

Cristiano Lima Hackmann

**A desigualdade de Cauchy-Schwarz na  
estimação de temperatura e emissividade da  
superfície terrestre a partir de dados de  
sensores orbitais**

**Porto Alegre**

**2016**

Cristiano Lima Hackmann

**A desigualdade de Cauchy-Schwarz na estimação de temperatura e emissividade da superfície terrestre a partir de dados de sensores orbitais**

Trabalho submetido ao Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto como requisito para a obtenção do Grau de Doutor em Sensoriamento Remoto pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS  
Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto

Orientador: Profa. Dra. Silvia Beatriz Alves Rolim

Porto Alegre

2016

---

Hackmann, Cristiano Lima

A desigualdade de Cauchy-Schwarz na estimação de temperatura e emissividade da superfície terrestre a partir de dados de sensores orbitais/ Cristiano Lima Hackmann. – Porto Alegre, 2016.

127 p. : il.

Orientador: Profa. Dra. Silvia Beatriz Alves Rolim

Tese – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS  
Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, 2016.

1. Desigualdade de Cauchy-Schwarz. 2. Regressão linear. 3. Método de separação de temperatura e emissividade. 4. Infravermelho termal. 5. Imagens de satélite. I. Rolim, Silvia, orient. II. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. IV. Título

---

Cristiano Lima Hackmann

**A desigualdade de Cauchy-Schwarz na estimação de temperatura e emissividade da superfície terrestre a partir de dados de sensores orbitais**

Trabalho submetido ao Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto como requisito para a obtenção do Grau de Doutor em Sensoriamento Remoto pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 08 de março de 2016:

---

**Profa. Dra. Silvia Beatriz Alves Rolim**  
Orientador

---

**Professor**  
Dr. Adalberto Schuck Jr.

---

**Professor**  
Dr. Atílio Efrain Bica Grondona

---

**Professor**  
Dr. Jorge Ricardo Ducati

Porto Alegre  
2016

# Dedicatória

Aos meus pais, Paulo (*in memoriam*) e Maria Helena por estarem sempre comigo, apoiando, incentivando e orientando todas as minhas decisões.

Às minhas irmãs, Cristina e Priscila pela alegria e afeto que me proporcionam.

À minha esposa, Adriana pelo apoio, carinho, incentivo e compreensão em todos os momentos.

À minha filha, Sofia, o meu maior orgulho.

# Agradecimentos

À orientadora e amiga Silvia Beatriz Alves Rolim, pela incansável dedicação no desenvolvimento desta Tese.

Aos pesquisadores Adalberto Schuck Jr, Atílio Efrain Bica Grondona, Fernando Hepp Pulgati, Jorge Ricardo Ducati e Sidnei João Siqueira Sant'Anna por suas importantes colaborações com ideias e sugestões no desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus colegas de curso, em especial ao Paulo Markoski e Marilei Bender Xavier.

Ao bolsista de iniciação científica Nicolás Petersen Cardoso por colaborar na execução deste trabalho.

Aos professores e funcionários do Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia da UFRGS.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul por propiciar a minha formação profissional.

Aos amigos e colegas do Departamento Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia da UFRGS pelo incentivo na realização da Tese.

À todos os meus familiares pela força, carinho e ajuda em todos os momentos.

*“Nossos ancestrais adoravam o Sol e eles não eram nada bobos.  
Reverenciar o Sol e as estrelas é uma boa ideia, porque somos seus filhos.  
O silício das rochas, o oxigênio do ar, o carbono em nosso DNA, o ferro  
em nossos arranha-céus, a prata em nossas joias foram todos feitos nas estrelas  
há bilhões de anos.*

*Nosso planeta e nós mesmos somos poeira das estrelas.*

*O que faz os átomos dançarem? Como a energia de uma estrela é transformada em tudo o que acontece no mundo?*

*O que é energia? Estamos envolvidos nela. Quando os átomos de hidrogênio se fundem dentro do Sol fazem átomos de hélio, e essa fusão emite uma explosão de energia que pode vagar dentro do Sol por 10 milhões de anos. Antes de subir a superfície.*

*E uma vez lá está livre para voar direto do Sol para a Terra. Como luz visível.*

*Se atingir a superfície de uma folha será armazenada na planta como energia química.*

*Da luz solar direto para o vinho.*

*....*

*Saúde.*

*Sinto o meu cérebro transformando a energia química do vinho em energia elétrica dos meus pensamentos. E direcionando as minhas cordas vocais para produzir energia acústica da minha voz.*

*Tais transformações de energia acontecem em todos os lugares o tempo todo.*

*A energia de nossa estrela direciona o vento e as ondas e a vida ao nosso redor.*

*Somos sortudos por termos esta vasta fonte de energia limpa caindo do céu sobre todos nós.”*

## Resumo Tese

Todo objeto acima do zero absoluto ( $0\text{ K}$ ) emite radiação infravermelha. O planeta Terra tem uma temperatura média de  $300\text{ K}$  e seu pico de emitância eletromagnética situa-se dentro do domínio do infravermelho termal (TIR). Dados deste domínio podem ser coletados por sensores instalados em satélites com o intuito de analisar alvos da superfície da Terra em escala local ou global. Esses sensores captam a radiação no TIR e desta radiação, duas grandezas físicas podem ser recuperadas: temperatura da superfície terrestre (TST) e emissividade da superfície terrestre (EST). A TST é um dos principais parâmetros na dinâmica dos fenômenos climáticos e a EST é um parâmetro importante na identificação de diversos tipos de materiais. Dados de temperatura e emissividade não são medidos diretamente por sensores orbitais. Juntas, essas variáveis determinam a radiância espectral emitida por uma superfície que pode ser captada por estes sensores. Neste caso, tem-se uma medida (radiância) e duas variáveis (temperatura e emissividade), o que conduz a uma equação sem solução única. Vários métodos foram propostos nas últimas décadas e cada técnica tem um conjunto de restrições que deve ser observado a fim de gerar resultados confiáveis. No presente trabalho, dois algoritmos foram propostos para estimar a TST e a EST. A desigualdade de Cauchy-Schwarz é empregada nos métodos desenvolvidos, tratando o problema de estimação dos parâmetros terrestres como uma comparação entre vetores, que correspondem a valores de radiância de imagens do subsistema TIR/ASTER e de assinaturas espectrais de experimentos realizados em laboratório. Um dos métodos acrescenta uma etapa no processamento de dados, em que é aplicado regressão linear para um polinômio do 2º grau entre produtos internos (eixo das ordenadas) e temperaturas (eixo das abscissas). Neste caso, a nova estimativa para temperatura será a abscissa do vértice. Os algoritmos foram testados em dados simulados de temperatura e emissividade obtidos em laboratório de um mineral de quartzo livre de impurezas e com uma assinatura espectral conhecida, associada à ligação  $Si - O$  na região do TIR. Além disso, os algoritmos foram aplicados em dados de radiância captados pelo sensor ASTER. Os resultados obtiveram desempenho satisfatório levando em conta as características de heterogeneidade do banco de dados experimental e da interferência dos gases atmosféricos.

# Abstract

Any object above absolute zero ( $0\text{ K}$ ) emit infrared radiation. The planet Earth has an average temperature of  $300\text{ K}$  and its peak of electromagnetic emittance lies within the domain of thermal infrared (TIR). Sensors in satellites can collect this domain data in order to analyze the Earth's surface targets in local or global scale. These sensors capture radiation in TIR and from this radiation, two physical quantities can be retrieved: land surface temperature (LST) and land surface emissivity (LSE). The TST is one of the main parameters in the dynamics of climatic phenomena and the EST is an important parameter in the identification of various types of materials. Satellite sensors do not directly measure temperature and emissivity data. Together, these variables determine the spectral radiance emitted by a surface that can be captured by these sensors. In this case, one has a measure (radiance) and two variables (temperature and emissivity), leading to a mathematical problem no single solution. Together, these variables determine the spectral radiance emitted by a surface that can be captured by these sensors. In this case, there is a measure (radiance) and two variables (temperature and emissivity), leading to an equation with no single solution. Several methods have been proposed in recent decades and each technique has a set of restrictions that must be observed in order to generate reliable results. In this study, two algorithms have been proposed to estimate the TST and EST. Cauchy-Schwarz inequality is used in methods developed by treating the problem of estimating terrestrial parameters as a comparison between vectors, corresponding to values of radiance of TIR/ASTER subsystem and spectral signatures of experiments performed in the laboratory. One method adds a step in the data processing, wherein regression is applied to a polynomial of 2nd degree between inner products (ordinate axis) and temperature (abscissa axis). In this case, the new estimate for temperature is the abscissa of the vertex. The algorithms were tested on simulated data of temperature and emissivity obtained in the laboratory of a quartz mineral free of impurities and with a known spectral signature, associated with the  $Si - O$  bond in the TIR domain. Moreover, the algorithms have been applied in radiance data captured by the sensor ASTER. The results achieved satisfactory performance taking into account the characteristics of the experimental database heterogeneity and the interference of atmospheric gases.

# Sumário

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Introdução</b>  | <b>17</b> |
| <b>1 Objetivos</b>   | <b>21</b> |
| 1.1 Objetivo Geral   | 21        |
| 1.2 Objetivos Específicos  | 21        |
| <b>I Apresentação do Cenário</b>   | <b>22</b> |
| <b>2 A região de estudo</b>  | <b>23</b> |
| <b>3 A atmosfera</b>   | <b>25</b> |
| 3.1 Janelas Atmosféricas   | 26        |
| <b>4 O sensor ASTER</b>  | <b>27</b> |
| 4.1 Dados do ASTER L1A e L1B   | 27        |
| 4.2 Produtos do Sensor ASTER: AST05 e AST08  | 28        |
| 4.3 Coeficientes de Conversão  | 29        |
| 4.4 Função resposta do sensor  | 29        |
| <b>II Fundamentação Teórica</b>  | <b>30</b> |
| <b>5 Leis da radiação termal</b>   | <b>31</b> |
| 5.1 Radiância  | 31        |
| 5.2 Corpo negro  | 32        |
| 5.3 Lei de Stefan-Boltzmann  | 32        |
| 5.4 Lei de Wien  | 33        |
| 5.5 Emissividade   | 34        |
| 5.6 Temperatura Radiométrica   | 35        |
| <b>6 Aproximações para a Equação de Transferência Radiativa</b>                          | <b>36</b> |
| 6.1 Modelo de transferência radiativa  | 36        |
| 6.1.1 Reamostragem dos dados   | 38        |
| 6.1.2 Suposições do modelo   | 38        |
| 6.2 Correção Atmosférica   | 38        |
| 6.2.1 Parâmetros atmosféricos  | 39        |
| <b>7 Restrições na recuperação da temperatura e emissividade da superfície terrestre</b> | <b>41</b> |
| 7.1 Efeito da atmosfera  | 41        |
| 7.2 Número de variáveis versus o número de medidas                                       | 43        |
| 7.3 Medidas correlacionadas  | 43        |
| 7.4 Parâmetros atmosféricos  | 44        |

