 | 2,08 | 52,40 | 54,58 | 2,60 | 0,42 |
| 50,00 | 46,80 | 48,75 | 3,20 | 1,25 | 47,90 | 49,90 | 2,10 | 0,10 |
| 45,00 | 41,40 | 43,13 | 3,60 | 1,88 | 43,20 | 45,00 | 1,80 | 0,00 |
| 40,00 | 36,80 | 38,33 | 3,20 | 1,67 | 38,00 | 39,58 | 2,00 | 0,42 |
| 35,00 | 31,90 | 33,23 | 3,10 | 1,77 | 33,10 | 34,48 | 1,90 | 0,52 |
| 30,00 | 27,00 | 28,13 | 3,00 | 1,88 | 27,90 | 29,06 | 2,10 | 0,94 |
| 25,00 | 22,50 | 23,44 | 2,50 | 1,56 | 22,90 | 23,85 | 2,10 | 1,15 |
| 20,00 | 19,10 | 19,90 | 0,90 | 0,10 | 18,10 | 18,85 | 1,90 | 1,15 |

Fonte: Autoria própria (2023)

Observa-se que após correção o Sensor 1 apresentou diferenças entre 0,10 a 2,08°C, e apenas uma amostra está fora da incerteza prevista pelo fabricante. O Sensor 2 apresentou diferenças entre -0,10 a 1,15°C, e nenhuma das amostras está fora da incerteza prevista pelo fabricante. Ainda, levando-se em consideração temperaturas variando entre 20 e 40°C, que são temperaturas do ar mais comuns para a região, tem-se 100% das amostras dos sensores 1 e 2 dentro da incerteza prevista pelos fabricantes, portanto, considera-se os sensores adequados para realização do presente estudo. A Figura 26 apresenta os gráficos das discrepâncias

ajustadas.

Figura 26: Gráfico de Discrepâncias – (a) Sensor 1 e (b) Sensor 2.

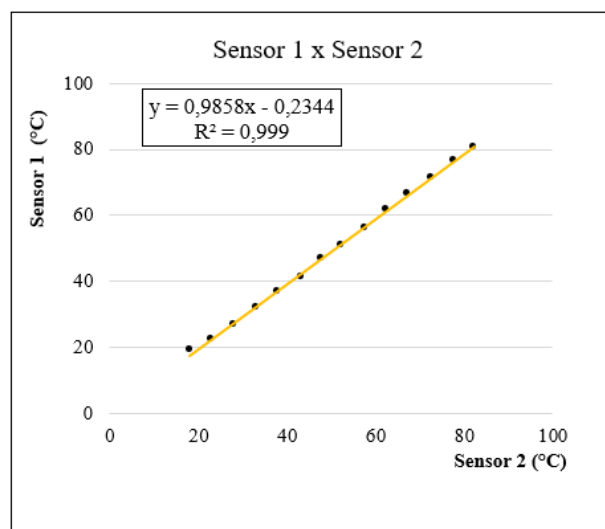


Fonte: Autoria própria (2023)

Foi feita a caracterização do Sensor 1 em função do Sensor 2, já que o Sensor 1 foi considerado como referência em estudos de campo

Através do Gráfico de Dispersão foi feita a relação dos dados de temperatura dos sensores 1 e 2, onde foi verificada uma alta correlação (0,999), indicando uma correlação linear positiva. Assim, através da regressão linear foi ajustada uma linha de tendência definida por uma equação, onde o coeficiente de determinação (R^2) equivalente a 0,999 aponta que 99,9% da variabilidade das temperaturas pode ser explicada através deste modelo construído. A Figura 27 apresenta o gráfico de dispersão.

Figura 27: Gráfico de Dispersão.



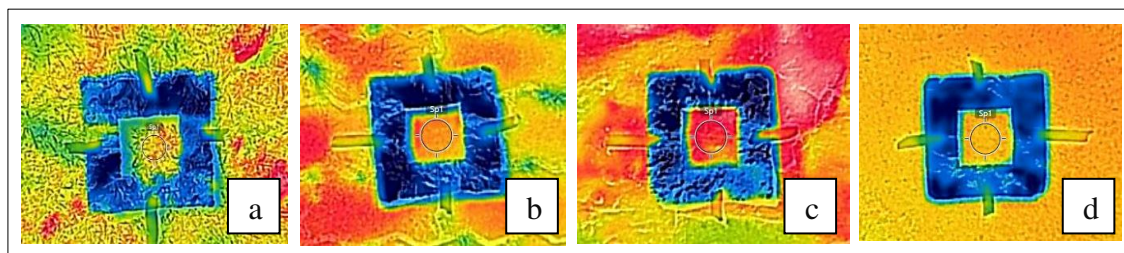
Fonte: Autoria própria (2023)

Para esta análise utilizou-se as temperaturas aparentes e não as corrigidas, em virtude das temperaturas dos sensores 1 e 2 serem ponderadas pelo mesmo fator de emissividade do

alvo, ainda, nos estudos posteriores foram consideradas as mesmas grandezas para comparar os sensores 1 e 2, portanto, para fins comparativos dos sensores as temperaturas aparentes serão adotadas.

Para a aplicação em campo, foram coletados seis valores de temperatura para cada categoria a fim de validar a equação de regressão linear obtida no experimento de laboratório. A Figura 28 apresenta as imagens termais dos alvos com o efeito *FlirMSX*.

Figura 28: Imagens termais dos alvos com o efeito *FlirMSX*: (a) Vegetação rasteira; (b) Solo exposto; (c) Concreto e (d) Material Betuminoso



Fonte: Autoria própria (2023)

Para a validação dos dados, foram calculados valores de temperatura do Sensor 1 em função do Sensor 2, utilizando a equação de regressão linear. Assim, observou-se que 58% das discrepâncias entre as temperaturas calculadas e aparentes do Sensor 1 eram menores de 0,50°C, 21% estavam compreendidos no intervalo de 0,50 a 1,00°C, e 13% apresentavam discrepâncias superiores a 1,00°C. A Tabela 9 apresenta os valores coletados em campo:

Tabela 9: Temperaturas coletadas em campo (°C)

| Sensores | Vegetação | Solo Exposto | Concreto | Material Betuminoso |
|----------|-----------|--------------|----------|---------------------|
| 1 | 36,70 | 34,10 | 39,00 | 36,50 |
| | 36,50 | 36,00 | 50,70 | 57,30 |
| | 36,70 | 42,30 | 45,40 | 51,50 |
| | 36,60 | 36,50 | 38,50 | 50,20 |
| | 36,80 | 37,20 | 39,30 | 49,30 |
| | 36,80 | 40,20 | 40,20 | 38,30 |
| 2 | 37,30 | 35,10 | 40,50 | 38,40 |
| | 38,30 | 38,00 | 52,00 | 58,70 |
| | 38,00 | 44,20 | 46,80 | 53,10 |
| | 37,20 | 38,20 | 40,00 | 51,00 |
| | 37,80 | 39,10 | 39,80 | 50,60 |
| | 38,00 | 41,50 | 41,10 | 39,80 |

Fonte: Autoria própria (2023)

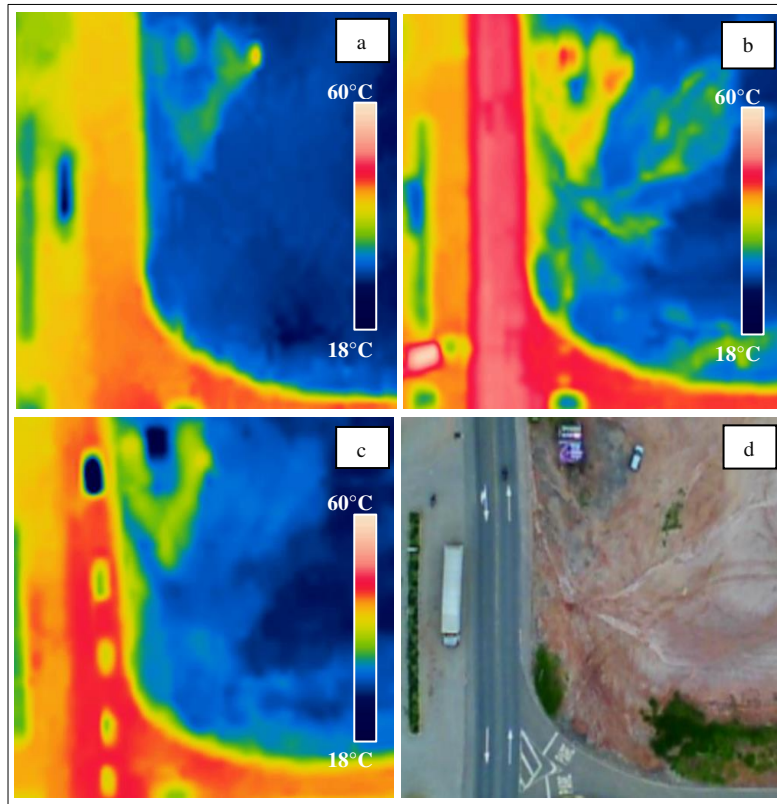
Portanto, considerando a imprecisão de $\pm 2^\circ\text{C}$ do equipamento, os valores foram considerados adequados, validando a equação obtida no experimento de Calibração Interna.

5.2 INTERFERÊNCIA SOLAR

A partir da coleta dos dados em horários distintos ao longo do dia, foram obtidas imagens termais. A Figura 29 apresenta as imagens termais e composição RGB321 – Cor

verdadeira para os horários das 6:00, 14:00 e 22:00h.

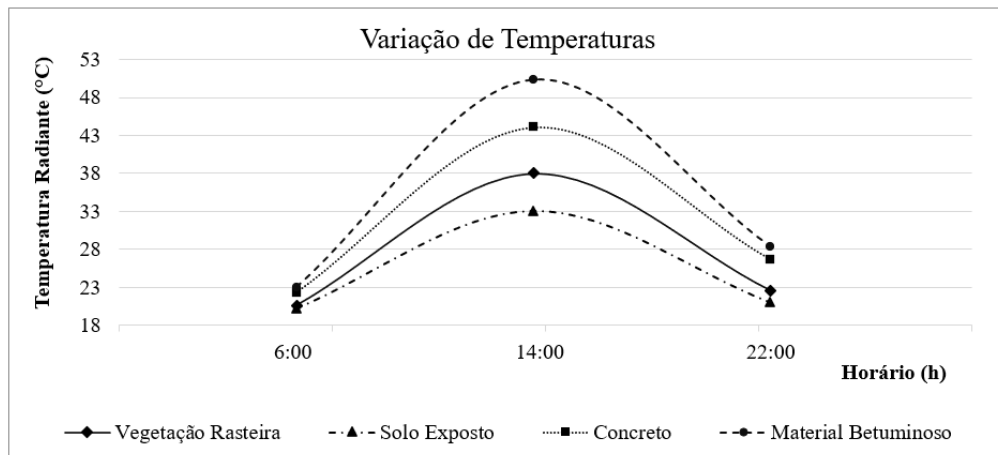
Figura 29: Imagens termais (a) 6:00h; (b) 14: 00h; (c) 22:00h e (d) Imagem RGB321.



Fonte: Autoria própria (2023)

Ao analisar as imagens, é possível observar uma variação nas temperaturas entre as categorias nos horários propostos. A Figura 30 apresenta os gráficos com os dados de temperatura média para cada categoria coletados pelo Sensor 1.

Figura 30: Gráfico com a variação de temperatura entre os alvos e horários.



Fonte: Autoria própria

Maior parte das ondas curtas da energia que incide sobre o solo são refletidas de volta

para a atmosfera e uma parte é absorvida pela superfície, aonde retorna para a atmosfera em comprimentos de onda maiores, na faixa do Infravermelho Termal. A superfície terrestre recebe a energia radiante do sol, de modo geral, entre os horários de aproximadamente 6:00 as 18:00h, porém, segundo Jensen (2009), existe um deslocamento de duas a quatro horas após o pico de meio dia de radiação incidente de ondas curtas para que a superfície comece emitir a radiação de ondas longas para a atmosfera, devido ao tempo para aquecimento do solo. Isso explica as temperaturas mais altas dos elementos no período das 14:00h.

Ao decorrer do dia, após o meio-dia, a energia irradiada pelo sol tende a diminuir e conseqüentemente, menor a energia refletida e absorvida pelo solo, diante disso, observa-se que a temperatura dos elementos nos horários das 22:00 e 6:00h estão em maior equilíbrio quando comparado ao horário das 14:00h.