|                                      |  |           |
|--------------------------------------|--|-----------|
| 7.5                                  | Definição de temperatura . . . . .   | 44        |
| 7.6                                  | Validação dos dados . . . . .  | 44        |
| <b>8</b>                             | <b>Uma nova abordagem para o problema de separação de temperatura e emissividade . . . . .</b> | <b>46</b> |
| 8.1                                  | Desigualdade de Cauchy-Schwarz . . . . .   | 46        |
| 8.1.1                                | Matrizes como funções lineares . . . . .   | 48        |
| 8.1.2                                | Tipos de matriz . . . . .  | 48        |
| 8.1.3                                | Espaços vetoriais . . . . .  | 48        |
| 8.2                                  | Análise dos Erros de Quantização . . . . .   | 52        |
| <br><b>III Materiais e Métodos</b>   |  | <b>57</b> |
| <b>9</b>                             | <b>Materiais . . . . .</b>   | <b>58</b> |
| 9.1                                  | Alvo de estudo: Quartzo (Silicato) . . . . .   | 58        |
| 9.1.1                                | Feição Reststrahlen . . . . .  | 59        |
| 9.2                                  | Imagens TIR/ASTER . . . . .  | 60        |
| 9.3                                  | MATLAB . . . . .   | 60        |
| <b>10</b>                            | <b>Métodos . . . . .</b>   | <b>61</b> |
| 10.1                                 | Algoritmos: etapas básicas . . . . .   | 61        |
| 10.2                                 | Algoritmo 1: Cauchy-Schwarz . . . . .  | 62        |
| 10.3                                 | Algoritmo 2: Cauchy-Schwarz + regressão linear . . . . .                                       | 67        |
| <b>11</b>                            | <b>Experimentos . . . . .</b>  | <b>69</b> |
| 11.1                                 | Experimento A: Dados simulados . . . . .   | 69        |
| 11.1.1                               | Dados do sensor ASTER: Simulação . . . . .   | 70        |
| 11.1.2                               | Banco de dados: Simulação . . . . .  | 71        |
| 11.1.3                               | Execução dos algoritmos propostos . . . . .  | 74        |
| 11.2                                 | Experimento B: Dados Reais . . . . .   | 75        |
| 11.2.1                               | Dados do sensor ASTER . . . . .  | 75        |
| 11.2.2                               | Banco de dados . . . . .   | 76        |
| 11.2.3                               | Execução dos algoritmos propostos . . . . .  | 76        |
| <br><b>IV Resultados e Discussão</b> |  | <b>77</b> |
| <b>12</b>                            | <b>Resultados . . . . .</b>  | <b>78</b> |
| 12.1                                 | Resultados do experimento A: algoritmo 1 . . . . .   | 78        |
| 12.2                                 | Resultados do experimento A: algoritmo 2 . . . . .   | 80        |
| 12.3                                 | Discussão do experimento A . . . . .   | 84        |
| 12.4                                 | Resultados do experimento B: algoritmo 1 . . . . .   | 85        |
| 12.5                                 | Resultados do experimento B: algoritmo 2 . . . . .   | 86        |
| 12.6                                 | Discussão do experimento B . . . . .   | 87        |

|  |            |
|--|------------|
| <b>Conclusões</b> . . . . .                                      | <b>89</b>  |
| <b>Referências</b> . . . . .                                     | <b>91</b>  |
| <b>Apêndices</b>   | <b>95</b>  |
| <b>APÊNDICE A Símbolos do Fluxogramas</b> . . . . .              | <b>96</b>  |
| <b>APÊNDICE B Função Resposta: Subistema TIR/ASTER</b> . . . . . | <b>97</b>  |
| <b>APÊNDICE C Método dos mínimos quadrados</b> . . . . .         | <b>98</b>  |
| C.1 Polinômio de primeiro grau . . . . .                         | 98         |
| C.2 Polinômio de segundo grau . . . . .                          | 101        |
| <b>APÊNDICE D Códigos-Fonte (Matlab)</b> . . . . .               | <b>104</b> |

# Lista de ilustrações

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 – Localização da região de estudo, imagem ASTER composição falsa-cor R5G2B1 datada de 26/09/2000 . . . . .  | 23 |
| Figura 2 – Janelas atmosféricas no espectro eletromagnético. Fonte: (JENSEN et al., 2011) . . . . .  | 26 |
| Figura 3 – O Sol representa a fonte inicial da energia eletromagnética registrada pelos sistemas de SR (Fonte: (JENSEN et al., 2011)) . . . . .  | 31 |
| Figura 4 – Radiância medida em $Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$ (Adaptado de (JENSEN et al., 2011)) . . . . .  | 32 |
| Figura 5 – Curva de radiação de corpo negro para diversas temperaturas (JENSEN et al., 2011). . . . .  | 33 |
| Figura 6 – Emissividade de um corpo negro, de um corpo cinza e de um radiador seletivo hipotético (JENSEN et al., 2011). . . . .   | 34 |
| Figura 7 – Ilustração da equação de transferência radiativa (6.2) na regiões do infravermelho. $\theta_s$ é o ângulo zenital solar. $\varepsilon_i$ e $T_s$ são a emissividade e temperatura da superfície, respectivamente, no canal $i$ . $\rho_{b_i}$ é a reflectividade bidirecional da superfície. $E_i$ é a irradiância solar do canal $i$ no TOA. $B_i(T)$ é a radiância do canal de um corpo negro na temperatura $T$ . $\tau_i$ é a transmitância do canal da atmosfera. $R_{at_i} \uparrow$ e $R_{sl_i} \downarrow$ são radianças atmosféricas ascendentes e descendentes, respectivamente. $R_{sl_i} \uparrow$ e $R_{sl_i} \downarrow$ são as radiações solares difusas ascendentes e descendentes, respectivamente, resultante do espalhamento atmosférico das radianças solares (adaptado de (LI, 2014)). . . . . | 37 |
| Figura 8 – Efeito de diferentes atmosferas na recuperação da TST. Onde $W$ é a coluna de vapor d’água na atmosfera, e $T_a(0)$ é a temperatura do ar próximo a superfície. Adaptado de (LI, 2014). . . . .   | 42 |
| Figura 9 – ângulo entre dois vetores . . . . .   | 52 |
| Figura 10 – Quantizador com espaçamentos uniformes para as variáveis dependente e independente. Adaptado de (OPPENHEIM et al., 1998). . . . .  | 53 |
| Figura 11 – Modelo de ruído aditivo para o quantizador. Adaptado de (OPPENHEIM et al., 1998). . . . .  | 54 |
| Figura 12 – Função densidade de probabilidade para o erro de quantização. Adaptado de (OPPENHEIM et al., 1998). . . . .  | 55 |
| Figura 13 – Assinatura espectral do quartzo para temperatura de 16,3C e os valores de radiância reamostrados para o ASTER. . . . .   | 59 |
| Figura 14 – Fluxograma genérico dos algoritmos propostos. . . . .  | 62 |
| Figura 15 – Fluxograma referente ao algoritmo 1 . . . . .  | 62 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 16 – Representação de uma imagem multiespectral com cinco bandas. Adaptado de < <a href="http://www.ok.ctrl.titech.ac.jp/res/MSI/MSI_e.html">http://www.ok.ctrl.titech.ac.jp/res/MSI/MSI_e.html</a> > . . . . . | 63 |
| Figura 17 – Fluxograma referente ao algoritmo 2 . . . . .  | 67 |
| Figura 18 – Assinaturas espectrais do quartzo para quatro temperaturas fixas. O asterisco refere-se ao valor da radiância para o comprimento de onda central das bandas do ASTER. . . . .                              | 71 |
| Figura 19 – Assinaturas espectrais do quartzo reamostradas para o subsistema TIR/ASTER. . . . .  | 71 |
| Figura 20 – Valores de radiância por temperatura da amostra de quartzo reamostrados para cada banda do sensor ASTER com sua respectiva regressão linear. . . . .   | 72 |
| Figura 21 – Simulação da radiância captada para as bandas do ASTER para 2001 temperaturas diferentes. . . . .  | 73 |
| Figura 22 – BD gerado por regressão linear e reamostrados para as bandas do ASTER. O espaçamento entre as temperaturas é de 10C. . . . .   | 74 |
| Figura 23 – Radiância dos 13 pixels de quartzo sem correção atmosférica. A legenda indica a temperatura de cada pixel. . . . .   | 75 |
| Figura 24 – Radiância dos 13 pixels de quartzo com correção atmosférica para o clima da região. A legenda indica a temperatura de referência de cada pixel. . . . .  | 76 |
| Figura 25 – Diferença entre a temperatura real e a temperatura estimada pelo algoritmo 1 para dois bancos de dados simulados. Os círculos da Figura (a) mostram duas temperaturas em que ocorrem erro máximo. . . . .  | 79 |
| Figura 26 – Temperatura real e temperatura estimada pelo algoritmo 1 com $\Delta = 1$ para o espaçamento entre as temperaturas. A diferença entre elas resulta na Figura (25(a)). . . . .                              | 80 |
| Figura 27 – Dois resultados do algoritmo 2 aplicado no experimento A com $\Delta = 1$ para o espaçamento entre as temperaturas. . . . .  | 81 |
| Figura 28 – Diferença entre a temperatura real e a temperatura estimada pelo algoritmo 2 para dois bancos de dados simulados. . . . .  | 83 |
| Figura 29 – Diferença entre a temperatura de referência e a temperatura estimada pelo algoritmo 1 para o experimento B. . . . .  | 85 |
| Figura 30 – Diferença entre a temperatura de referência e a temperatura estimada pelo algoritmo 2 para o experimento B. . . . .  | 87 |
| Figura 31 – Distribuição das temperaturas dos 13 pixels do sensor TIR/ASTER e das 4 temperaturas do banco de dados. . . . .  | 87 |

---

Figura 32 – Função Resposta do subsistema TIR/ASTER. Os dados utilizados para desenhar estas funções podem ser encontrados no site: <[https://asterweb.jpl.nasa.gov/content/01\\_mission/03\\_instrument/archive/tir.txt](https://asterweb.jpl.nasa.gov/content/01_mission/03_instrument/archive/tir.txt)> . . . . . 97

Figura 33 – a) Ajuste linear. b) Ajuste quadrático. . . . . 98

# Lista de tabelas

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 – Composição da atmosfera terrestre. Fonte (LIOU, 2002). . . . .  | 25 |
| Tabela 2 – Características do Sensor ASTER . . . . .   | 27 |
| Tabela 3 – Nível Superior de dados obtidos pelo ASTER . . . . .  | 28 |
| Tabela 4 – Coeficientes de unidade de conversão para o produto AST05 . . . . .   | 29 |
| Tabela 5 – Algumas informações sobre os dados de quartzo medidos com espectrorradiômetro em ambiente controlado. Os experimentos que contém um asterisco (*) foram utilizados nos experimentos da Seção (11) . . . . .                                     | 59 |
| Tabela 6 – Coeficientes de determinação ( $r^2$ ) para as regressões lineares. . . . .   | 70 |
| Tabela 7 – Quantidade de temperaturas para cada BD simulado. . . . .   | 73 |
| Tabela 8 – Coordenadas dos 13 pixels utilizados no experimento B com as respectivas temperaturas provenientes do produto AST08. . . . .  | 74 |
| Tabela 9 – Estatística descritiva dos erros do algoritmo 1 aplicado no experimento A. . . . .  | 78 |
| Tabela 10 – Estatísticas descritivas dos erros do algoritmo 2 aplicado no experimento A. . . . .   | 82 |
| Tabela 11 – Desvios-padrão dos erros típicos e dos resultados provenientes da aplicação do algoritmo 2. . . . .  | 82 |
| Tabela 12 – Segunda coluna mostra a razão entre a amplitude do erro do algoritmo 2 pela amplitude do erro do algoritmo 1. E a terceira coluna apresenta a razão do desvio-padrão do erro do algoritmo 2 pelo desvio-padrão do erro do algoritmo 1. . . . . | 83 |
| Tabela 13 – Estatísticas descritivas dos erros do algoritmo 1 aplicado no experimento B. . . . .   | 85 |
| Tabela 14 – Estatísticas descritivas dos erros do algoritmo 2 aplicado no experimento B. . . . .   | 86 |
| Tabela 15 – Temperatura de referência (AST08) e temperatura estimada pelo algoritmo 2 para cada pixel analisado. . . . .   | 86 |
| Tabela 16 – Tabela de símbolos . . . . .   | 96 |

# Lista de abreviaturas e siglas

|          |   |
|----------|---|
| ASTER    | Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer      |
| BD       | Banco de Dados  |
| CEPSRM   | Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia |
| EST      | Emissividade da Superfície Terrestre                                |
| ETR      | Equação da Transferência Radiativa                                  |
| IDE      | Integrated Development Environment                                  |
| LABSRGEO | Laboratório de Sensoriamento Remoto Geológico                       |
| MATLAB   | Matrix Laboratory   |
| MODTRAN  | Moderate Spectral Resolution Atmospheric Transmittance              |
| NASA     | National Aeronautics and Space Administration                       |
| ND       | Números Digitais  |
| NEDT     | Temperatura Diferencial Equivalente de Ruído                        |
| SWIR     | Short Wave Infrared   |
| TES      | Temperature/Emissivity Separation                                   |
| TIR      | Infravermelho Termal  |
| TST      | Temperatura da Superfície da Terra                                  |
| TOA      | Topo da Atmosfera   |
| UFRGS    | Universidade Federal do Rio Grande do Sul                           |
| VNIR     | Visible and Near Infrared   |

# Introdução

A radiação eletromagnética é uma das três formas de transferência de energia. A condução descreve o transporte de calor de um objeto para outro através do contato físico. No processo de convecção, os gases e líquidos podem ser aquecidos. Neste caso, a energia é transportada pelo movimento convectivo do material aquecido. Este princípio também aquece o ar na atmosfera da Terra, usando a energia da sua superfície. Destes três mecanismos, apenas a radiação eletromagnética pode transportar a energia através do vácuo. É esta forma de transporte que permite que a energia do Sol seja interceptada pela Terra (ELACHI; ZYL, 2006).

A transferência de calor por condução da superfície terrestre é um fator importante com respeito ao comportamento deste objeto à entrada periódica do calor proveniente do Sol. Esta condução permite que a superfície absorva a energia do Sol, mudando a sua temperatura. O fato de que a superfície terrestre não está à temperatura de zero absoluto ( $0\text{ K}$ ) significa que a própria superfície irradiará energia eletromagnética. Esta radiação é captada por instrumentos de sensoriamento remoto, o que permite estudar as propriedades térmicas da região de estudo (ELACHI; ZYL, 2006).

A temperatura da superfície da Terra (TST) provê informações importantes sobre a variação temporal e espacial do estado da superfície (LI et al., 2013a) e é de fundamental importância em muitas aplicações, tais como: estudos de ilhas de calor em regiões urbanas (NETZBAND; STEFANOV; REDMAN, 2007; RASHED; JÜRGENS, 2010), detecção de queimadas (KUENZER; DECH, 2013), evapotranspiração (BRUTSAERT, 2013), monitoramento de processos que afetam os recifes de corais (GOODMAN; SAMUEL; STUART, 2013), monitoramento de oceanos e suas possíveis mudanças no clima (FARMER; COOK, 2013).

A temperatura é um dos parâmetros fundamentais na física dos processos da superfície terrestre (LI et al., 2013a). Outro parâmetro indica a composição do material e é denominado de emissividade (LI et al., 2013b). A emissividade da superfície terrestre (EST) fornece informações sobre as condições da cobertura dos solos, além de auxiliar no mapeamento geológico e exploração mineral (JIMÉNEZ-MUÑOZ et al., 2012).

A radiação infravermelha de uma superfície opaca natural se origina dentro de uma fração de milímetro da superfície. Assim, a emissividade é uma função do estado da superfície ou cobertura. Por exemplo, uma fina camada de neve ou vegetação mudará drasticamente a emissividade da superfície do solo (ELACHI; ZYL, 2006).

Recuperar a TST e EST a partir de dados de radiância de sensores orbitais é uma tarefa desafiadora, pois trata-se um problema indeterminado caracterizado por uma função

não-linear destas duas variáveis (LI et al., 2013a). A radiância espectral pode ser definida utilizando-se a função de Planck (Equação 1).

$$B(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 \pi \left( e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)} \quad (1)$$

onde  $B(\lambda, T)$  é a radiância espectral reemitida pelo corpo negro<sup>1</sup> ( $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ ),  $T$  é a temperatura da superfície em Kelvin ( $K$ ),  $\lambda$  é o comprimento de onda ( $\mu m$ ),  $C_1$  é a primeira constante de radiação ( $3,74151 \times 10^{-16} W m^2$ ) e  $C_2$  é a segunda constante de radiação ( $1,43879 \times 10^{-2} m K$ ).

A emissividade  $\varepsilon$  é definida pela razão entre a radiância de um dado material  $R(\lambda, T)$  e a radiância de um corpo negro  $B(\lambda, T)$  sob o mesmo comprimento de onda  $\lambda$  e mesma temperatura  $T$  (Equação 2)

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{R(\lambda, T)}{B(\lambda, T)} \quad (2)$$

Neste caso, para encontrar uma relação entre temperatura ( $T$ ) e emissividade ( $\varepsilon$ ), utiliza-se a função de Planck (Equação 1) e a definição de emissividade (Equação 2).

Como a radiância de um material não pode ser maior do que a radiância de um corpo negro, então a emissividade é um parâmetro adimensional entre zero e um.

Ao combinar as Equações (1) e (2), tem-se a seguinte fórmula:

$$R(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) \frac{C_1}{\lambda^5 \pi \left( e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)} \quad (3)$$

A Equação (3) é uma relação entre as variáveis: radiância do corpo negro, temperatura e emissividade, o que resulta em uma equação indeterminada, pois sendo  $R(\lambda, T)$  a radiância medida pelo sensor, as duas variáveis devem ser determinadas ( $T$  e  $\varepsilon$ ). Assim, a temperatura de um alvo e sua emissividade definem a energia infravermelha que o objeto emitirá. No caso de alvos terrestres, estes dois parâmetros podem ser medidos na faixa do infravermelho termal (TIR) em que a radiação dominante encontra-se aproximadamente entre 3 - 14  $\mu m$  (ELACHI; ZYL, 2006).

Para solucionar o problema da separação da temperatura e emissividade, pesquisadores vêm desenvolvendo algoritmos para estimar esses parâmetros a partir de dados de radiância (GREEN; CRAIG, 1985; BECKER; LI, 1990; HOOK et al., 1992; WATSON, 1992a; WATSON, 1992b; KAHLE; ALLEY, 1992; BECKER; LI, 1995; GILLESPIE; KAHLE; WALKER, 1986; GILLESPIE et al., 1998; GILLESPIE et al., 1999; BARDUCCI;

<sup>1</sup> Um corpo negro é um objeto ideal que absorve toda a radiação que nele incide. Por sua vez, irradia energia dependendo da temperatura do objeto (FARMER; COOK, 2013).

PIPPI, 1996; LI et al., 1999; SOBRINO et al., 2005; GRONDONA, 2015). Vários métodos foram propostos nas últimas décadas e cada técnica tem um conjunto de restrições que deve ser observado a fim de gerar resultados confiáveis.

Antes de atingir o sensor, a radiação emitida é alterada significativamente, devido à interferência dos constituintes da atmosfera. Tal perturbação nos dados é potencializada em atmosferas úmidas (TONOOKA; WATANABE; MINOMO, 2005; TONOOKA; PAL-LUCONI, 2005). Os intervalos do espectro eletromagnético onde a radiação pode propagar através da atmosfera com pouca interferência são chamados janelas atmosféricas. Na região do TIR existem duas janelas atmosféricas, uma na região de 3-4  $\mu\text{m}$  e outra em 8-14  $\mu\text{m}$ , onde a absorção da radiação é mínima e o sinal pode ser recuperado com pouca atenuação. Desta forma, nesta região sensores orbitais são desenvolvidos para operar nestes intervalos a fim de determinar a temperatura e emissividade da superfície da Terra (DASH et al., 2001).

Além da atmosfera, outra fonte de erro nos dados de radiância está relacionada aos instrumentos que compõem o sensor. Os dados coletados na faixa do infravermelho termal são muito sensíveis a estes ruídos. Contudo, os ruídos tornam-se mais evidentes após aplicar algoritmos de separação de temperatura e emissividade, sendo esta a mais afetada pelos ruídos (GILLESPIE et al., 2011). É importante ressaltar que os ruídos não são introduzidos pelos algoritmos, pois não se observam tais perturbações em dados simulados livres de ruídos (JIMÉNEZ-MUÑOZ; SOBRINO; GILLESPIE, 2010).