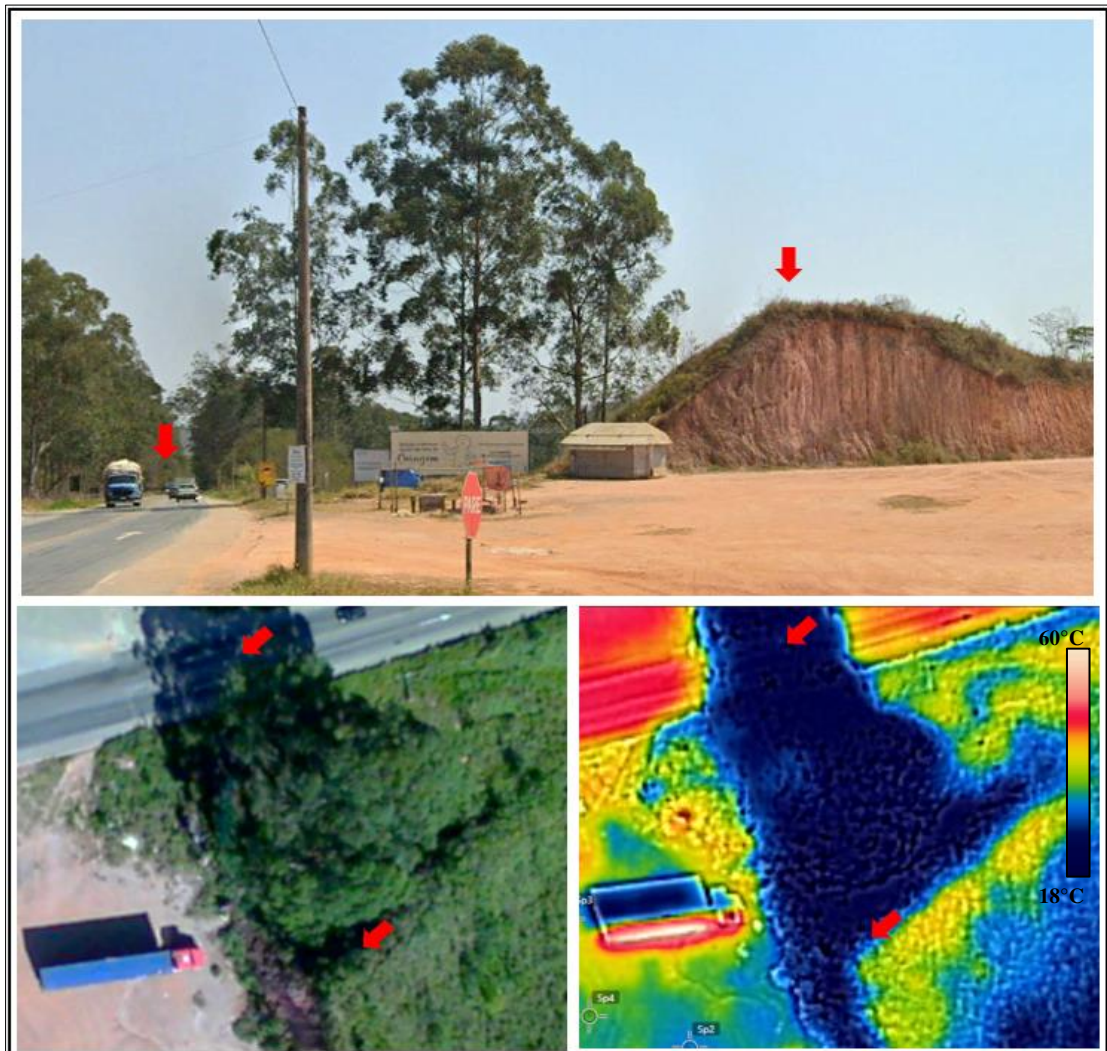
Contudo, ainda existe maior discrepância entre as temperaturas dos elementos as 22:00h quando comparado ao horário das 6:00h, isso ocorre porque ao anoitecer os elementos começam a dissipar o calor para outros elementos e o meio, o que sugere uma tendência a um equilíbrio térmico, o tempo necessário para isso é interrompido pelo nascer do sol, próximo as 6:00h, onde todo o processo volta a se repetir.

Para uma melhor avaliação os dados das 6:00, 14:00 e 22:00h foram submetidos ao teste estatístico de Mann-Whitney (teste não paramétrico que compara médias), onde foram feitas duas análises: a verificação de amplitude das temperaturas de todas as categorias entre os horários de 6:00 e 14:00h e entre os horários de 6:00 e 22:00h, considerando a hipótese nula sendo a amplitude das temperaturas do horário das 6:00h maior ou igual que a amplitude das temperaturas do horário das 14:00h/22:00h ($H_0: \Delta_{6:00} \geq \Delta_{14:00/22:00h}$) e a hipótese alternativa sendo a amplitude das temperaturas do horário das 6:00h menor que a amplitude das temperaturas do horário das 14:00h/22:00h ($H_1: \Delta_{6:00} < \Delta_{14:00/22:00h}$), para um nível de significância de 95% o *p-value* para todas categorias $< 0,05$, ou seja, rejeita-se a hipótese nula e admite que a discrepância dos dados das 6:00h é menor que as discrepâncias dos dados das 14:00 e 22:00h.

Associando aos princípios abordados neste trabalho, é coerente adotar o horário para coleta próximo ao sol nascente, tendo em vista que neste horário o elemento já absorveu o máximo de energia radiante do sol e já dissipou o calor para os elementos adjacentes, tendenciando a um equilíbrio térmico. Outra consideração relevante é que até o nascer do sol a reflectância para a atmosfera é mínima ou nula, potencializando a emissividade do elemento.

Os resultados dessa análise apresentam a importância do equilíbrio térmico entre os elementos do terreno, tendo em vista que ao se pesquisar temperaturas absolutas de uma superfície, todos os elementos devem estar expostos sob as mesmas condições, ou seja, sem efeitos externos. Exemplificando, ao se estudar fenômenos envolvendo temperaturas absolutas de solo ou culturas, as variações encontradas devem ser oriundas das diferenças de emissividade, teor de água na superfície, etc. Se as coletas dessas temperaturas forem em momentos em que sombras podem interferir no processo, o fator externo “posição do sol” irá provocar alteração nos resultados. A Figura 31 apresenta exemplos de variações de temperatura de elementos que deveriam ter o mesmo comportamento.

Figura 31: Variações de temperatura de elementos que deveriam ter o mesmo comportamento



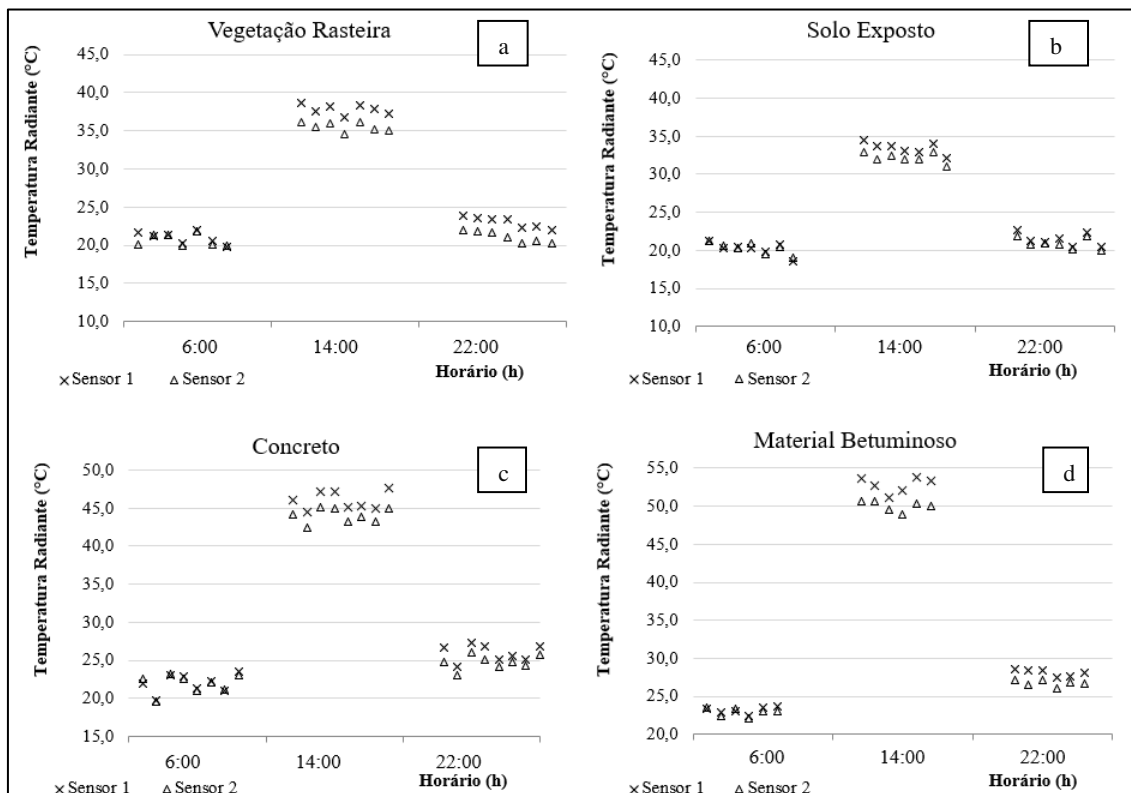
Fonte: Autoria própria (2023)

Em uma coleta de campo após o meio-dia foi observada uma situação em que o efeito da posição do sol gerou uma sombra de uma árvore, alterando o comportamento das temperaturas de um trecho da rodovia (material betuminoso) e no relevo, em que a lateral onde

a exposição ao sol é eminente a temperatura é maior que a temperatura na lateral em que não está exposta ao sol. A consequência da obstrução da luz incidente direta acarreta discrepâncias nas temperaturas que só serão minimizadas após algumas horas.

Para comparar as discrepâncias entre as temperaturas coletadas pelos sensores 1 e 2, em campo utilizando o Sensor 2 foi tomada uma foto ($D \cong 120,00m$) e em processo concomitante foram coletados dados de temperatura dos pontos amostrais com o Sensor 1 ($d \cong 1,00m$). O Sensor 1 é considerado o sensor de referência por ser próximo ao solo e os efeitos atmosféricos foram considerados insignificantes. A Figura 31 apresenta a discrepância entre as temperaturas para cada categoria de alvo, coletadas pelos Sensores 1 e 2 nos horários de 6:00, 14:00 e 22:00h.

Figura 32: Gráfico com a variação de temperatura de cada alvo para diferentes horários. (a) Vegetação rasteira; (b) Solo exposto; (c) Concreto e (d) Material Betuminoso



Fonte: Autoria própria (2023)

Observa-se que a maioria das temperaturas coletadas pelo Sensor 2 são menores que as temperaturas coletadas pelo Sensor 1, independente do horário, o que demonstra uma absorção da radiação emitida pela superfície até a chegada no Sensor 2, ou seja, as temperaturas obtidas pelo Sensor 2 estão sob efeitos atmosféricos.

A discrepância média das temperaturas entre os sensores 1 e 2 para todas as categorias no horário das 6:00h foi de $0,34^{\circ}C$, no horário das 14:00h foi de $1,98^{\circ}C$ e no horário das 22:00h

foi de 1,23°C. Avaliando as discrepâncias, pode-se presumir que os efeitos atmosféricos são menos efetivos no horário das 6:00h.

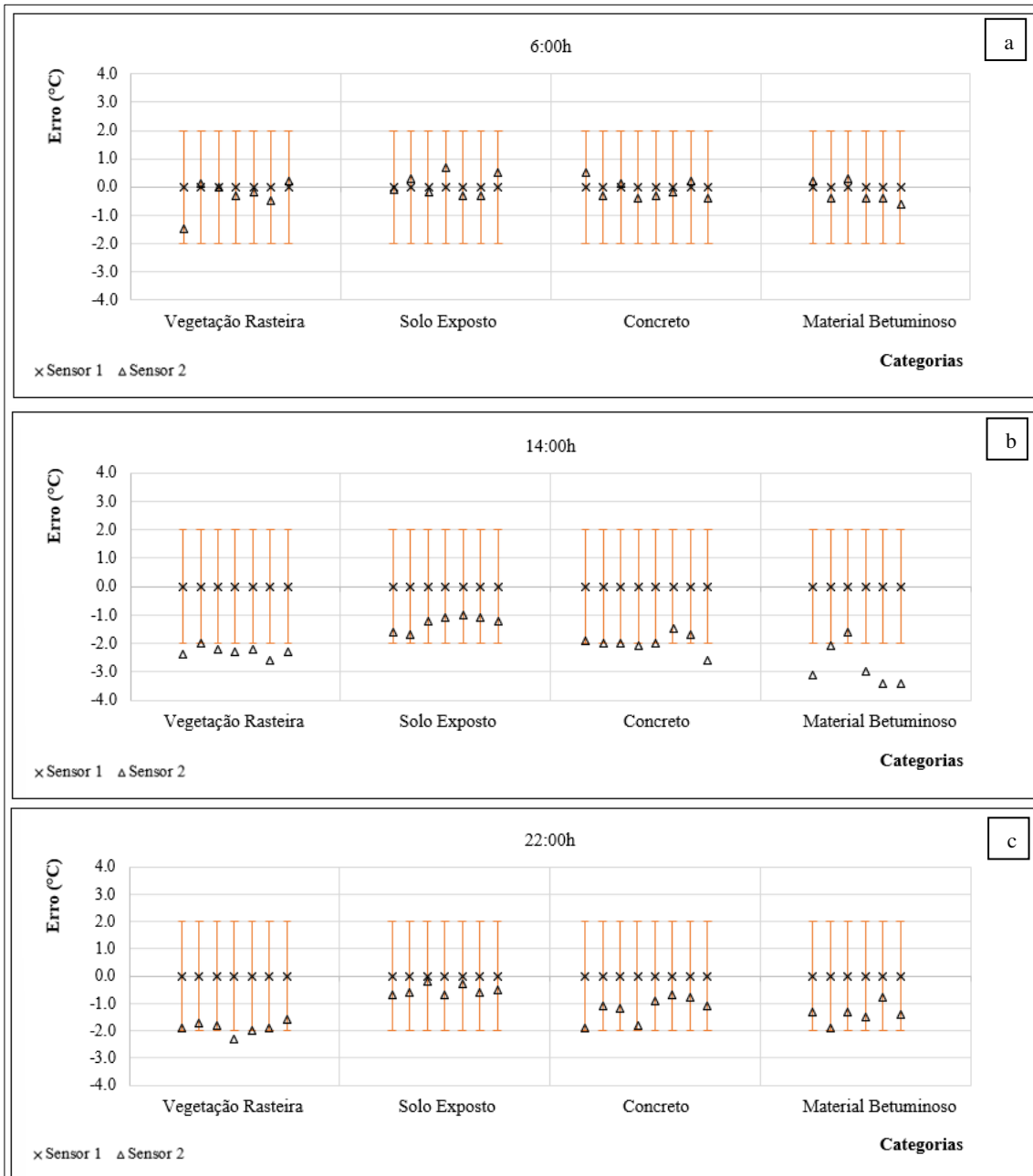
Ao analisar alguns fatores envolvidos no processo da radiação emitida pelo solo, pode-se fazer algumas considerações: Após o pôr do sol a temperatura cai e a umidade pode atingir o ponto de orvalho, ou seja, partículas de H₂O tem efeito de absorção da radiação emitida pela superfície, atenuando a temperatura que chega ao Sensor 2, assim, esse fator contradiz a menor efetividade dos efeitos atmosféricos pela manhã.

Entretanto, deve-se levar em consideração que o teor de água na atmosfera é aproximadamente 0,40% e aumenta conforme altitude crescente, próximo a superfície a umidade pode variar de 0 a 4%, sendo 0% em dias secos e 4%, quando a umidade atinge seu ponto de saturação e ocorre a precipitação. Ou seja, ainda que a umidade relativa estivesse alta, o componente vapor d'água representa um valor pequeno na atmosfera.