Assim, para obter produtos de temperatura e emissividade de alta qualidade, é necessário realizar uma correção atmosférica adequada. Além disto, é comum remover ruídos provenientes do sensor de tal forma a preservar a maior quantidade de sinal possível (JIMÉNEZ-MUÑOZ et al., 2012).

Como alternativa aos métodos tradicionais de recuperação de EST e TST, neste trabalho são desenvolvidos dois métodos para estimar estes parâmetros a partir de dados de radiância de sensores orbitais. Foram utilizados dados do *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER), a bordo do satélite EOS-Terra, com um subsistema na região do TIR que registra dados em cinco bandas (ABRAMS; HOOK; RAMACHANDRAN, 2002).

Os métodos foram desenvolvidos a partir de algoritmos propostos baseados na desigualdade de Cauchy-Schwarz, tratando o problema de separação de temperatura e emissividade como uma comparação entre vetores, que correspondem a valores de radiância de imagens ASTER e de assinaturas espectrais de experimentos controlados. A dimensão dos vetores do sensor ASTER é igual ao número de bandas de seu subsistema TIR. No caso do espectrorradiômetro  $\mu\text{FT-IR}$  utilizado nos experimentos, os vetores serão reamostrados para o número de bandas do TIR/ASTER. Estes dados reamostrados do  $\mu\text{FT-IR}$  são provenientes de medidas de laboratório em um mineral de quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) submetido a

diferentes temperaturas.

Uma vez que o conjunto de dados experimentais é discretizado, foi aplicada regressão linear para um polinômio do segundo grau entre produtos internos (eixo das ordenadas) e temperaturas (eixo das abscissas). Assim, pode-se obter uma função que relacione estas duas variáveis, sendo que neste caso a variável temperatura não está restrita somente aos valores do experimento, mas a um conjunto contínuo de possibilidades. Dado que a função é de grau dois, a nova estimativa para temperatura será o valor da abscissa do vértice. Este procedimento obteve resultados significativamente melhores quando comparado ao método que utiliza somente a desigualdade de Cauchy-Schwarz.

A fim de testar os algoritmos, foram simulados pixels a partir de dados de emissividade e temperatura obtidos em laboratório de um mineral de quartzo livre de impurezas e com uma assinatura espectral conhecida, associada à ligação  $Si - O$  na região do infravermelho termal. Estes dados são livres de ruídos e não possuem interferência da atmosfera, o que permite recuperar as variáveis  $\varepsilon$  e  $T$ . Além disto, os algoritmos foram aplicados em dados de radiância captados pelo sensor ASTER. Os resultados obtiveram desempenho satisfatório levando em conta as características de heterogeneidade do banco de dados experimental e da interferência dos gases atmosféricos.

# 1 Objetivos

## 1.1 Objetivo Geral

Estimar temperatura e emissividade a partir de dados de radiância de imagens de satélite orbitais.

## 1.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver dois métodos de separação de temperatura e emissividade.
- Obter dados hiperespectrais de radiância e emissividade para diferentes temperaturas de um determinado alvo (quartzo).
- Simular as bandas do subsistema TIR/ASTER.
- Aplicar e avaliar os métodos desenvolvidos em dados de laboratório e simulações da assinatura espectral de quartzo.
- Aplicar e avaliar os métodos desenvolvidos em imagens de radiância obtidos pelo subsistema TIR/ASTER para pixels puros de quartzo.

# Parte I

## Apresentação do Cenário

## 2 A região de estudo

A região de estudo compreende a porção sul da bacia vulcanossedimentar do Paraná (Figura 1). Esta região possui extensas unidades vulcânicas sob a forma de sucessões de derrames de lava que possuem uma espessura média de 650 m. Estas sucessões de derrames, que no Brasil são conhecidas como Formação Serra Geral, são formadas por rochas básicas, intermediárias e ácidas. Sua constituição se faz por basaltos e andesi-basaltos toleíticos (mais de 90%), andesitos toleíticos (cerca de 7%) e riolitos e riodacitos (cerca de 3%) (MELFI et al., 1988).

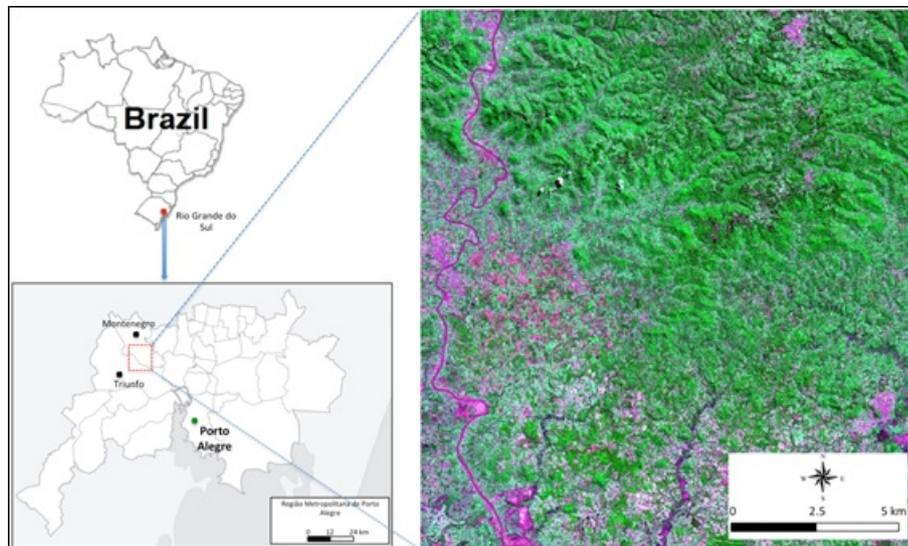


Figura 1 – Localização da região de estudo, imagem ASTER composição falsa-cor R5G2B1 datada de 26/09/2000

Grande parte dessas unidades é composta por minerais máficos, cujo comportamento espectral não apresenta feições de absorção significativas entre as regiões do visível ao infravermelho de ondas curtas. Já na região do TIR alguns minerais, como os silicatos, apresentam frequências associadas a mínimos de emissão produzidos por vibrações de estiramento das ligações  $Si - O$ . Estes mínimos referem-se às feições Reststrahlen que ocorrem na região entre 8 - 12  $\mu m$  e são importantes na detecção e identificação de minerais destas rochas máficas.

Visto que um dos motivos da realização deste trabalho foi obter imagens de temperatura e emissividade com qualidade suficiente para que possam ser empregadas no mapeamento de rochas vulcânicas, foi selecionada uma cena que apresentasse: (1) área com exposição de rochas vulcânicas máficas compatível com a resolução espacial do sensor TIR/ASTER (90 m); (2) dados meteorológicos disponíveis para a modelagem atmosférica;

(3) presença de silicatos ( $SiO_4$ ) nas rochas. Assim, foi selecionada uma imagem ASTER localizada próximo à região metropolitana de Porto Alegre, a qual possui, além do primeiro requisito, dados meteorológicos diários disponíveis fornecidos por estação meteorológica localizada junto ao aeroporto de Porto Alegre.

### 3 A atmosfera

A atmosfera da Terra é, atualmente, composta por dois grupos de gases, um com concentrações quase permanentes e outro com concentrações variáveis. A Tabela (1) relaciona as fórmulas químicas e a relação do volume para as concentrações de gases permanentes e variáveis. Nitrogênio, oxigênio e argônio representam mais de 99,96% do volume da atmosfera (LIOU, 2002).

Tabela 1 – Composição da atmosfera terrestre. Fonte (LIOU, 2002).

| Constituintes Permanentes     |                        | Constituintes Variáveis          |                         |
|-------------------------------|------------------------|----------------------------------|-------------------------|
| Constituinte                  | % em volume            | Constituinte                     | % em volume             |
| Nitrogênio ( $N_2$ )          | 78,084                 | Vapor d'água ( $H_2O$ )          | 0-0,04                  |
| Oxigênio ( $O_2$ )            | 20,948                 | Ozônio ( $O_3$ )                 | $0-12 \times 10^{-4}$   |
| Argônio ( $Ar$ )              | 0,934                  | Dióxido de enxofre ( $SO_2$ )    | $0,001 \times 10^{-4}$  |
| Dióxido de carbono ( $CO_2$ ) | 0,036                  | Dióxido de nitrogênio ( $NO_2$ ) | $0,001 \times 10^{-4}$  |
| Neônio ( $Ne$ )               | $18,18 \times 10^{-4}$ | Amônia ( $NH_3$ )                | $0,004 \times 10^{-4}$  |
| Hélio ( $He$ )                | $5,24 \times 10^{-4}$  | Óxido nítrico ( $NO$ )           | $0,0005 \times 10^{-4}$ |
| Criptônio ( $Kr$ )            | $1,14 \times 10^{-4}$  |                                  |                         |
| Xênon ( $Xe$ )                | $0,089 \times 10^{-4}$ |                                  |                         |
| Hidrogênio ( $H_2$ )          | $0,5 \times 10^{-4}$   |                                  |                         |
| Metano ( $CH_4$ )             | $1,7 \times 10^{-4}$   |                                  |                         |

Os constituintes atmosféricos interagem com a radiação eletromagnética em toda a região do TIR como um resultado de processos rotacionais e vibracionais das moléculas (ELACHI; ZYL, 2006). Durante o processo de aquisição dos dados, os valores da radiação, que são armazenados em cada pixel, podem ser alterados devido ao efeito que a atmosfera terrestre exerce sobre o sinal captado pelos sensores, principalmente, no TIR (RICHARDS, 2013).

Neste caso, a solução é modelar a distribuição dos gases no momento em que as imagens são captadas a fim de corrigir a interferência da atmosfera (SCHOWENGERDT, 2006). O Capítulo (6) deste trabalho irá apresentar as equações relacionadas a correção do efeito da atmosfera. Deve-se observar que esta perturbação nos dados é potencializada em atmosferas úmidas (GILLESPIE et al., 2011; TONOOKA; WATANABE; MINOMO, 2005; TONOOKA; PALLUCONI, 2005; GRONDONA, 2015; MARKOSKI, 2015), tal como acontece no estado do Rio Grande do Sul.

A atmosfera também contém vários tipos de aerossóis, nuvens e precipitação, que são altamente variáveis no espaço e no tempo (LIOU, 2002). Estes elementos reduzem a quantidade de radiação localmente, o que resulta em uma variação espacial do aquecimento da superfície. Isto manifesta-se em imagens termais com desiguais padrões de quente e

frio, onde as áreas mais frias são tipicamente aqueles nas sombras da nuvem (ELACHI; ZYL, 2006).