Ainda, existe outro fator que deve ser levado em consideração, que é o processo da convecção, ou seja, após o meio-dia, a temperatura da superfície está mais aquecida que a temperatura da atmosfera ($T_{sup} > T_{atm}$), ou, após o pôr do sol, com o processo de resfriamento da superfície a atmosfera acima está mais aquecida ($T_{sup} < T_{atm}$), essa diferença nas temperaturas iniciam um movimento vertical de troca de calor, que promove uma turbulência atmosférica.

Esse processo de ventilação da atmosfera promove uma redução da concentração de componentes aerossóis, como a poeira - principal componente. Portanto, ao amanhecer, quando as temperaturas da atmosfera e da superfície estão em maior equilíbrio, existe uma estabilidade atmosférica e menor concentração dos componentes aerossóis, comprometendo menos a radiação emitida pela superfície que chega até o Sensor 2.

A Figura 32 apresenta as discrepâncias dos 28 pontos amostrais entre os sensores 1 e 2 dos diferentes horários de coleta, levando em consideração a imprecisão do Sensor 2 de $\pm 2^\circ\text{C}$, fornecido pelo fabricante.

Figura 33: Gráfico de Discrepâncias (a) 6:00h; (b) 14:00h e (c) 22:00h

Fonte: Autoria própria (2023)

O horário das 14:00h apresentou as maiores discrepâncias, sendo 46,43% das amostras com discrepância maiores que 2°C, 53,57% das amostras com discrepâncias variando entre 1 e 2°C, e nenhuma amostra com discrepância menor que 1°C. Já o horário das 22:00h apresentou apenas 1 amostra com discrepância maior que 2°C, 57,14% das amostras com discrepâncias variando entre 1 e 2°C, e 39,29% das amostras com discrepância menor que 1°C. O horário das 6:00h foi o que apresentou melhores resultados, com 1 amostra com discrepância variando entre 1 e 2°C, 96,43% das amostras com discrepâncias menores que 1°C, nenhuma amostra apresentou discrepância acima de 2°C.

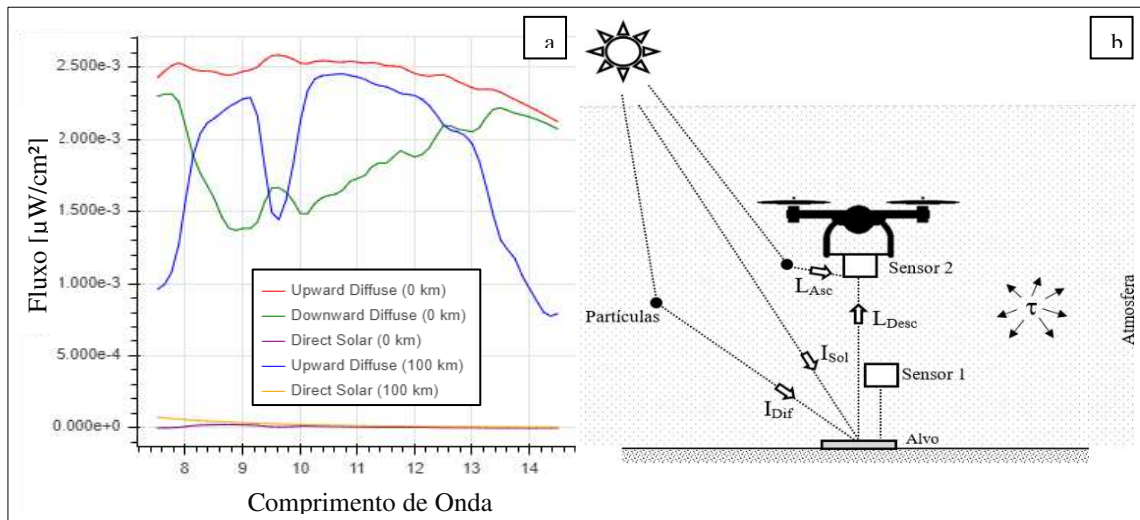
Por fim, observou-se que a coleta dos dados no horário das 6:00h apresentou melhores resultados, tanto na análise da interferência solar em elementos adjacentes quanto na relação dos sensores 1 e 2.

5.3 CORREÇÃO DE EFEITOS ATMOSFÉRICOS

5.3.1 Modelo Teórico *Modtran*

Após fornecer os dados para o *software Modtran - Interface Online*, foram gerados os fluxos de radiância no intervalo espectral pré-determinado, a Figura 34 (a) apresenta o gráfico com os fluxos gerados e 34 (b) apresenta um esquema representativo dos componentes atmosféricos considerados neste estudo.

Figura 34: a) gráfico com os fluxos gerados pelo Modtran; b) Esquema representativo dos componentes atmosféricos considerados neste estudo



Fonte: Autoria Própria (2023).

Segundo Basener & Basener (2023) o *Direct Solar* (100 km) é a irradiância solar medida na altura do topo da atmosfera e o *Direct Solar* (0 km) é a irradiância solar medida na altura da superfície, ponderada pela transmitância. O *Downward Diffuse* (0 km) é a irradiância descendente difusa que atinge a superfície após a dispersão na atmosfera, a *Upward Diffuse* (100 km) é a irradiância ascendente medida no topo da atmosfera, responsável pelo espalhamento atmosférico e *Upward Diffuse* (0 km) é a emitância emitida pela superfície de um corpo negro. Todos os fluxos são dados com unidade de $[\mu\text{W}/\text{cm}^2]$.

A Radiância Ascendente (L_{asc}) é igual ao *Upward Diffuse* (100 km), podendo considerar a unidade como $[\mu\text{W}/\text{cm}^2 \cdot \text{sr}]$, já que a superfície das partículas suspensas na atmosfera é considerada isotrópica, ou seja, mantém todas as propriedades independente da direção.

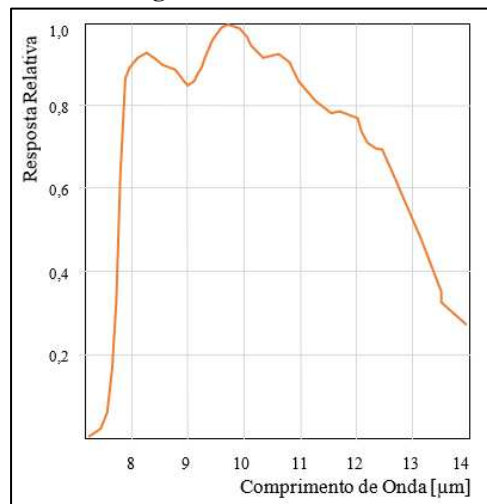
A Radiância Descendente (L_{desc}) que é dada pela soma da radiância emitida e refletida pela superfície, onde a exitância emitida é dada pela *Upward Diffuse* (0 km) ponderada pela emissividade do alvo, e a exitância refletida é dada pela soma do *Direct Solar* (0 km) e *Downward Diffuse* (0 km) ponderados pela reflectância do alvo. A exitância emitida do corpo negro possui unidade [$\mu\text{W}/\text{cm}^2 \cdot \text{sr}$], já que a superfície do corpo negro é considerada isotrópica, já a radiância refletida é dada pela exitância refletida dividida por π , considerando a superfície Lambertiana.

A Transmitância Atmosférica (τ_r) é um fator de ponderação da Radiância Descendente, porém, o *software Modtran - Interface Online* fornece as irradiâncias (0 km) já corrigidas, portanto, para esse estudo a Transmitância Atmosférica foi considerada igual a 1.

A unidade usual para radiância é dada por [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{sr}$], portanto, para cálculo de correção dos efeitos atmosféricos, os valores apresentados pelo *software* foram convertidos para unidade usual multiplicando-os pelo fator de escala equivalente ao valor 100.

Ainda, o *software Modtran - Interface Online* apresenta os fluxos para todo o intervalo espectral solicitado, sendo necessário verificar ponderar pela FRE do Sensor 2. A Figura 35 apresenta a FRE do sensor fornecido pelo fabricante.

Figura 35: FRE Sensor



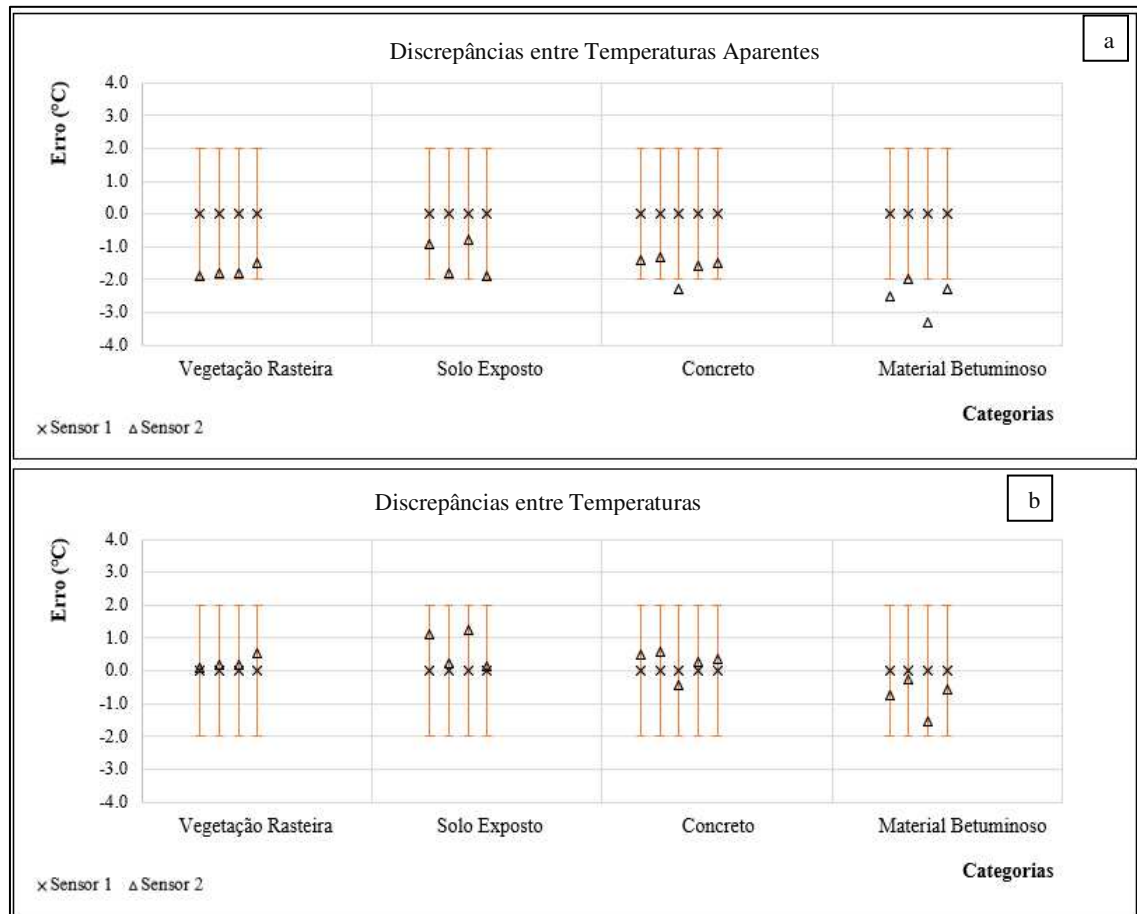
Fonte: Autoria Própria (2023).

O comprimento de onda central na qual o sensor é sensível é equivalente a $10,47\mu\text{m}$, utilizando o conceito da largura total na metade do máximo (*Full Width at Half Maximum – FWHM*). Assim, com este parâmetro foi possível estimar os parâmetros necessários.

Desta forma, a radiância obtida no Sensor 2 é dada pelo produto da soma dos parâmetros acima, sendo equivalente a $0,33 \text{ [W/m}^2 \cdot \mu\text{m]}$ para a categoria Vegetação Rasteira e $0,32 \text{ [W/m}^2 \cdot \mu\text{m]}$ para as categorias Solo Exposto, Concreto e Material Betuminoso. Os valores de temperatura foram convertidos para radiância pela equação de Planck, corrigidos através dos fatores de correção e convertidos para temperatura novamente. A Figura 35 apresenta as discrepâncias entre as temperaturas dos sensores 1 e 2 antes e após a correção:

Fonte: Autoria Própria (2023).

Figura 36: Discrepâncias entre as temperaturas dos sensores 1 e 2, a) antes da correção e b) após a correção.



Analisando os resultados, antes da correção, 11,76% das amostras apresentaram discrepâncias menores que $1,00^\circ\text{C}$, 58,82% apresentaram discrepâncias entre 1,00 e $2,00^\circ\text{C}$ e 29,41% apresentaram discrepâncias maiores que $2,00^\circ\text{C}$, acima da incerteza fornecida pelo fabricante. Após a correção pelo Modelo Teórico *Modtran*, 82,35% das amostras apresentaram discrepâncias menores que $1,00^\circ\text{C}$, 17,65% apresentaram discrepâncias entre 1,00 e $2,00^\circ\text{C}$ e nenhuma amostra apresentou discrepância maior que $2,00^\circ\text{C}$, ou seja, todas dentro da incerteza fornecida pelo fabricante.

Os resultados foram considerados satisfatórios, tendo em vista que foram corrigidos

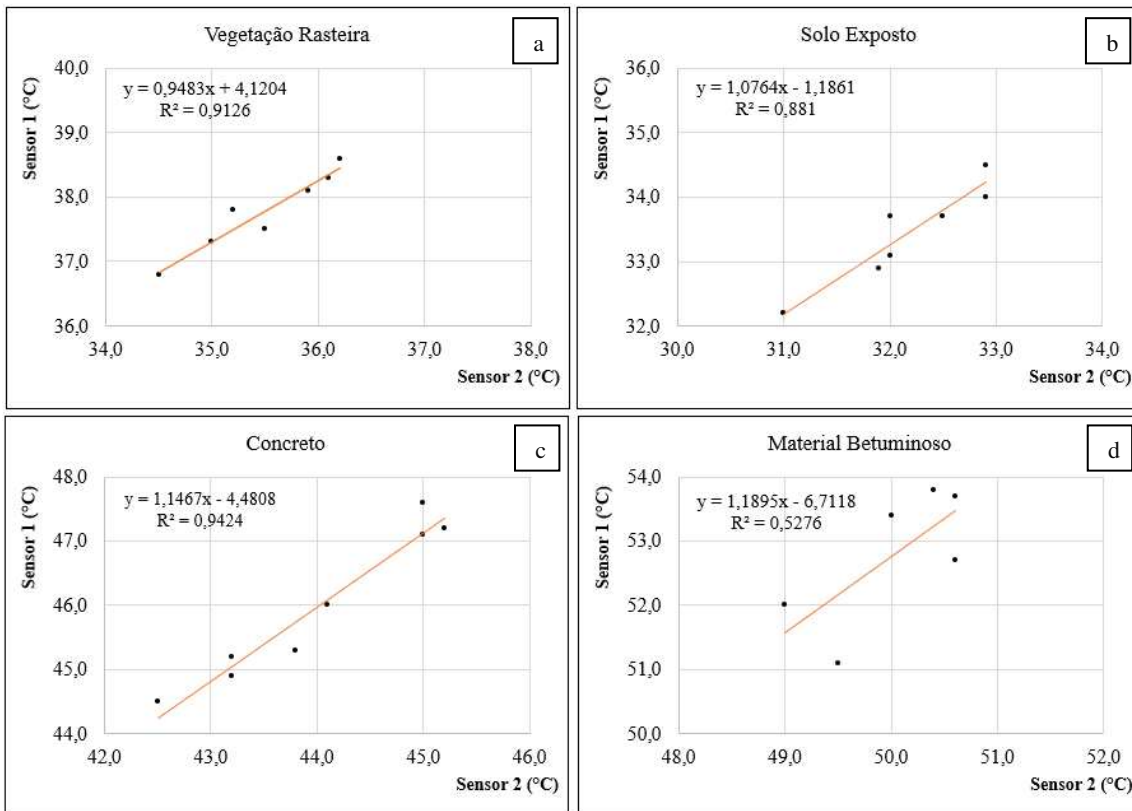
os dados com poucas informações coletadas em campo, como temperatura do ar e visibilidade. Existem *softwares* comerciais que utilizam a modelagem radiativa *Modtran*, na qual é possível inserir mais informações e aperfeiçoar mais a modelagem de acordo com a necessidade do usuário, entretanto, o aumento de informações para implementar no programa, torna o processo cada vez mais complexo.

5.3.2 Modelo Empírico Correlação Ar – Solo

Os pontos de controle de cada categoria foram utilizados para construção de diagramas de dispersão. A Figura 37 apresenta os diagramas de dispersão com as linhas de tendência.

Fonte: Autoria Própria (2023).

Figura 37: Diagramas de dispersão com as linhas de tendência, a) Vegetação Rasteira, b) Solo Exposto, c) Concreto, d) Material Betuminoso



Observando as equações de regressão, foram identificados valores residuais altos, que normalmente são explicados por alguns fatores como baixa correlação, a relação não ser linear, baixo número amostral e até presença de *outliers*.

Como o conjunto de dados não apresentou normalidade, os dados foram submetidos à correlação de *Spearman* a fim de verificar a associação dos dados dos sensores 1 e 2. Para a categoria Vegetação Rasteira, Solo Exposto e Concreto os coeficientes apresentaram valores acima de 0,95, e a categoria Material Betuminoso apresentou coeficiente equivalente a 0,61, ou

seja, indicam uma associação dos dados dos sensores, embora o coeficiente de correlação do Material Betuminoso seja inferior aos demais, ainda está dentro de um intervalo aceitável para conclusões significativas.

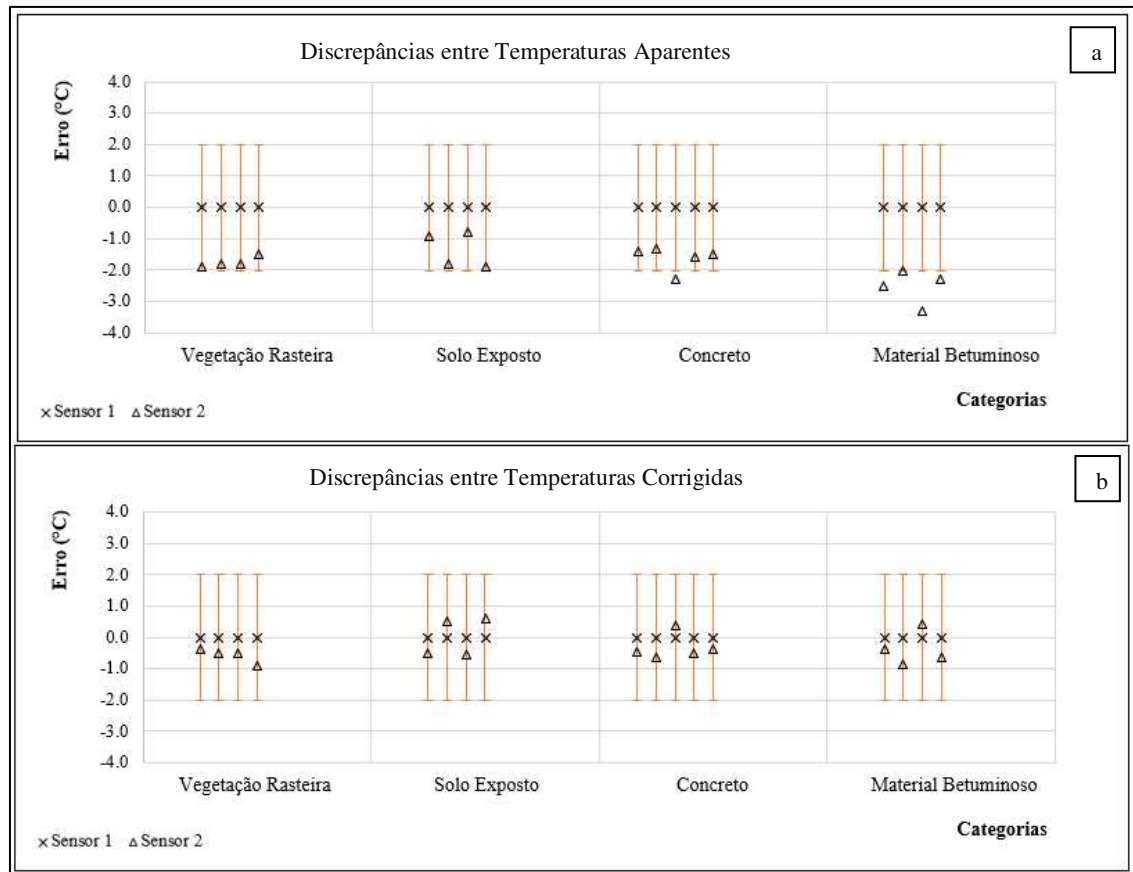
Assim, através da regressão linear foi ajustada uma linha de tendência definida por uma equação, onde os coeficientes de determinação (R^2) das categorias Vegetação Rasteira, Solo Exposto e Concreto foram superiores e 0,881, apontando que 88,10% da variabilidade das temperaturas pode ser explicada através do modelo de regressão linear. A categoria Material Betuminoso apresentou coeficiente de determinação equivalente a 0,528, ou seja, indica que a linha de tendência não se ajusta bem ao modelo de regressão linear. Modelos de regressão polinomial, exponencial, etc. foram testados e também não tiveram ajuste adequado.

Embora os coeficientes estatísticos apontem a baixa associação entre os dados de temperatura dos sensores 1 e 2, acredita-se que seja devido ao baixo número amostral. Ao analisar a variância amostral dos pontos de validação, tem-se que $\sigma^2 = 0,02$, indicando pequena variação entre eles, e considerando a imagem obtida pelo Sensor 2 transformada em matriz de pontos de temperatura 75 x 55 (Coluna x Linha) como sendo a população, tem-se $\sigma^2 = 0,04$, ou seja, a categoria Material Betuminoso possui uma variação muito baixa nos valores de temperatura, tanto amostral quanto populacional, indicando ser um material uniforme, o que pode indicar que mesmo o modelo de regressão linear não ser um modelo mais adequado, a variável dependente pode ser explicada por ele, já que o desvio padrão amostral $\sigma = 0,13^\circ\text{C}$ e populacional $\sigma = 0,20^\circ\text{C}$. Por ser um modelo mais simples, a regressão linear será adotada neste caso.

Avaliando a possibilidade da presença de *outliers* no conjunto de dados amostrais de todas as categorias, ela foi desconsiderada, tendo em vista que não existe um padrão nos valores de temperatura absoluta, pois, podem variar de acordo com as características da superfície, como teor de água, tipo de solo, etc. Ademais, avaliando as discrepâncias entre os dados coletados pelos sensores 1 e 2, não foram encontradas discrepâncias acentuadas.

Após o cálculo, os valores de temperatura foram corrigidos e as discrepâncias foram analisadas. A Figura 38 apresenta as discrepâncias entre as temperaturas dos sensores 1 e 2 antes e após a correção:

Figura 38: Discrepâncias entre as temperaturas dos sensores 1 e 2, A) antes da correção e b) após a correção.



Fonte: Autoria Própria (2023).

Analisando os resultados, antes da correção, 11,76% das amostras apresentaram discrepâncias menores que 1,00°C, 58,82% apresentaram discrepâncias entre 1,00 e 2,00°C e 29,41% apresentaram discrepâncias maiores que 2,00°C, acima da incerteza de fornecida pelo fabricante. Após a correção pela metodologia empírica Correlação Ar-Solo, 100% das amostras apresentaram discrepâncias menores que 1,00°C, ou seja, todas dentro da incerteza fornecida pelo fabricante.

Os resultados foram considerados satisfatórios, tendo em vista que foram corrigidos com poucos pontos amostrais coletados em campo. Entretanto, a modelagem pode ser aperfeiçoada com o aumento o número de pontos amostrais. Embora esse aumento de número amostral possa ter reflexo positivo na qualidade da modelagem, o processo pode se tornar

complexo e ainda sim não contemplar todas as variações de temperatura do solo, sendo que essas variações na maioria das vezes não são perceptíveis na região do visível.

5.3.3. Definição da metodologia com melhor desempenho

As análises anteriores avaliaram as metodologias propostas de correção de efeitos atmosféricos, que se mostraram satisfatórias para um determinado número amostral, porém, a definição da melhor metodologia para uma população não pode ser apontada apenas pelos pontos de validação, tendo em vista que as amostras podem não envolver erros não amostrais.

Todo número amostral possui uma margem de erro, isto é, considera-se uma possibilidade de erro nos resultados proporcionais ao número amostral, ou seja, quanto maior o número amostral, menor a possibilidade de erro nos resultados, essa é a definição para erro amostral. Entretanto, a coleta de amostras não conformes com a população, amostras tendenciosas, etc., são erros não amostrais, ou seja, independe do número amostral coletado.

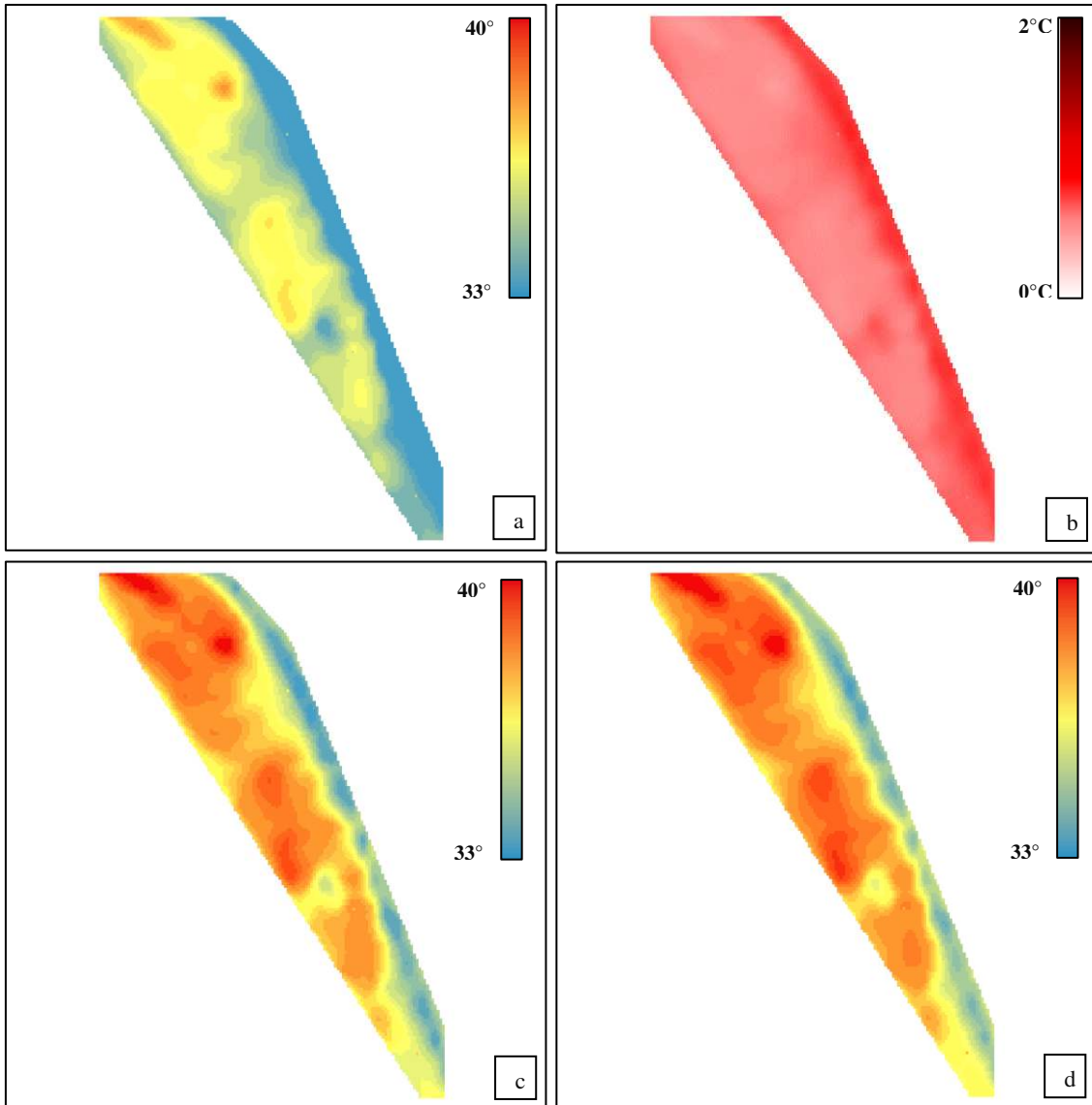
Portanto, as metodologias foram consideradas adequadas para a correção dos efeitos atmosféricos, mas para identificar a melhor metodologia de correção da população é necessário ampliar o estudo e incluir outras análises para conclusões mais concretas.