### 3.1 Janelas Atmosféricas

A região do infravermelho termal é definida em um intervalo do espectro eletromagnético entre 3 - 14  $\mu m$  aproximadamente. A razão pela qual utiliza-se instrumentos de sensoriamento remoto orbitais para detectar a energia infravermelha nessas regiões é porque a atmosfera permite que uma porção da energia infravermelha seja transmitida da superfície terrestre para os sensores (JENSEN et al., 2011).

Denomina-se de janelas atmosféricas a essas regiões pelas quais a energia passa com alguma absorção. A Figura (2) apresenta as duas janelas no TIR uma entre 3-5  $\mu m$  e a outra entre 8-14  $\mu m$ . As regiões escuras na Figura denotam regiões nas quais a atmosfera absorve a maior parte da energia infravermelha. Denomina-se estas regiões de bandas de absorção. Os principais elementos relacionados ao processo de absorção são: vapor d'água ( $H_2O$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ) e o ozônio ( $O_3$ ) (JENSEN et al., 2011).

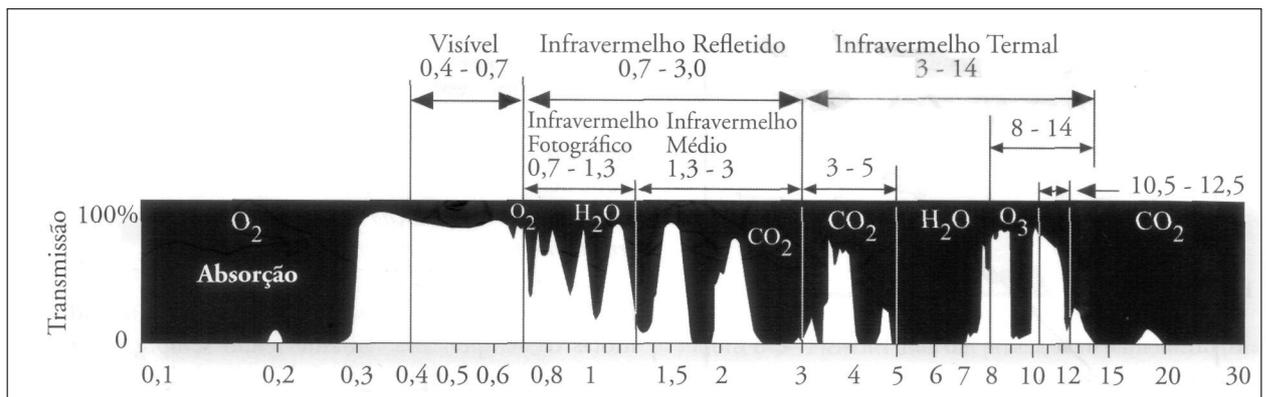


Figura 2 – Janelas atmosféricas no espectro eletromagnético. Fonte: (JENSEN et al., 2011)

## 4 O sensor ASTER

O ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) é um imageador multiespectral Japonês que foi lançado a bordo da plataforma espacial TERRA (NASA) em dezembro de 1999. É um sensor multiespectral de alta resolução espacial que capta temperatura e emissividade da superfície terrestre (JIMÉNEZ-MUÑOZ et al., 2012; GILLESPIE et al., 2011).

Este sensor cobre uma ampla região espectral entre o espectro do visível e o infravermelho termal com alta resolução espacial, espectral e radiométrica. A resolução espacial varia de acordo com o comprimento de onda: 15 metros no visível e no infravermelho próximo (VNIR, do inglês, *visible and near infrared*), 30 metros no infravermelho próximo (SWIR, do inglês, *short wave infrared*), e 90 metros no infravermelho termal (TIR). Cada imagem coberta pelo ASTER atinge uma área de 60 x 60 quilômetros (ABRAMS; HOOK; RAMACHANDRAN, 2002). A Tabela (2) apresenta um resumo das principais características do sensor.

Tabela 2 – Características do Sensor ASTER

| Bandas Espectrais | Resolução Espectral                  | Resolução Espacial | Resolução Temporal | Níveis de Quantização | Faixa Imagemada |
|-------------------|--------------------------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|-----------------|
| VNIR              | 3 bandas: (0,5 - 0,9 $\mu\text{m}$ ) | 15 m               |                    | 8 bits                | 60 km           |
| SWIR              | 6 bandas: (1,6 - 2,5 $\mu\text{m}$ ) | 30 m               | 16 dias            | 8 bits                |                 |
| TIR               | 5 bandas: (8 - 12 $\mu\text{m}$ )    | 90 m               |                    | 12 bits               |                 |

### 4.1 Dados do ASTER L1A e L1B

O sensor ASTER produz dois tipos de dados de nível 1: nível-1A (L1A) e nível-1B (L1B)

Todos os dados coletados são armazenados no nível L1A. Estes arquivos consistem da imagem, coeficientes radiométricos, coeficientes geométricos e outros dados auxiliares sem aplicação dos mesmos nos valores brutos, mantendo assim os valores de dados original. Já os dados de L1B são gerados através da aplicação destes coeficientes para calibração radiométrica e reamostragem geométrica.

O ASTER coleta dados sobre toda a superfície da Terra com a possibilidade de capturar cerca de 650 imagens por dia, que são processados para o arquivo L1A.

Destes, cerca de 150 são processados para o nível-1B. Todos os produtos do ASTER são armazenados em uma implementação específica de formato de dados hierárquico denominado HDF-EOS (ABRAMS; HOOK; RAMACHANDRAN, 2002). Neste trabalho, será utilizado os dados do arquivo L1B para comparar com dados do banco de dados (Seção 10.1).

## 4.2 Produtos do Sensor ASTER: AST05 e AST08

Os produtos do ASTER AST05 (emissividade da superfície) e AST08 (temperatura da superfície) são calculados a partir do espectro de radiância emitido da superfície terrestre. Estes produtos são gerados através do algoritmo de separação de temperatura e emissividade (TES, do inglês, Temperature/Emissivity Separation) desenvolvido por Gillespie e colaboradores (GILLESPIE et al., 1998). Algumas características dos produtos AST05 e AST08 foram detalhadas na Tabela (3)

Tabela 3 – Nível Superior de dados obtidos pelo ASTER

| Produto | Nível | Nome do Parâmetro                  | Modo de Produção | Unidade        | Exatidão Absoluta | Precisão Relativa | Resolução Espacial ( $m$ ) |
|---------|-------|------------------------------------|------------------|----------------|-------------------|-------------------|----------------------------|
| AST05   | 2     | Emissividade da superfície         | 16 dias          | Nenhum         | 0.05 - 0.1        | 0.005             | 90                         |
| AST08   | 2     | Temperatura Cinética da Superfície | 16 dias          | Kelvin ( $K$ ) | 1 - 4K            | 0.3K              | 90                         |

O sinal captado por sensores no TIR é significativamente mais fraco quando comparado com sensores no espectro do visível ou no infravermelho próximo. Além disto, os detectores são geralmente menos sensíveis. Isto conduz a sensores com resolução espacial mais baixa e mais tempo de exposição para aumentar a energia que está sendo captada (ELACHI; ZYL, 2006). As bandas no infravermelho termal do ASTER possuem resoluções espaciais seis vezes menores do que as bandas do visível conforme Tabela (2).

O desempenho de um sistema de imageamento no TIR é normalmente referenciado pela temperatura diferencial equivalente de ruído (do inglês *Noise Equivalent Differential Temperature* - NEDT). O NEDT é a flutuação de temperatura que resultaria em uma relação sinal-ruído de 1. O subsistema TIR do ASTER foi projetado para ter o NEDT menor do que 0,2 K (ABRAMS; HOOK; RAMACHANDRAN, 2002).

Tabela 4 – Coeficientes de unidade de conversão para o produto AST05

| Banda n <sup>o</sup> | Resolução Espectral ( $\mu m$ ) | Comprimento de Onda Central ( $\mu m$ ) | Coeficientes ( $NDW m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ ) |
|----------------------|---------------------------------|---|--|
| 10                   | 8,125 - 8,475                   | 8,3                                     | $6.822 \times 10^{-3}$                           |
| 11                   | 8,475 - 8,825                   | 8,6                                     | $6.780 \times 10^{-3}$                           |
| 12                   | 8,925 - 9,275                   | 9,1                                     | $6.590 \times 10^{-3}$                           |
| 13                   | 10,25 - 10,95                   | 10,6                                    | $5.693 \times 10^{-3}$                           |
| 14                   | 10,95 - 11,65                   | 11,2                                    | $5.225 \times 10^{-3}$                           |

### 4.3 Coeficientes de Conversão

Os dados ASTER nível-1B são disponibilizados em termos de números digitais (ND). Números digitais são números inteiros em escala de quantificação que não é uma grandeza física. O ND pode ser qualquer inteiro no conjunto:

$$ND \in [1, 2^q] \quad (4.1)$$

no qual  $q$  é um número inteiro que representa os bits (LI, 2014).

Para converter ND para radiância, o caso do produto AST05, é utilizado o coeficiente de conversão (definido como radiância por ND). A radiância espectral é expressa pela unidade  $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$  e pode ser obtida, para cada banda, pela seguinte relação:

$$Radi\grave{a}ncia = (ND - 1) \times coef \quad (4.2)$$

onde  $coef$  é o coeficiente de unidade de conversão e pode ser encontrado na Tabela (4).

Para o arquivo AST05 a emissividade pode ser obtida pela seguinte relação:

$$Emissividade = ND \times 10^{-3} \quad (4.3)$$

### 4.4 Função resposta do sensor

Os instrumentos de medição não costumam registrar os valores espectrais de radiância, mas um valor ponderado ao longo de um determinado intervalo de comprimento de onda. Tal intervalo é denominado de banda ou canal. Além disso, a resposta do sensor não é a mesma para todas as bandas, pois isto é determinado pelos valores relativos a um filtro denominado de função resposta do sensor. O Apêndice (B) apresenta a função resposta do subsistema TIR/ASTER e a função que define a relação entre o filtro e o valor real da variável será definida no Capítulo (5).

## Parte II

### Fundamentação Teórica

## 5 Leis da radiação termal

Todos os objetos acima do zero absoluto ( $0\text{ K}$ ) emitem energia eletromagnética. O Sol representa a fonte inicial da maior parte da energia eletromagnética registrada pelos sistemas de sensoriamento remoto (JENSEN et al., 2011).