As imagens do tipo raster das categorias foram transformadas em matrizes de pontos de temperatura, onde cada ponto representa um pixel com uma temperatura absoluta. Para a categoria Vegetação Rasteira, a matriz da área de estudo foi 132 x 187, Solo Exposto com uma matriz 91 x 80, Concreto com uma matriz 89 x 90 e Material Betuminoso com matriz 75 x 55 (Coluna x Linha).

Após as correções das duas metodologias feitas separadamente, as imagens de todas as categorias foram classificadas, respeitando o intervalo de temperaturas de cada uma, sendo as seguintes imagens classificadas: Imagem capturada pelo Sensor 2 com temperaturas aparentes, sob efeito atmosférico; Imagem com valores de discrepâncias entre as temperaturas aparentes corrigidas nas duas metodologias; Imagem com temperatura aparente corrigida pelo modelo teórico *Modtran* e Imagem com temperatura aparente corrigida pelo modelo empírico Correlação Ar-Solo. A Figura 39 apresenta as quatro situações, para a categoria Vegetação

Rasteira.

Figura 39: a) Imagem com temperaturas aparentes, sob efeito atmosférico; b) Imagem com valores de discrepâncias entre as temperaturas aparentes corrigidas nas duas metodologias; c) Imagem com temperaturas aparentes corrigida pelo modelo teórico *Modtran* e d) Imagem com temperaturas aparentes corrigidas pelo modelo empírico Correlação Ar-Solo, todas para a categoria Vegetação Rasteira.



Fonte: Autoria Própria (2023).

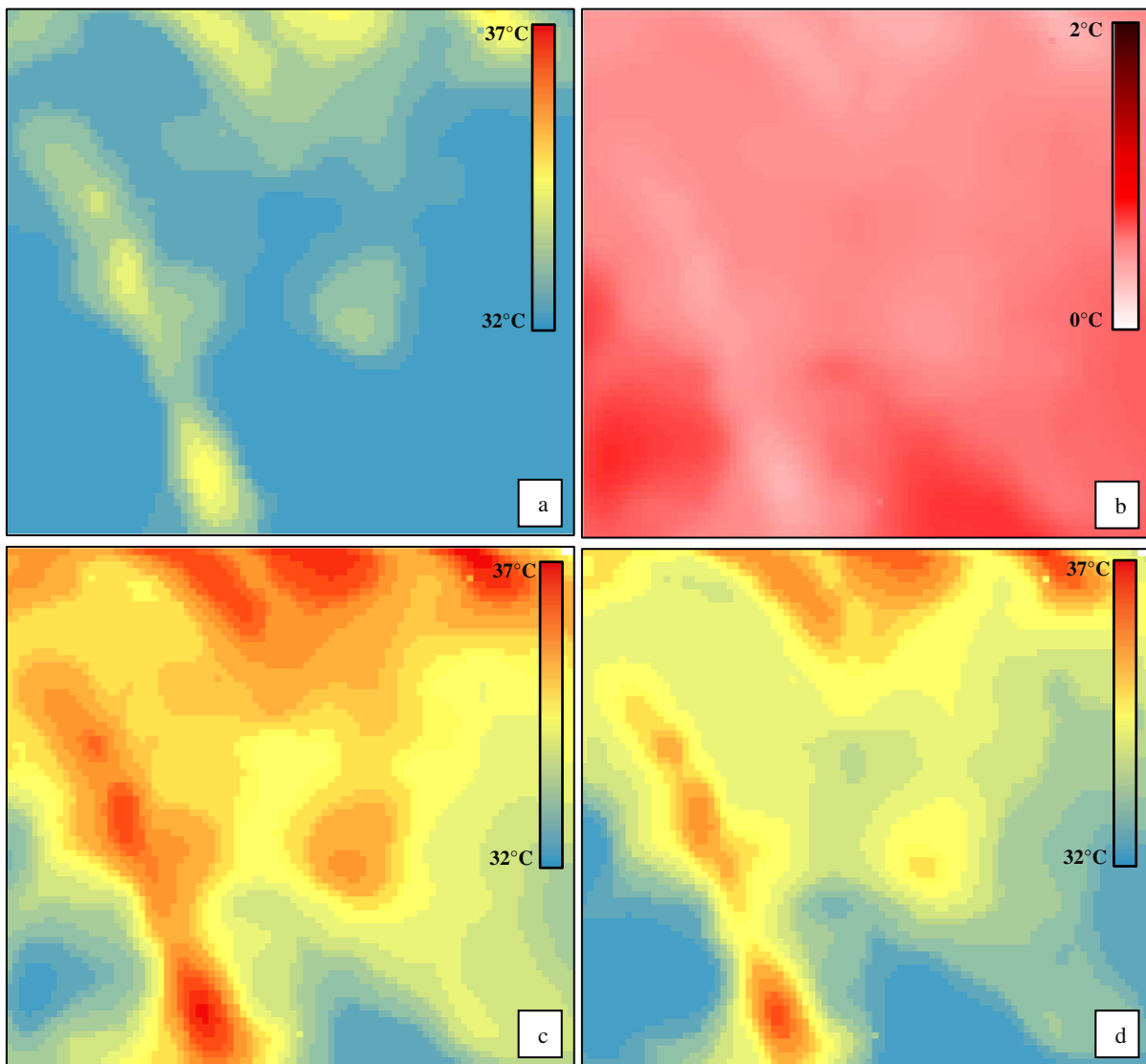
Ao analisar as imagens da categoria Vegetação Rasteira, é possível perceber que ambas as metodologias intensificaram as temperaturas com relação a imagem coletada pelo Sensor 2, o que era esperado, já que o efeito atmosférico atua na absorção e espalhamento da radiação emitida pela superfície, diminuindo a intensidade que chega até o sensor.

A média das temperaturas aparentes coletadas pelo Sensor 2, foi de 34,75°C, enquanto as temperaturas corrigidas pelo modelo teórico *Modtran* apresentaram uma média de 36,77°C, um acréscimo médio de 2,02°C. Já as temperaturas corrigidas pelo modelo empírico Correlação

Ar-Solo a média foi de $37,08^{\circ}\text{C}$ com um acréscimo médio de $2,33^{\circ}\text{C}$. A discrepância média absoluta entre as duas metodologias é de $0,31^{\circ}\text{C}$, com mínimo de $0,21^{\circ}\text{C}$ e máximo de $0,47^{\circ}\text{C}$.

Para a categoria Solo Exposto, a média das temperaturas aparentes coletadas pelo Sensor 2, foi de $32,41^{\circ}\text{C}$, enquanto as temperaturas corrigidas pelo modelo teórico *Modtran* apresentaram uma média de $34,42^{\circ}\text{C}$, um acréscimo médio de $2,01^{\circ}\text{C}$, já as temperaturas corrigidas pelo modelo empírico Correlação Ar-Solo a média foi de $33,70^{\circ}\text{C}$, um acréscimo médio de $1,29^{\circ}\text{C}$. A discrepância média absoluta entre as duas metodologias é de $0,72^{\circ}\text{C}$, com mínimo de $0,51^{\circ}\text{C}$ e máximo de $0,92^{\circ}\text{C}$. A Figura 40 apresenta as quatro situações, para a categoria Solo Exposto.

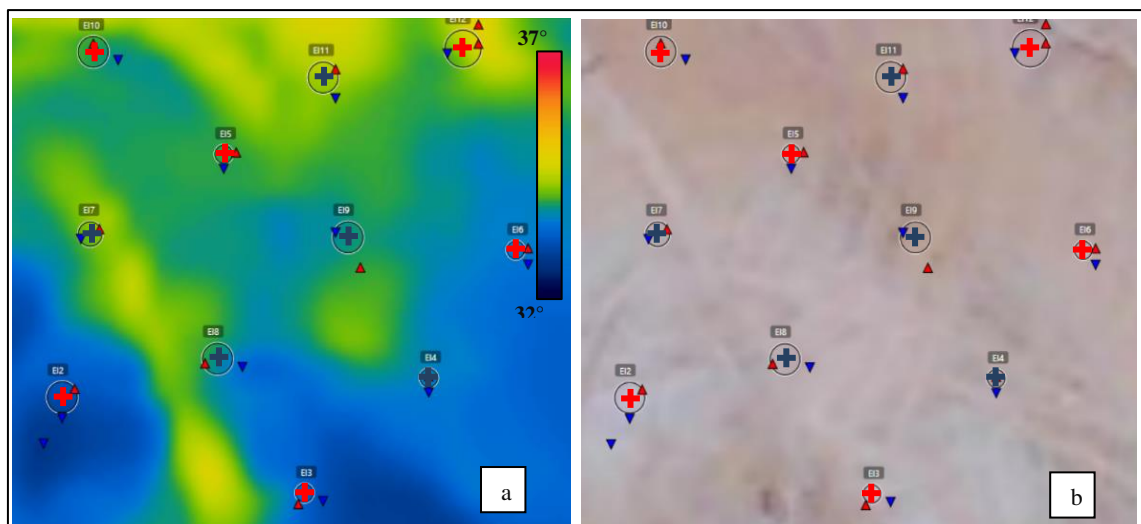
Figura 40: a) Imagem com temperaturas aparentes, sob efeito atmosférico; b) Imagem com valores de discrepâncias entre as temperaturas aparentes corrigidas nas duas metodologias; c) Imagem com temperaturas aparentes corrigida pelo modelo teórico *Modtran* e d) Imagem com temperaturas aparentes corrigidas pelo modelo empírico Correlação Ar-Solo, todas para a categoria Solo Exposto.



Fonte: Autoria Própria (2023).

Para esta categoria houve um decréscimo das temperaturas do modelo empírico Correlação Ar-Solo em relação ao modelo teórico *Modtran*, que se deve à falta de pontos amostrais em áreas de maior temperatura da superfície. A Figura 41 apresenta duas imagens do *software FlirTools* na composição TIR – à esquerda, e RGB321 – à direita, com os pontos de controle representados em vermelho e os pontos de validação representados em azul. Na imagem TIR as áreas em amarelo representam temperaturas superiores que o redor e é possível notar que algumas dessas áreas mais quentes não foram consideradas para a construção da modelagem.

Figura 41: Pontos de Controle e Validação lançados sobre as imagens da categoria Solo Exposto. a) Imagem composição RGB321 e b) Imagem composição TIR.



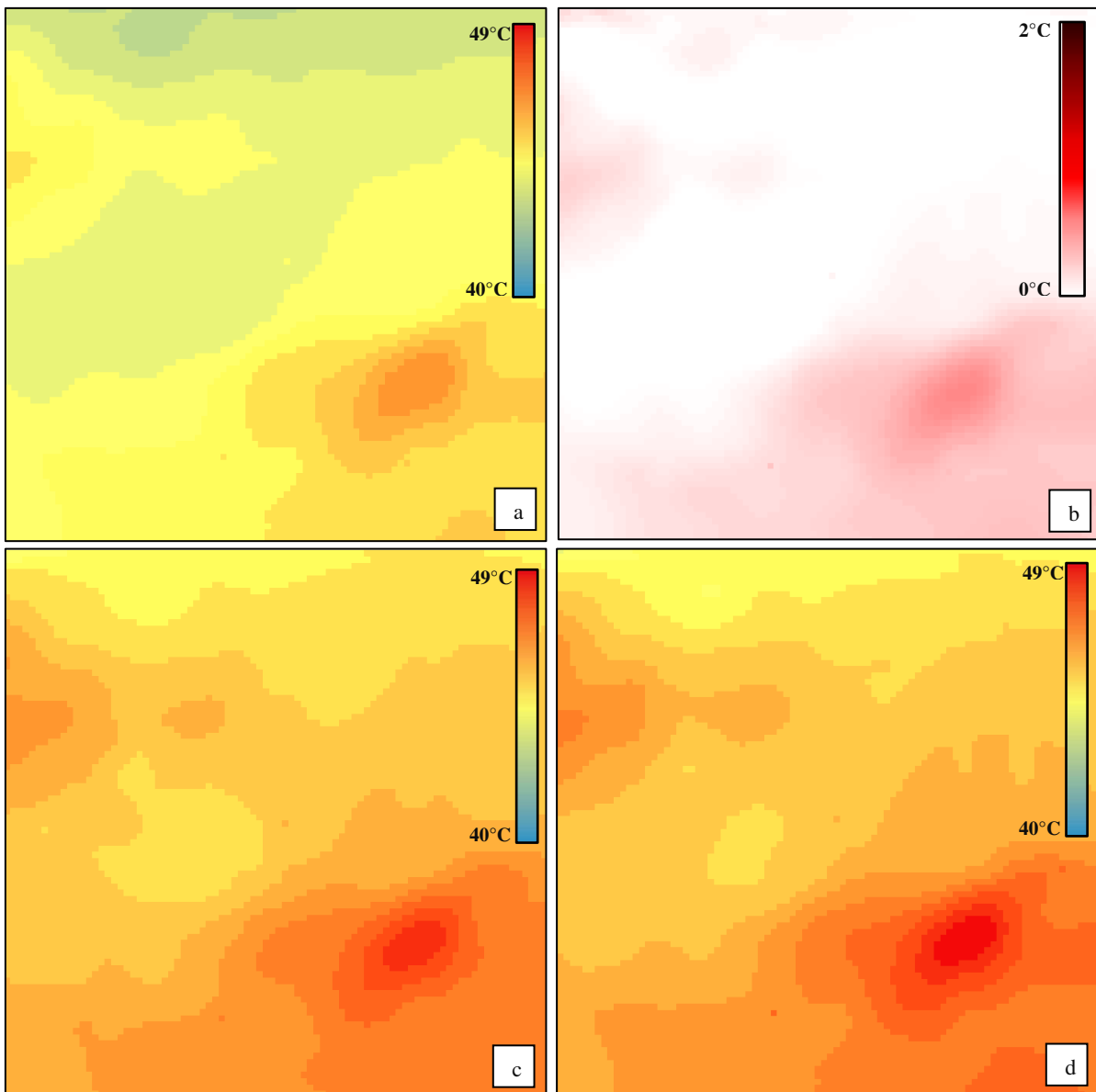
Fonte: Autoria Própria (2023)

A Figura 41a apresenta a composição RGB321, onde fica evidenciado que mesmo com uma boa distribuição dos pontos amostrais na área de estudo, alterações bruscas de temperatura podem ocorrer e não serem consideradas por não serem perceptíveis na região espectral do visível, diferentemente ao que ocorre na distribuição de pontos para um controle de qualidade em um aerolevante altimétrico, onde é perceptível as diferentes altitudes do terreno, podendo acrescentar pontos amostrais em campo, se necessário.

Superfícies que possuem grande variação de temperatura podem ser explicadas pela variedade de aspectos, como a categoria Solo Exposto, que pode ter diferentes tipos de solo (como argila, areia, ou a combinação destes, etc.), texturas, graus de compactação, composição mineral e química, quantidade de matéria orgânica, ar, teor de água, etc., e poucos metros podem ser suficientes para causar mudanças bruscas de temperatura, que está diretamente relacionado com o fator de emissividade e capacidade de armazenamento de calor do elemento.

Para a categoria Concreto, a média das temperaturas aparentes coletadas pelo Sensor 2, foi de $43,79^{\circ}\text{C}$, enquanto as temperaturas corrigidas pelo Modelo Teórico *Modtran* apresentaram uma média de $45,62^{\circ}\text{C}$, um acréscimo médio de $1,83^{\circ}\text{C}$, já as temperaturas corrigidas pelo modelo empírico Correlação Ar-Solo a média foi de $45,74^{\circ}\text{C}$, um acréscimo médio de $1,95^{\circ}\text{C}$. A discrepância média absoluta entre as duas metodologias é de $0,12^{\circ}\text{C}$, com mínimo de $0,00^{\circ}\text{C}$ e máximo de $0,54^{\circ}\text{C}$. A Figura 42 apresenta as quatro situações, para a categoria Concreto:

Figura 42: a) Imagem com temperaturas aparentes, sob efeito atmosférico; b) Imagem com valores de discrepâncias entre as temperaturas aparentes corrigidas nas duas metodologias; c) Imagem com temperaturas aparentes corrigida pelo modelo teórico *Modtran* e d) Imagem com temperaturas aparentes corrigidas pelo modelo empírico Correlação Ar-Solo, todas para a categoria Concreto.

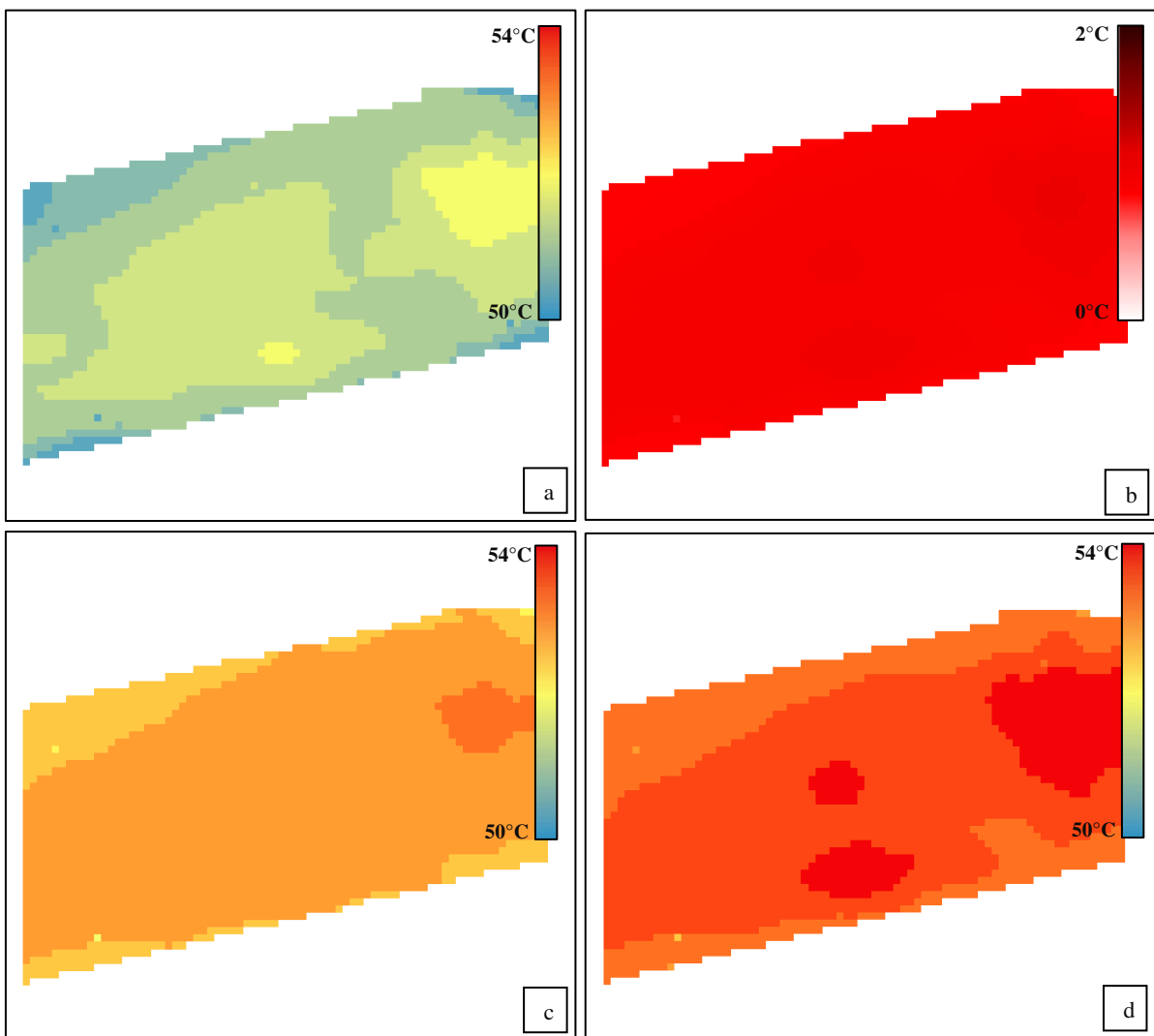


Fonte: Autoria Própria (2023)

Para a categoria Material Betuminoso, a média das temperaturas aparentes coletadas

pelo Sensor 2, foi de 50,49°C, enquanto as temperaturas corrigidas pelo Modelo Teórico *Modtran* apresentaram uma média de 52,24°C, um acréscimo médio de 1,75°C, já as temperaturas corrigidas pelo modelo empírico Correlação Ar-Solo a média foi de 53,35°C, um acréscimo médio de 2,86°C. A discrepância média absoluta entre as duas metodologias é de 1,11°C, com mínimo de 0,81°C e máximo de 1,20°C. A Figura 43 apresenta as quatro situações, para a categoria Material Betuminoso.

Figura 43: a) Imagem com temperaturas aparentes, sob efeito atmosférico; b) Imagem com valores de discrepâncias entre as temperaturas aparentes corrigidas nas duas metodologias; c) Imagem com temperaturas aparentes corrigida pelo modelo teórico *Modtran* e d) Imagem com temperaturas aparentes corrigidas pelo modelo empírico Correlação Ar-Solo, todas para a categoria Material Betuminoso.



Fonte: Autoria Própria (2023)

Superfícies com coberturas naturais tendem a sofrer alterações mais bruscas de temperatura, como as categorias Vegetação Rasteira e Solo Exposto, que possuem σ^2 equivalente a 2,48 e 0,71, respectivamente.

Já as superfícies com coberturas modificadas pelo homem possuem temperaturas mais

elevadas e uniformes, que em geral possuem características de impermeabilidade, homogeneidade e alta capacidade térmica, como a categoria Material Betuminoso, que necessita receber maior quantidade de energia para obter variações significativas. A variância σ^2 equivalente a 0,04 justifica o raciocínio.

A categoria Concreto - do tipo calçamento, adotado neste estudo, apesar de ser modificada pelo homem, se trata de um material mais rudimentar, com maior composição mineral e baixa capacidade térmica, que explica uma ser mais suscetível a interferências externas, a variância σ^2 equivalente a 0,70, é próxima a variância do solo exposto.

De modo geral, as quatro categorias adotadas para este estudo representam a maior parte das características das coberturas de superfícies que são objetos de pesquisas científicas, ou seja, a presente análise demonstra que todo estudo deve ter a cautela em generalizar dados amostrais de temperaturas, que podem sofrer alterações em pequenas áreas por interferências externas não perceptíveis na região do visível. Assim, uma metodologia que consiga corrigir os efeitos atmosféricos considerando toda as variações do terreno, sem intensificar ou atenuar valores de temperatura desproporcionalmente com a realidade, seria a mais adequada.

Portanto, para uma determinada área, as seguintes situações: 1) uma quantidade representativa de pontos amostrais de valores de temperatura e 2) uma imagem contendo um valor de temperatura para cada pixel com um GSD mais preciso, ou seja, cada pixel representa uma área bem pequena; tem-se que a segunda situação vai representar mais detalhadamente a variabilidade das temperaturas dessa determinada área.

Seguindo este raciocínio, a imagem tomada pelo Sensor 2 apresenta maior detalhamento da superfície e a sua variância é uma medida explicativa da dispersão das temperaturas para determinada área. Portanto, a variância do Sensor 2 (σ_{S2}) foi considerada como referência para análises posteriores.

Ambas as metodologias fazem a correção pixel a pixel, mas não são correções constantes, ou seja, as correções são ponderadas pelos valores de temperatura, quanto maior o valor de temperatura, menor o fator de correção, cada qual na sua proporção. Portanto, as variâncias dessas metodologias serão diferentes da variância de referência (σ_{S2}), porém a variância que mais se aproximar da variância de referência, será considerada a mais adequada. A Tabela 10 apresenta as variâncias das metodologias e suas respectivas categorias:

Tabela 10: Variâncias dos valores de temperatura do Sensor 2, metodologia de correção do modelo teórico Modtran e modelo empírico Correlação Ar-Solo para cada categoria.

| Categoria | σ_{S2} | σ_{MODT} | σ_{CORR} |
|---------------------|---------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Vegetação Rasteira | 2,48 | 2,39 | 2,22 |
| Solo Exposto | 0,71 | 0,68 | 0,82 |
| Concreto | 0,70 | 0,68 | 0,92 |
| Material Betuminoso | 0,04 | 0,04 | 0,05 |

Fonte: Autoria Própria (2023)

Tendo em vista que todas as variâncias da metodologia de correção do modelo teórico *Modtran* apresentaram valores mais próximos das variâncias de referência, e de acordo com análises anteriores quando comparadas as temperaturas corrigidas as temperaturas de referência do Sensor 1, onde todas as discrepâncias se mostraram inferiores às incertezas fornecidas pelo fabricante; pode- considerar o Modelo Teórico *Modtran* mais adequado para correção dos efeitos atmosféricos.

5.3.3 Relação Efeito Atmosférico x Altura do Sensor

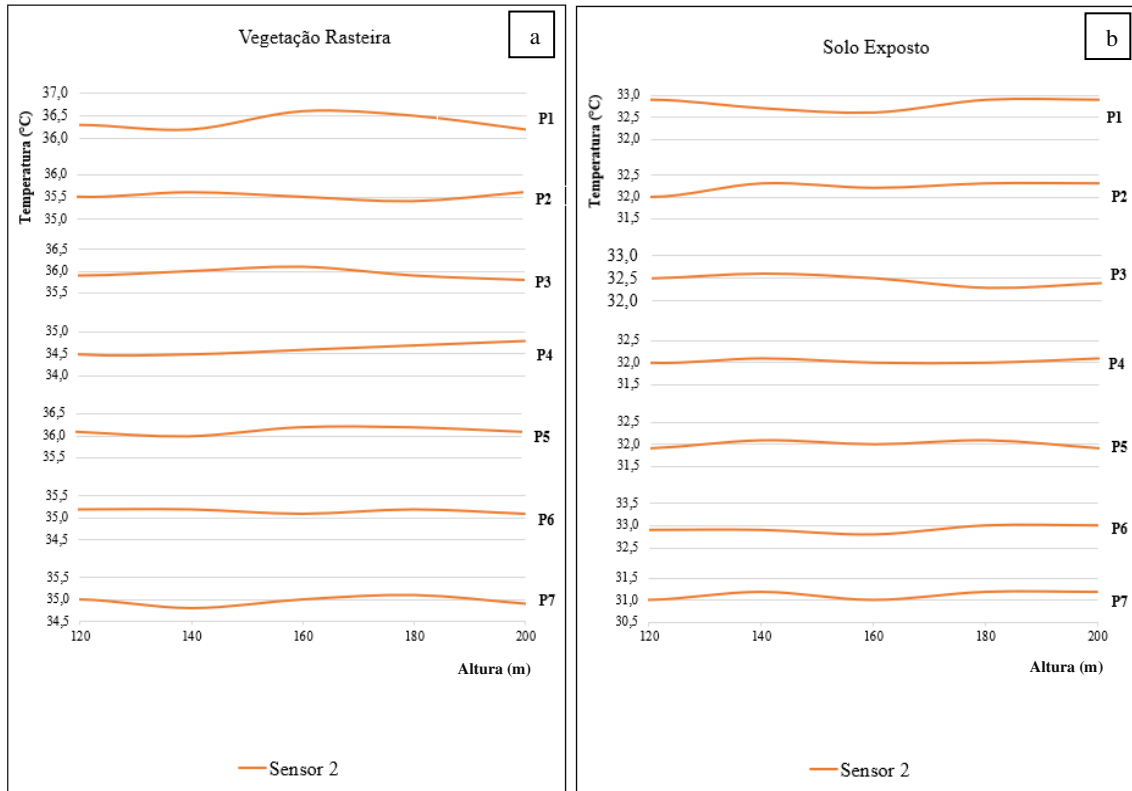
Com base nos levantamentos realizados as 14:00h em diferentes alturas, foi analisada a relação efeito atmosférico x variação da altura do Sensor 2. A Figura 44 apresenta as temperaturas aparentes para as diferentes alturas do Sensor 2 para as categorias Vegetação Rasteira e Solo Exposto.