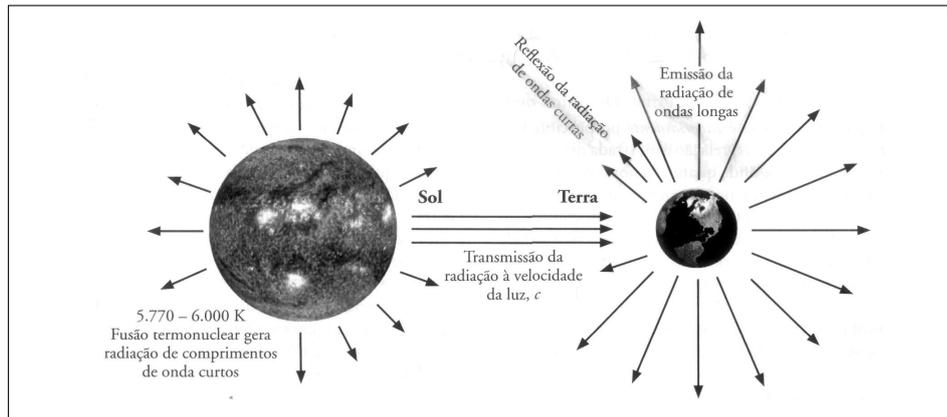


Figura 3 – O Sol representa a fonte inicial da energia eletromagnética registrada pelos sistemas de SR (Fonte: (JENSEN et al., 2011))

Parte desta energia é interceptada pela Terra, onde ela interage com a atmosfera e com os materiais da superfície (Figura 3). A Terra reflete parte desta energia de volta para o espaço exterior ou pode absorver a energia de comprimentos de onda menores e então reemitir-la em comprimentos de onda maiores (JENSEN et al., 2011). Esta energia reemitida pela Terra pode ser captada por sensores instalados em satélites com o intuito de analisar alvos da superfície da Terra (JENSEN et al., 2011). Estes sensores remotos têm a capacidade de gravar a radiação no TIR. Desta radiação, duas grandezas físicas podem ser estimadas: temperatura ( $T$ ) e emissividade ( $\varepsilon$ ).

Algumas definições importantes para o desenvolvimento deste trabalho serão apresentadas a seguir.

### 5.1 Radiância

A radiância  $R$  é uma medida da quantidade de radiação que atravessa um determinado ângulo sólido<sup>1</sup> ( $\Omega$ ), numa direção específica ( $\cos \theta$ ). É definida pelo fluxo radiante<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ângulo sólido é definido por uma determinada área dividida pelo quadrado do raio da esfera (LI, 2014).

<sup>2</sup> Fluxo radiante, também chamado de energia radiante é a medida do total energia de radiação eletromagnética (LI, 2014).

( $\Phi$ ) por unidade de ângulo sólido por unidade de uma área-fonte projetada em uma determinada direção (Figura 4). A unidade da radiância é  $Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$  (LI, 2014).

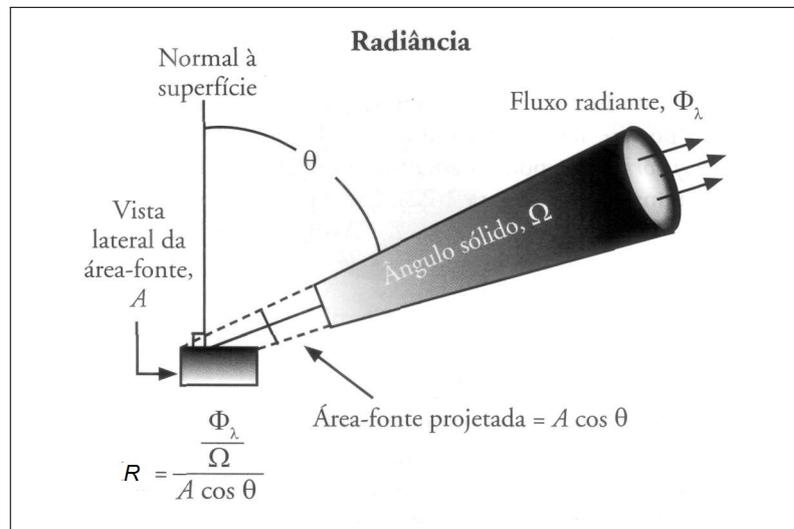


Figura 4 – Radiância medida em  $Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$  (Adaptado de (JENSEN et al., 2011))

## 5.2 Corpo negro

Um corpo negro é uma entidade teórica que absorve toda a radiação que o atinge e radia energia na máxima taxa possível por unidade de área em cada comprimento de onda para uma dada temperatura Equação (1). Nenhum objeto da natureza é um corpo negro verdadeiro, porém, pode-se tomar o Sol como se aproximando de um corpo negro a 6.000  $K$  e a Terra como um corpo negro a 300  $K$ .

Se direcionar um sensor para um corpo negro pode-se registrar a quantidade total de energia radiante, por comprimento de onda, emanando do objeto (lei de Stefan-Boltzmann), além do comprimento de onda dominante para o objeto (lei de Wien).

## 5.3 Lei de Stefan-Boltzmann

Integrando a radiância emitida (Equação 1) ao longo de todo o espectro obtém-se uma expressão para o fluxo total emitido por um corpo negro em unidade de área. Este resultado é conhecido como a lei de Stefan-Boltzmann, e é definida da seguinte forma

$$M(T) = \pi \int_0^\infty B_\lambda(T) d\lambda = \sigma T^4 \quad (5.1)$$

em que  $M$  é a radiância radiante emitida, e  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann ( $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} Wm^{-2}K^{-4}$ ).

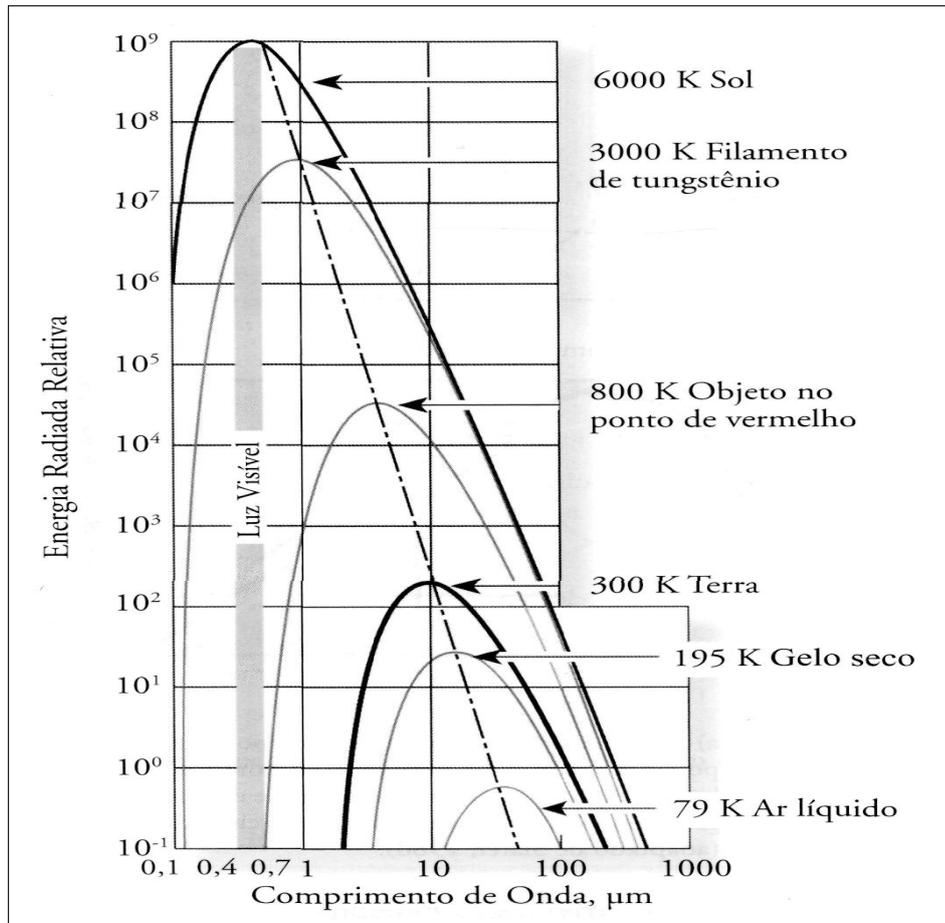


Figura 5 – Curva de radiação de corpo negro para diversas temperaturas (JENSEN et al., 2011).

## 5.4 Lei de Wien

Diferenciando a Equação (1) em relação ao comprimento de onda e resolvendo para encontrar o máximo tem-se a lei de Wien, que retorna o comprimento de onda da radiação máxima emitida para uma dada temperatura:

$$\lambda_{max} = \frac{2,898 [\mu m K]}{T}, \quad (5.2)$$

onde  $T$  é a temperatura em Kelvin (KUENZER; DECH, 2013).

Observa-se um deslocamento dos maiores para os menores comprimentos de onda à medida que a temperatura do corpo negro aumenta (Figura 5). O comprimento de onda dominante fornece uma informação importante quanto à parte do espectro eletromagnético que deve ser escolhida para observar remotamente um objeto.

Se o objeto de interesse for solo, água ou rochas à temperatura ambiente da superfície da Terra (300 K) com um comprimento de onda dominante de  $9,67 \mu m$ , então um detector de infravermelho termal operando na região de 8 - 14  $\mu m$  é mais apropriado.

No caso de procurar por focos de incêndios florestais a 800 K, o comprimento de onda dominante encontra-se em 3,62  $\mu\text{m}$  aproximadamente. Então o sistema de sensoriamento remoto mais apropriado pode ser um detector no TIR de 3 - 5  $\mu\text{m}$  (JENSEN et al., 2011).

## 5.5 Emissividade

Para muitos objetos encontrados na natureza, a emissividade não é uma curva suave, mas contém linhas espectrais que caracterizam os constituintes do corpo. Na região do infravermelho termal, há um número de linhas de absorção associada com bandas de energia vibracional fundamental e sobretudo (ELACHI; ZYL, 2006). Neste caso, objetos como: rocha, solo, vegetação e água, emitem uma certa proporção da energia emitida por um corpo negro à uma determinada temperatura.

Assim, define-se emissividade ( $\varepsilon$ ) como a razão entre a radiância emitida por um corpo ( $R$ ), por um corpo negro à mesma temperatura ( $B$ ), conforme a expressão (2). Todos os corpos têm emissividades variando entre zero e um, e que esta emissividade pode variar em relação ao comprimento de onda e a temperatura.

A Figura 6 mostra a emissividade de um corpo negro, de um corpo cinza e de um radiador seletivo hipotético em todo o intervalo espectral de 0,1 - 100  $\mu\text{m}$ .