Analisando as categorias apresentadas na Figura 44 é possível observar comportamentos diferentes para os diversos pontos amostrais, nenhum dos pontos apresentaram visualmente uma tendência.

A Figura 45 apresenta as temperaturas aparentes para as diferentes alturas do Sensor 2 para as categorias Concreto e Material Betuminoso.

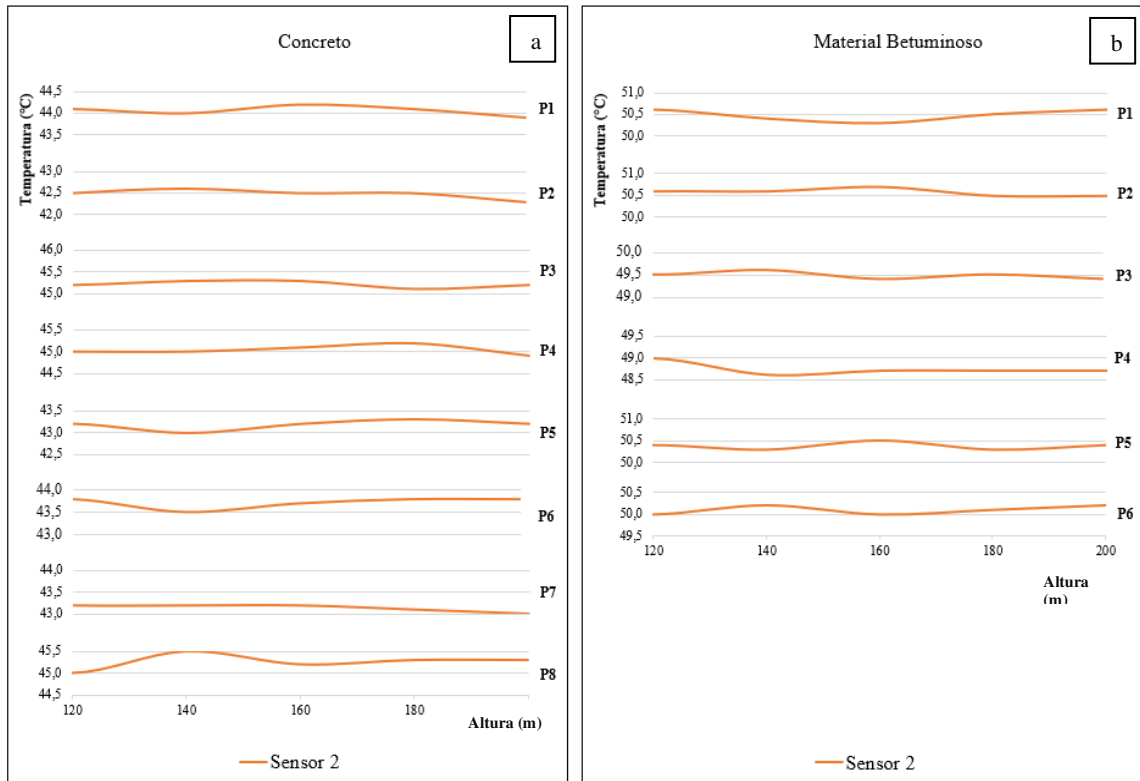
Analisando as categorias apresentadas na Figura 45 é possível observar comportamentos diferentes para os diversos pontos amostrais, apenas o P7 da categoria Concreto apontou um comportamento atenuante da temperatura conforme aumento da altura do Sensor 2.

Figura 45: Variação das temperaturas aparentes dos pontos para variação da altura do Sensor 2, a) Vegetação Rasteira e b) Solo Exposto.



Fonte: Autoria Própria (2023)

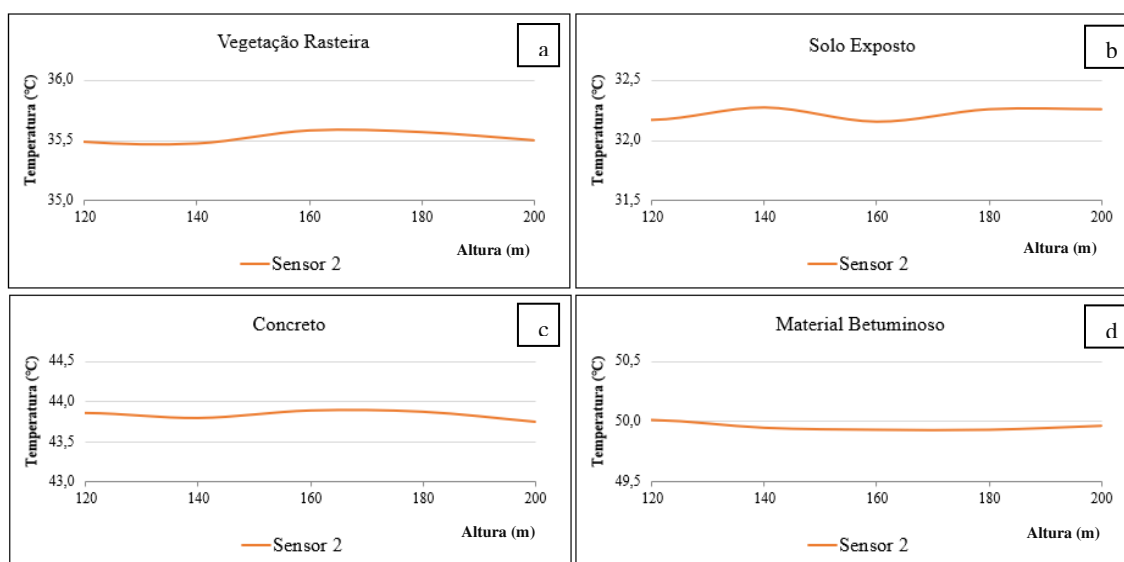
Figura 44: Variação das temperaturas aparentes dos pontos para variação da altura do Sensor 2, a) Concreto e b) Material Betuminoso.



Fonte: Autoria Própria (2023)

Considerando para cada categoria que as diferentes temperaturas aparentes dos pontos amostrais, apesar de discrepantes, estão sob as mesmas condições, ou seja, sob o mesmo efeito atmosférico (já que há pouca ou nenhuma variação horizontal da atmosfera na área de estudo) e a radiação dos alvos recebida no sensor está sob a mesma taxa de emissividade, então pode-se fazer uma média das temperaturas dos pontos amostrais para cada altura do Sensor 2 para simplificar as análises estatísticas. A Figura 46 apresenta a temperatura média para todos os pontos amostrais por altura do Sensor 2. Para avaliação da correlação dessas duas variáveis (Temperatura e Altura média), utilizou-se a Correlação de *Spearman*.

Figura 46: Variação das temperaturas aparentes médias para variação da altura do Sensor 2, a) Vegetação Rasteira, b) Solo Exposto, c) Concreto e d) Material Betuminoso.



Fonte: Autoria Própria (2023)

Para as categorias Vegetação Rasteira e Solo Exposto as correlações foram 0,15 e 0,41, relações positivas, porém fracas. Para a categoria Concreto a correlação foi de -0,07, relação negativa – comportamento esperado, porém fraca.

Já a categoria Material Betuminoso apresentou correlação de 0,74, relação positiva e forte. Entretanto, uma correlação positiva implica que com o aumento da altura do Sensor 2 existe um aumento da temperatura aparente, um efeito contrário ao esperado para esta pesquisa, tendo em vista que o efeito atmosférico é maior em altas altitudes, diminuído gradativamente a temperatura aparente que chega ao Sensor 2.

Fazendo um teste de hipótese utilizando a correlação de *Spearman*, assumindo a Hipótese nula (H_0): Não há correlação entre a altura e a média das temperaturas aparentes dos pontos amostrais ($r = 0$) e a Hipótese alternativa (H_1): Existe correlação entre a altura e a média

das temperaturas aparentes dos pontos amostrais ($r \neq 0$), para um nível de significância de 95%, $p\text{-value} > 0,05$ para todas as categorias, ou seja, não se pode rejeitar a hipótese nula, pois não foram encontradas evidências significativas para a análise conduzida.

Os componentes atmosféricos mais representativos em baixas alturas são H_2O e CH_4 , responsáveis pela absorção da radiação, fazendo uma revisão das análises anteriores, no intervalo de 0 - 120m houve um decréscimo de aproximadamente $2,00^\circ C$ para o horário das 14:00h, e no intervalo de 120 - 200m o decréscimo se mantém próximo de $0,02^\circ C$, comportamento inusitado. Entretanto, esse fenômeno pode ser explicado pela Teoria do Gradiente Adiabático Seco.

A teoria desenvolvida pelo cientista suíço Leonhard Euler no século XVIII, é baseada nas leis da termodinâmica e nas propriedades físicas do ar e é que uma taxa de variação vertical da temperatura em uma parcela de ar em ascensão, sob a suposição de que não há troca de calor com o ambiente ao redor e que a umidade na parcela de ar é baixa o suficiente para que a condensação ou evaporação não afete significativamente o processo.

A taxa média de resfriamento é de cerca de $9,8^\circ C$ por quilômetro, porém, o gradiente vertical de temperatura na atmosfera nem sempre é uniforme. Embora seja mais comum que a temperatura diminua com o aumento da altitude, a taxa exata de variação pode variar dependendo das condições atmosféricas, como a composição do ar, presença de vapor de água e a influência de outros fatores.

Assim, pela teoria, observando que existe maior interferência externa no intervalo de 0-120m do que no intervalo 80-200m, ou seja, no primeiro intervalo está sob maior instabilidade atmosférica que no segundo intervalo, podendo justificar as diferenças de gradiente das temperaturas dos dois intervalos.

5.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

O presente estudo objetivou analisar todos os erros eminentes em uma coleta de dados de temperatura da superfície, considerando diferentes categorias, que englobam a maioria das características semelhantes as demais coberturas encontradas na superfície terrestre.

Observou-se que é necessário a combinação de dois sensores, onde um foi adotado como referência, para conseguir entender as interferências externas quando se adotam diferentes alturas para os sensores, entretanto o primeiro estudo apresentou duas correções importantes:

1) Temperaturas aparentes e cinéticas apresentaram discrepâncias importantes para os dois sensores, em função do fator de emissividade do alvo, com média acima da incerteza fornecida pelos fornecedores. Após considerar este fator ponderando a temperatura aparente coletada pelos alvos, foi identificada uma aproximação das temperaturas coletadas pelos sensores e o termopar, ficando dentro das incertezas fornecidas pelos fabricantes.

2) Caracterização dos sensores 1 e 2, para entender o comportamento e correlação de ambos dentro das mesmas condições, para que em estudos posteriores possa saber diferenciar os efeitos do comportamento dos sensores e interferências externas.

A avaliação da interferência solar se mostrou importante em dois aspectos:

1) O equilíbrio térmico entre os mesmos tipos de alvo ou até mesmo categorias diferentes é fundamental para estudar a superfície sob as mesmas condições, ou seja, estudar as causas das discrepâncias existentes apenas pela variação do comportamento específico do alvo, sem a interferência de fatores externos que podem modificar os resultados, levando a conclusões errôneas.

2) A estabilidade da atmosfera se mostrou eficaz para a redução das diferenças entre as temperaturas capturadas pelos sensores em alturas distintas, mostrando que os efeitos atmosféricos podem ser minimizados em alguns horários do dia.

Tendo conhecimento dos efeitos atmosféricos sobre as temperaturas, foram analisadas duas metodologias de correção atmosférica que apresentaram bons resultados, embora cada uma tenha sua particularidade de execução. A seguir apresenta-se algumas considerações podem ser feitas sobre elas:

1) O *Software Modtran*- Interface Online - que possui acesso gratuito ao usuário, apresentou uma correção que ajustou todas as temperaturas para o intervalo de incerteza fornecido pelo fabricante, e apresentou uma variabilidade das temperaturas corrigidas mais próximas da realidade, o que o tornou a metodologia mais adequada.

Embora o modelo permita a entrada de informações do campo para uma modelagem mais assertiva, as unidades adotadas não são muito conhecidas, o que pode gerar dúvidas ao usuário e até mesmo a entrada de valores incorretos, alterando os fatores de correção. Como o sistema apresenta modelagens prontas para alguns parâmetros de entrada, o usuário pode facilmente utilizá-las e obter uma modelagem radiativa satisfatória para correção dos dados.

3) O Modelo Empírico Correlação Ar-Solo, também apresentou uma correção satisfatória, ajustando todas as temperaturas para o intervalo de incerteza fornecido pelo

fabricante. Entretanto, está diretamente relacionada à qualidade e quantidade amostral, que deve abranger o máximo de variações de temperatura da superfície, e nem sempre é possível por não ser perceptível na região espectral do visível.

Essa omissão de pontos amostrais ou até mesmo pontos amostrais enviesados, podem alterar as correções dos dados, intensificando algumas temperaturas e atenuando outras, alterando a variabilidade dos dados, tornando esse processo incapaz de manter as variações reais de temperatura da superfície.

A relação do efeito atmosférico em função da variação da altura do sensor não apresentou resultados que indicasse um aumento, que aponta que variações pequenas de altura no sensor - acima de 120,00m, não possuem efeitos significantes nas temperaturas finais.

O presente estudo separou alguns tipos de superfície por categorias, para verificar se existia alguma tendência de acordo com as diferentes respostas espectrais dos alvos, entretanto, a variabilidade das emissividades não teve peso significativo nas correções atmosféricas, podendo ser considerado um fator irrelevante para tomada de fotos que incluem vários tipos de elemento. Entretanto, na conversão de temperaturas aparentes em temperaturas cinéticas, são fatores de correção significativos e não podem ser desconsiderados.

Por fim, verificou-se neste estudo que a combinação RPA e câmera termal de baixo custo apresentaram bons resultados após as Correções Radiométricas, podendo contribuir positivamente com pesquisas que necessitam de coletas de temperaturas de superfícies e não dispõem de recursos para tecnologias mais robustas, desde que consideradas as incertezas fornecidas pelos fabricantes dos sensores.

6 CONCLUSÕES

Estudar os efeitos da temperatura da superfície é uma área de pesquisa importante, de aspecto amplo e multidisciplinar, muito utilizado para compreender fenômenos de mudanças climáticas, monitoramento urbano, ecossistemas terrestres, etc.

As tecnologias de maior qualidade disponíveis para coleta de temperatura da superfície podem se tornar um processo dispendioso para estudos de pequenas áreas, onde o recobrimento por satélites ou até mesmo aeronaves pilotadas são superiores às necessidades de determinadas pesquisas. Por isso tem crescido o número de pesquisas envolvendo tecnologias de baixo custo, tornando cada vez mais seguro o uso de tecnologias acessíveis.

Pesquisas que envolvem valores quantitativos necessitam de interpretação, análise e

correção das medidas dos dados brutos, para estabelecimento de métricas para orientar o trabalho na direção correta e obter bons resultados. Este estudo procurou determinar uma maneira prática e viável de fazer correções de efeitos que possam degradar as imagens e desta forma, viabilizar o uso de câmeras termais de baixo custo que não possuem a princípio função de mapeamento aéreo considerando o caso de plataformas RPA.

Desta forma, o objetivo principal deste estudo que foi conjunto “*RPA + câmera termal de baixo custo*” como uma oportunidade para viabilizar pesquisas utilizando poucos recursos priorizando acurácia dos dados encontrados, foi atendido satisfatoriamente.

Segundo os objetivos específicos de desenvolver uma metodologia de calibração dos sensores; analisar a influência do horário de aquisição das imagens termais; e avaliar as metodologias de correção atmosférica; também foram executados e os resultados encontrados foram satisfatórios.

Portanto, para a obtenção de temperaturas absolutas da superfície e minimização dos erros, recomenda-se os seguintes passos: 1) Realizar previamente uma calibração entre os sensores para determinar a relação entre eles; 2) Coletar os dados no sol nascente; 3) Corrigir os efeitos atmosféricos inerentes utilizando o modelo teórico *Modtran* e 4) Converter as temperaturas aparentes para cinéticas considerando a emissividade do alvo.

Embora a pesquisa atual tenha apontado vários fatores que podem influenciar nas informações que chegam até o sensor acoplado a um RPA e sugeriu métricas para corrigir os dados, há um vasto campo para novas pesquisas envolvendo outros fatores e parâmetros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AL-KAFF, A.; MADRIDANO, A.; CAMPOS, S.; GARCÍA, F.; MARTÍN, D.; de LA ESCALERA, A.; **Emergency Support Unmanned Aerial Vehicle for Forest Fire Surveillance.** Electronics, 2020, 9, 260. Disponível em: <doi:10.3390/electronics9020260>. Acessado em: Janeiro de 2021.
2. ARAGON, B.; JOHANSEN, K.; PARKES, S.; MALBETEAU, Y.; AL-MASHHARAWI, S.; AL-AMOUDI, T.; ANDRADE, C.F.; TURNER, D.; LUCIEER, A.; MCCABE, M.F. **A Calibration Procedure for Field and RPA-Based Uncooled Thermal Infrared Instruments.** Sensors 2020, 20, 3316. Disponível em:<https://doi.org/10.3390/s20113316>. Acessado em Janeiro de 221.
3. BASENER, B.; BASENER, A. **Gaussian Process and Deep Learning Atmospheric Correction.** Remote Sensing. 2023. Disponível em <https://doi.org/10.3390/rs15030649>. Acessado em Abril de 2023.
4. BERK, A.; CONFORTI, P. ; KENNETT, R.; PERKINS, T.; HAWES, F.; VAN DEN BOSCH, J. **"MODTRAN6: a principal atualização do código de transferência radiativa MODTRAN,"** Proc. SPIE 9088, Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery XX, 90880H (13 de junho de 2014); Dsiponível em: <doi: 10.1117 / 12.2050433>. Acessado em Janeiro de 2021.
5. CAMARA, G.; SOUZA, R.C.M.; FREITA, S.U.M.; GARRIDO, J. **SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling.** Computers & Graphics, 20: (3) 395-403, 1996. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/index.html>. Acessado em: Janeiro de 2021.
6. CAMPBELL, J.B; WYNNE, R.H. **Introduction to Remote Sensing.** 5 ed. New York, 2011.
7. CAMPBELL, J.B; WYNNE, R.H; THOMAS, V.A. **Introduction to Remote Sensing.** 6 ed. New York, 2023.
8. CHANG, A.; JUNG, J.; MAEDA, M.M.; LANDIVAR, J.A.; CARVALHO, H.D.R.; YOEM, J. **Measurement of Cotton Canopy Temperature Using Radiometric Thermal Sensor Mounted on the Unmanned Aerial Vehicle (RPA).** Journal of Sensors. V.2020, p.7. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2020/8899325>. Acessado em Janeiro de 2021.
9. CHEN, J.M.; LIU, J.; **Evolution of evapotranspiration models using thermal and shortwave remote sensing data.** Remote Sensing Environmental, 2020, 237, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111594>. Acessado em Janeiro de 2021.
10. CRESPO, A.A. **Estatística Fácil.** 19ed.atual. São Paulo, Saraiva, 2009.
11. DJI. **Phanton 3 Professional – Guia de Início Rápido.** 2015.
12. FLIR System. **User’s manual FLIR Cx series.** 2017.

13. FLIR SYSTEMS. **FLIR C2 - Powerful Pocket-Portable Thermal Imaging**. 2015. Disponível em: <http://www.flir.com/C2>>. Acessado em Março de 2020.
14. FLUKE CORPORATION. **59 MAX/59 MAX + Infrared Thermometer Users Manual**. 2013.
15. GAO, F.; KUSTAS, W.P.; ANDERSON, M.C. **A Data Mining Approach for Sharpening Thermal Satellite Imagery over Land**. *Remote Sensing*, **2012**, 4, 3287- 3319. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/rs4113287>>. Acessado em Dezembro de 2020.
16. GEEKSFORGEEEKS. **Mann and Whitney U Test**. Retirado da internet . Acessado em 2023:< <https://www.geeksforgeeks.org/mann-and-whitney-u-test/>>
17. GEEKSFORGEEEKS. **Spearman's Rank Correlation** . Retirado da internet. Acessado em 2023: <<https://www.geeksforgeeks.org/spearmans-rank-correlation/>>
18. GUILLEVIC, P.C.; OLIOSO, A.; HOOK, S.J.; FISHER, J.B.; LAGOUARDE, J.-P.; VERMOTE, E.F. **Impact of the Revisit of Thermal Infrared Remote Sensing Observations on Evapotranspiration Uncertainty—A Sensitivity Study Using AmeriFlux Data**. *Remote Sensing*. **2019**, 11, 573. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/rs11050573>>. Acessado em Janeiro de 2021.
19. HEINEMANN, S.; SIEGMANN, B.; THONFELD, F.; MURO, J.; JEDMOWSKI, C.; KEMNA, A.; KRASKA, T.; MULLER, O.; SCHULTZ, J.; UDELHOVEN, T.; WILKE, N.; RASCHER, U. **Land Surface Temperature Retrieval for Agricultural Areas Using a Novel RPA Platform Equipped with a Thermal Infrared and Multispectral**. *Sensor. Remote Sensing*. **2020**, 12, 1075. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/rs12071075>>. Acessado em: Janeiro de 2021.
20. HENDEL, I.G; ROSS, G.M; **Efficacy of Remote Sensing in Early Forest Fire Detection: A Thermal Sensor Comparison**. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2020, Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/07038992.2020.1776597>>. Acessado em Janeiro de 2021.
21. JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente**. 2. ed. São José dos Campos: Parêntese, 2009.
22. KASVI. **Manual de Instruções**. 2015.
23. KELLY, J.; KLJUN, N.; OLSSON, P.-O.; MIHAI, L.; LILJEBLAD, B.; WESLIEN, P.; KLEMEDTSSON, L.; EKLUNDH, L. **Challenges and Best Practices for Deriving Temperature Data from an Uncalibrated RPA Thermal Infrared Camera**. *Remote Sensing*. **2019**, 11, 567. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/rs11050567>>. Acessado em Janeiro de 2021.
24. LEE, S.; MOON, H.; CHOI, Y.; YOON, D.K. **Analyzing Thermal Characteristics of Urban Streets Using a Thermal Imaging Camera: A Case Study on Commercial Streets in Seoul, Korea**. *Sustainability*, 2018, 10, 519. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/su10020519>>. Acessado em Janeiro de 2021.
25. LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. M.; CHIPMAN, J.W. **Remote sensing and image**

- interpretation.** 7. ed. New York: Wiley, 2015.
26. LORENZ, D. **Temperature measurements of natural surfaces using infrared radiometers.** *Applied Optics.* v.7, n.9, 1968.
 27. LORENZZETI, J.A. **Princípios Físicos de Sensoriamento Remoto.** 1ªEd. São Paulo: Blucher.2015.
 28. MAGHRABI, A. H. **Ground based measurements of IR atmospheric radiation from Clear and Cloudy Skies.** PhD Thesis, University of Adelaide, Adelaide, Australia. 2007.
 29. MARKOSKI, P. R. **Modelagem atmosférica (8 - 12 µm) de ambientes úmidos aplicada no processo de correção dos dados de emissividade do sensor ASTER.** 2015. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto). UFRGS, Porto Alegre, Rio Grande do Sul. 2015.
 30. MATESE, A.; TOSCANO, P.; DI GENNARO, S.F.; GENESIO, L.; VACCARI, F.P.; PRIMICERIO, J.; BELLI, C.; ZALDEI, A.; BIANCONI, R.; GIOLI, B. **Intercomparison of RPA, Aircraft and Satellite Remote Sensing Platforms for Precision Viticulture.** *Remote Sensing.* 2015, 7, 2971-2990. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/rs70302971>>. Acessado em Janeiro de 2021.
 31. MENEZES, P. R.; ALMEIDA, T. (orgs.) **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto.** Brasília: CNPq, 2012.
 32. MESSINA, G.; MODICA, G. **Applications of RPA Thermal Imagery in Precision Agriculture: State of the Art and Future Research Outlook.** *Remote Sensing.* 2020, 12, 1491. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/rs12091491>>. Acessado em Janeiro de 2021.
 33. MONTGOMERY, D.C; RUNGER, G.C. **Applied Statistic and Probability for Engineers.** 3 ed. New York, 2003.
 34. MORETTIN, L.G. **Estatística Básica: Probabilidade e Inferência.** Volume único. São Paulo, 2010.
 35. MUNARETTO, L. **Vant e Drones – A Aeronáutica ao alcance de todos.** 2 ed. São José dos Campos, 2017.
 36. MUTANI, G.; TODESCHI, V. **The Effects of Green Roofs on Outdoor Thermal Comfort, Urban Heat Island Mitigation and Energy Savings.** *Atmosphere,* 2020, 11, 123. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/atmos11020123>. Acessado em Janeiro de 2021.
 37. NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações.** 4. ed. São Paulo: Blucher, 2010.
 38. NOVO, E.M.L.M.; PONZONI, F.J; **Introdução ao Sensoriamento Remoto.** São José dos Campos. 2001.
 39. NV5 Geospatial. Retirado do site. Acessado em 2023 <

<https://www.13harrisgeospatial.com/docs/FLAASH.html>>.

40. OLIVEIRA, L. T. **Avaliação Do Uso De Sensor Termal A Bordo De Vant Através De Análises Radiométricas, Espectrais, Espaciais E Posicionais**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – INPE, São José dos Campos, São Paulo, 2017. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3NS677H>>. Acesso em Dezembro de 2020.
41. PAJARES, G. **Overview and Current Status of Remote Sensing Applications Based on Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)** . Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol 81, 2015, pp.281-329. < doi: 10.14358/PERS.81.4.281>
42. PIANA, C.F.B; MACHADO, A.A; SELAU,L.P.R. **Estatística Básica**. Versão 2013. Pelotas, 2013.
43. PORTES, M. F. Sensoriamento Remoto Termal usando Veículo Aéreo Não Tripulado na Cafeicultura de Montanha. Dissertação de Mestrado (Engenharia Agrícola). UFV, Viçosa, 2018. Disponível em: <<http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/12459>>. Acessado em Dezembro de 2020.
44. PSICOMETRIA ONLINE, 2022, Retirado da internet. Acessado em 2023.<<https://psicometriaonline.com.br/o-que-e-correlacao-de-spearman>>
45. RAHMAN, M.M., ZHANG, W. **Review on estimation methods of the Earth's surface energy balance components from ground and satellite measurements**. Journal of Earth System Science, 2019, 128, 84. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s12040-019-1098-5>>. Acessado em Janeiro de 2021.
46. SCHOTT, J.R. **Remote Sensing – The Image Chain Approach**. 2 ed. Universidade Press OXFORD, 2007.
47. SPEAK, A.; MONTAGNANI, L.; WELLSTEIN, C.; ZERBE, S. **The influence of tree traits on urban ground surface shade cooling**. Landscape and Urban Planning, 2020, 197. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103748>. Acessado em Janeiro de 2021.
48. VALERO, M.M.; VERSTOCKT, S.; MATA, C.; JIMENEZ, D.; QUEEN, L.; RIOS, O.; PASTOR, E.; PLANAS, E. **Image Similarity Metrics Suitable for Infrared Video Stabilization during Active Wildfire Monitoring: A Comparative Analysis**. Remote Sensing. 2020, 12, 540. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/rs12030540>>. Acessado em: Janeiro de 2021.
49. VILBIG, J.M.; SAGAN, V.; BODINE, C. **Archaeological surveying with airborne LiDAR and RPA photogrammetry: A comparative analysis at Cahokia Mounds**. Journal of Archaeological Science, 33(2020). Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2020.102509>>. Acessado em: Janeiro de 2021.
50. 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.