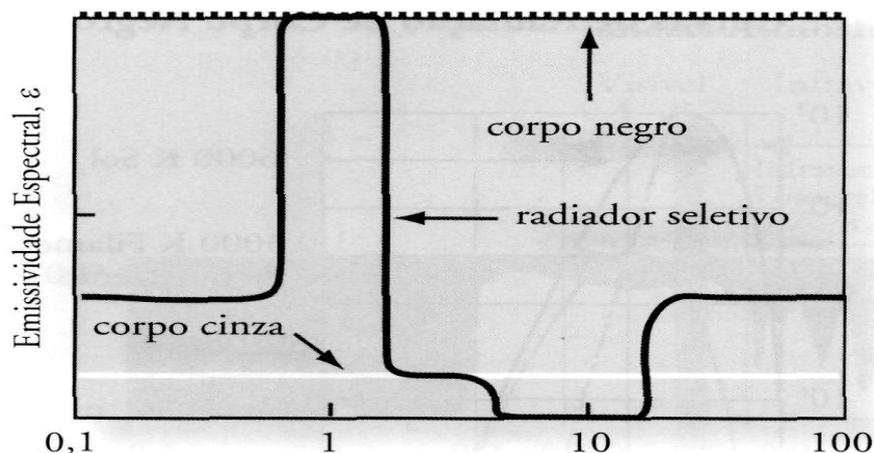


Figura 6 – Emissividade de um corpo negro, de um corpo cinza e de um radiador seletivo hipotético (JENSEN et al., 2011).

Conforme apresentado na introdução deste trabalho, combinar a lei de Planck com a definição de emissividade resulta na relação entre radiância ( $R$ ), temperatura ( $T$ ) e emissividade ( $\varepsilon$ ) expressa pela Equação (3). Assim, para obter a emissividade a partir da

radiância e da temperatura, pode-se isolar a Equação (3) da seguinte forma:

$$\varepsilon(\lambda, T) = R(\lambda, T) \frac{\lambda^5 \pi \left( e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)}{C_1}. \quad (5.3)$$

As variáveis são definidas da mesma forma que na lei de Planck.

## 5.6 Temperatura Radiométrica

A temperatura radiométrica ( $T$ ) é definida a partir da radiância ( $R$ ), emitida por uma superfície. Se  $\varepsilon$  é a emissividade do alvo, a temperatura é definida, formalmente, pela inversa da Equação (3) da seguinte forma:

$$T = \frac{C_2}{\lambda \ln \left( \frac{\varepsilon C_1}{\lambda^5 R} + 1 \right)} \quad (5.4)$$

em que as variáveis são definidas da mesma forma que na lei de Planck. Esta temperatura está relacionada a radiação emitida dentro de uma fração de profundidade da superfície (LI, 2014).

### Outras definições de temperatura

Além da temperatura radiométrica apresentada na Equação (5.4), pode-se encontrar outras definições para temperatura, tais como:

- Temperatura termodinâmica: É definida para um meio em equilíbrio térmico conforme a segunda lei da termodinâmica. Pode ser medida diretamente com um termômetro. Temperaturas radiométricas e termodinâmicas são equivalentes para medir a temperatura da superfície. No entanto, para superfícies heterogêneas e não-isotérmicas, estas definições são diferentes, e a temperatura medida por um radiômetro não é igual à temperatura medida por um termômetro (LI, 2014).
- Temperatura de brilho ( $T_b$ ): É definida matematicamente pela seguinte equação

$$T_b = B^{-1} \left[ \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} g_i(\lambda) R_\lambda d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} g_i(\lambda) d\lambda} \right] \quad (5.5)$$

onde  $g_i(\lambda)$  é a função resposta do canal  $i$ ;  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  são os limites inferior e superior do canal.

## 6 Aproximações para a Equação de Transferência Radiativa

Este Capítulo descreve um modelo matemático de transferência radiativa na atmosfera para a região do TIR. Esta equação da transferência radiativa (ETR) deve descrever a transmissão de energia, na forma de radiação eletromagnética, da superfície da Terra até o TOA. Além de levar em consideração as características de aquisição dos dados pelo sensor.

### 6.1 Modelo de transferência radiativa

Um sensor infravermelho a bordo de um satélite que coleta dados da Terra mede a radiação da superfície terrestre e sua atmosfera. Estes dados são captados dentro de um campo de visada para determinadas larguras de banda (LI, 2014).

Assumindo uma atmosfera livre de nuvens sob equilíbrio termodinâmico e uma superfície plana, como ilustrado na Figura (7), a radiação infravermelha captada pelo sensor ( $R_{s_i}$ ) no topo da atmosfera (TOA), para um determinado canal ( $i$ ), pode ser descrito aproximadamente da seguinte forma

$$R_{s_i}(\theta, \varphi) = \underbrace{R_{g_i}(\theta, \varphi)\tau_i(\theta, \varphi)}_{\text{radiação da superfície atenuada pela atmosfera}} + \underbrace{R_{at_i\uparrow}(\theta, \varphi)}_{\text{emissão atmosférica}} + \underbrace{R_{sl_i\uparrow}(\theta, \varphi)}_{\text{espalhamento atmosférico}} \quad (6.1)$$

em que  $R_{g_i}$  é a radiância observada no canal  $i$  ao nível do solo dado por

$$R_{g_i}(\theta, \varphi) = \underbrace{\varepsilon_i(\theta, \varphi)B_i(T_s)}_{\text{Emissão da superfície}} + \underbrace{[1 - \varepsilon_i(\theta, \varphi)]R_{at_i\downarrow}}_{\text{Emissão da atmosfera descendente refletida na superfície}} + \underbrace{[1 - \varepsilon_i(\theta, \varphi)]R_{sl_i\downarrow}}_{\text{Espalhamento atmosférico descendente refletida na superfície}} + \underbrace{\rho_p b_i(\theta, \varphi, \theta_s, \varphi_s)E_i \cos(\theta_s)\tau_i(\theta_s, \varphi_s)}_{\text{Energia solar descendente refletida na superfície}} \quad (6.2)$$

onde  $\theta$  e  $\varphi$  representam os ângulos de visada zenital e azimutal, respectivamente. Por simplicidade, estes ângulos serão ignorados nas expressões seguintes.  $\tau_i$  é a transmitância da atmosfera no canal  $i$ .  $R_{g_i}\tau_i$  é a radiância observada ao nível do solo atenuada pela atmosfera (caminho ①).  $R_{at_i\uparrow}$  é a radiância térmica da atmosfera ascendente (caminho ②).  $R_{sl_i\uparrow}$  é a radiância solar difusa ascendente resultante do espalhamento atmosférico da radiância solar (caminho ③).  $\varepsilon_i$  e  $T_s$  são a emissividade e a temperatura da superfície, respectivamente, no canal  $i$ .  $\varepsilon_i B_i(T_s)$  representa a radiação emitida diretamente pela superfície (caminho ④).  $R_{at_i\downarrow}$  é a radiância térmica da atmosfera descendente.  $R_{sl_i\downarrow}$  é a

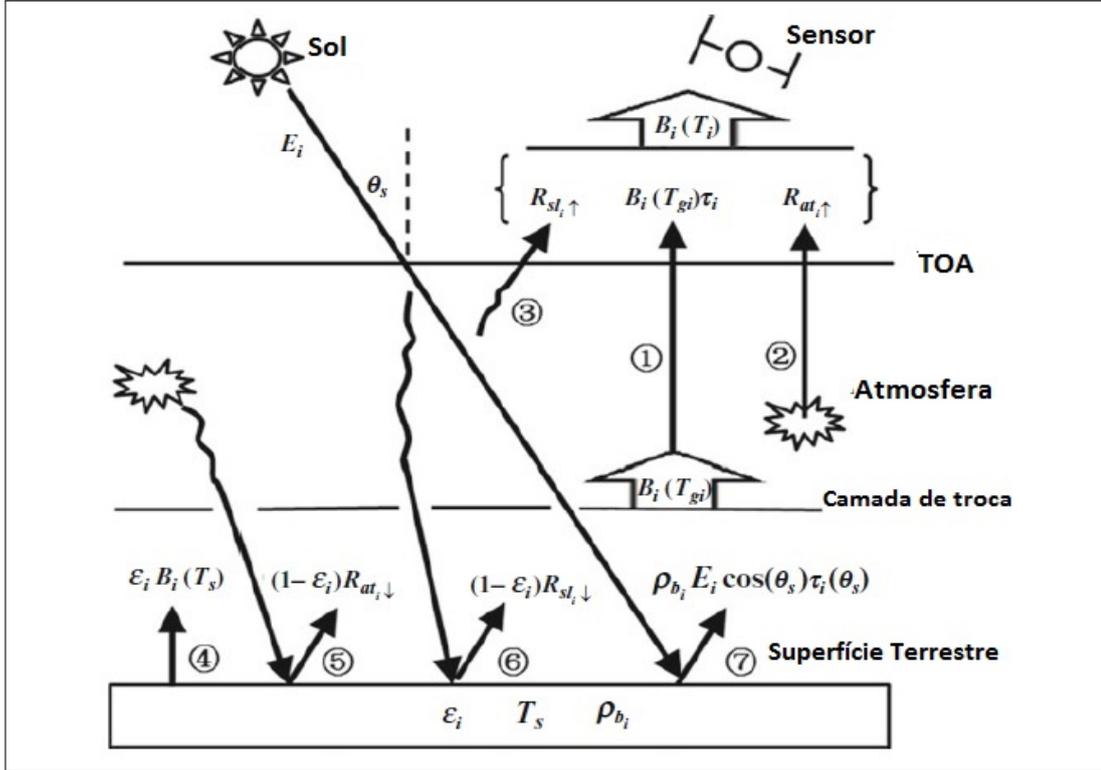


Figura 7 – Ilustração da equação de transferência radiativa (6.2) na regiões do infravermelho.  $\theta_s$  é o ângulo zenital solar.  $\varepsilon_i$  e  $T_s$  são a emissividade e temperatura da superfície, respectivamente, no canal  $i$ .  $\rho_{b_i}$  é a reflectividade bidirecional da superfície.  $E_i$  é a irradiância solar do canal  $i$  no TOA.  $B_i(T)$  é a radiância do canal de um corpo negro na temperatura  $T$ .  $\tau_i$  é a transmitância do canal da atmosfera.  $R_{at_i} \uparrow$  e  $R_{sl_i} \downarrow$  são radiâncias atmosféricas ascendentes e descendentes, respectivamente.  $R_{sl_i} \uparrow$  e  $R_{sl_i} \downarrow$  são as radiações solares difusas ascendentes e descendentes, respectivamente, resultante do espalhamento atmosférico das radiâncias solares (adaptado de (LI, 2014)).

radiância solar difusa descendente.  $(1 - \varepsilon_i)R_{at_i}$  e  $(1 - \varepsilon_i)R_{sl_i}$  representam a radiação térmica atmosférica descendente e a radiação solar difusa refletida pela superfície ( caminhos 5 e 6), respectivamente.  $\rho_{b_i}$  é a reflectividade bidirecional da superfície.  $E_i$  é a irradiância solar no TOA.  $\theta_s$  e  $\varphi_s$  são os ângulos zenital e azimutal solar, respectivamente.  $\rho_{b_i}E_i \cos(\theta_s)\tau_i(\theta_s, \varphi_s)$  é radiância solar direta refletida pela superfície (caminho 7).

Por conveniência e simplificação matemática, as radiâncias  $R_{s_i}$  e  $R_{g_i}$  medida no TOA e ao nível do solo, respectivamente, são geralmente expressos em termos das temperaturas sa seguinte forma

$$B_i(T_i) = R_{s_i} \quad e \quad B_i(T_{g_i}) = R_{g_i}. \quad (6.3)$$

onde  $T_i$  é a temperatura no TOA e  $T_{g_i}$  é a temperatura ao nível do solo.

### 6.1.1 Reamostragem dos dados

É importante ressaltar que todas as variáveis nas equações (6.1) e (6.2), são valores registrados pelo canal. Conforme a Seção (4.4), os sensores orbitais medem a radiação em uma largura de banda finita (canal), assim, a quantidade de interesse é uma média ponderada, expressa da seguinte forma:

$$V_i = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} g_i(\lambda) V_\lambda d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} g_i(\lambda) d\lambda} \quad (6.4)$$

onde  $g_i(\lambda)$  é a função resposta<sup>1</sup> do canal  $i$ ;  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  são os limites inferior e superior do comprimento de onda, respectivamente, no canal  $i$ ; e  $V$  representa as variáveis:  $B(T)$ ,  $R_s$ ,  $R_g$ ,  $R_{at \uparrow}$ ,  $R_{st \uparrow}$ ,  $R_{at \downarrow}$ ,  $R_{st \downarrow}$ ,  $E$ ,  $\varepsilon$ ,  $\tau$  ou  $\rho_b$ .

É denominado de reamostragem a aplicação da Equação (6.4) para as variáveis citadas anteriormente.

### 6.1.2 Suposições do modelo

As Equações (6.1) e (6.2) são aproximações para a equação de transferência radiativa teórica, mas estas simplificações requerem algumas suposições importantes.

Em primeiro lugar, a integral do produto é assumida como sendo igual ao produto das integrais. Esta suposição é verdadeira somente se as variáveis forem constantes, dentro dos limites de integração. Na prática, esta situação raramente acontece. Como a largura da banda do canal é geralmente estreita, e as variáveis representadas por  $V$  envolvidas na Equação (6.4) não mudam rapidamente. Portanto, a utilização dessa média ponderada é uma boa aproximação para a equação de transferência radiativa.

Em segundo lugar, no cálculo das radiações descendentes refletidas pela superfície, assume-se que esta superfície seja Lambertiana<sup>2</sup>. Esta suposição é razoável e não produzirá um erro grande na região espectral de TIR, especialmente para o subsistema TIR/ASTER, que tem uma largura de faixa imageada de 60 km (RAMACHANDRAN; JUSTICE; ABRAMS, 2010). Além disto, a radiação atmosférica solar difusa é assumida como isotrópica<sup>3</sup>.

## 6.2 Correção Atmosférica

No Capítulo (3) deste trabalho, apresentou-se os diversos gases presentes na atmosfera terrestre atualmente. A interação destes gases com a radiação eletromagnética

<sup>1</sup> A função resposta do subsistema TIR/ASTER pode ser conferida no Apêndice B

<sup>2</sup> A superfície Lambertiana é aquela na qual o fluxo radiante que deixa a superfície é constante para qualquer ângulo de reflectância (JENSEN et al., 2011).

<sup>3</sup> Radiação isotrópica é aquela em que a radiação é independente da direção (LI, 2014).

altera o valor da radiância medido pelo sensor. Assim, deve-se atenuar a influência da atmosfera nos dados captados, tal processo é denominado de correção atmosférica.

Algumas simplificações serão apresentadas a fim de obter uma expressão matemática para corrigir o efeito da atmosfera:

1. Devido a contribuição da radiação solar no TOA ser insignificante na janela de 8 - 14  $\mu m$  durante o dia e a noite e na janela de 3 - 5  $\mu m$  durante a noite, os itens relacionados com a energia solar (caminhos  $\textcircled{3}$ ,  $\textcircled{6}$  e  $\textcircled{7}$ ), podem ser negligenciados sem perda de precisão;
2. Além disto, a radiância, a emissividade e a transmitância não dependem dos ângulos zenital ( $\theta$ ) e azimutal ( $\varphi$ ).

Aplicando estas suposições nas Equações (6.1) e (6.2) e substituindo a expressão (6.2) em (6.1), tem-se:

$$R_{s_i} = \tau_i \varepsilon_i B_i(T_s) + \tau_i(1 - \varepsilon_i)R_{at_i\downarrow} + R_{at_i\uparrow}. \quad (6.5)$$

A Equação (6.5) representa a contribuição proveniente de diversas fontes de radiação. No entanto, a radiação emitida diretamente pela superfície ( $\varepsilon_i B_i(T_s)$  - caminho  $\textcircled{4}$ ) é a variável de interesse, pois é o termo que corresponde a radiação emitida pela superfície terrestre proveniente da interação com a energia eletromagnética do Sol.

Desta forma, pela Equação (2), a radiância do alvo para um canal ( $i$ ) pode ser escrita da seguinte forma:

$$\varepsilon_i B_i(T_s) = R_i. \quad (6.6)$$

Assim, para recuperar a radiância emitida pela superfície sem a interferência da atmosfera, deve-se substituir a igualdade (6.6) na Equação (6.5) e isolar a variável  $R_i$ , o que resulta na seguinte expressão

$$R_i = \frac{R_{s_i} - R_{at_i\uparrow}}{\tau_i} + (\varepsilon_i - 1)R_{at_i\downarrow}. \quad (6.7)$$

Deve-se observar que para aplicar o processo de correção atmosférica é necessária uma estimativa inicial para a emissividade na banda  $i$ .

### 6.2.1 Parâmetros atmosféricos

As variáveis transmitância ( $\tau_i$ ), radiância ascendente ( $R_{at_i\uparrow}$ ) e radiância descendente ( $R_{at_i\downarrow}$ ) da Equação (6.7) são os três parâmetros atmosféricos que devem ser calculados para

realizar a correção atmosférica. Estes parâmetros são estimados com um modelo de transferência radiativa tal como MODTRAN (MODerate resolution atmospheric TRANsmission). Este programa de computador utiliza alguns dados de entrada como: a temperatura do ar, a umidade relativa, e altura geopotencial (KUENZER; DECH, 2013).

No TIR os valores destes parâmetros são alterados principalmente pelos seguintes gases: vapor d'água ( $H_2O$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ) e ozônio ( $O_3$ ). Na região do espectro 8 - 14  $\mu m$  a transmitância atmosférica é influenciada, principalmente, pela coluna de vapor d'água, o ozônio (cerca de 9,6  $\mu m$ ) e de  $CO_2$  (em 14  $\mu m$ ). Assim, uma estimativa precisa da coluna de vapor d'água é necessária, nessa parte do espectro, a fim de recuperar os valores de emissividade e temperatura da superfície (RICHTER; SCHLÄPFER, 2015).

## 7 Restrições na recuperação da temperatura e emissividade da superfície terrestre

Este capítulo apresenta algumas considerações que restringem o processo de recuperar a TST e EST.

### 7.1 Efeito da atmosfera

Na Equação (6.5), rerepresentada a seguir utilizando a igualdade (6.3), as variáveis são dependentes da função resposta do sensor, conforme a Equação (6.4).

$$B_i(T_i) = \tau_i \varepsilon_i B_i(T_s) + \tau_i(1 - \varepsilon_i)R_{at_i\downarrow} + R_{at_i\uparrow}.$$

Além disto, deve-se observar que a radiância atmosférica descendente ( $R_{at_i\downarrow}$ ) está acoplada a emissividade. Conseqüentemente, determinar a TST de forma precisa requer corrigir o efeito da atmosfera além de conhecer a emissividade do alvo (LI, 2014).

A fim de compreender o efeito que a atmosfera exerce na recuperação da temperatura, através da Equação (6.5), deve-se, primeiramente, substituir a radiância atmosférica ascendente ( $R_{at_i\uparrow}$ ) da seguinte forma (caminho  $\mathcal{O}$  da Figura (7)),

$$R_{at_i\uparrow} = (1 - \tau_i) B(T_{a\uparrow}), \quad (7.1)$$

onde  $T_{a\uparrow}$  representa a temperatura da atmosfera.

A expansão de Taylor de primeira ordem para a função de Planck na vizinhança de uma temperatura ( $T_0$ ), é

$$B_i(T) = B_i(T_0) + \frac{\partial B_i}{\partial T}(T - T_0). \quad (7.2)$$

Com as Equações (6.5), (7.1) e (7.2), pode-se encontrar uma expressão aproximada da temperatura da superfície ( $T_s$ ) apresentada a seguir

$$T_s = T_i + \frac{1 - \tau_i}{\tau_i}(T_i - T_{a\uparrow}) + \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon_i} \left[ \frac{(B_i(T_i) - R_{at_i\downarrow})}{\frac{\partial B}{\partial T}} + \frac{1 - \tau_i}{\tau_i}(T_i - T_{a\uparrow}) \right]. \quad (7.3)$$

Conforme a Equação (7.3), o segundo termo representa o impacto da atmosfera na estimativa para recuperar a TST ( $\Delta T_{atm}$ ), que é definida por

$$\Delta T_{atm} = \frac{1 - \tau_i}{\tau_i} (T_i - T_{a\uparrow}) \quad (7.4)$$

Da Equação (7.4), deve-se notar que

1. Quanto menor for  $\tau_i$  ou  $T_{a\uparrow}$ , maior será o efeito da atmosfera.
2. Como  $T_i$  é geralmente maior que  $T_{a\uparrow}$ , a atmosfera atua como um absorvedor da energia. No caso em que  $T_i$  é menor do que  $T_{a\uparrow}$ , que muitas vezes acontece na inversão do perfil de temperatura atmosférica, a atmosfera se comporta como um emissor. Em outras palavras, para uma atmosfera seca e fria,  $\tau \approx 1$  ou para a inversão do perfil da temperatura atmosférica,  $T_{a\uparrow} \approx T_i$ ,  $\Delta T_{atm}$  é pequeno; caso contrário, para uma atmosfera quente e úmida,  $\Delta T_{atm}$  é grande.
3. A Figura (8) apresenta o efeito de diferentes atmosferas na recuperação da TST. Pode-se observar que em atmosfera tropical quente e úmida a temperatura pode ser afetada em 11 K aproximadamente (LI, 2014).

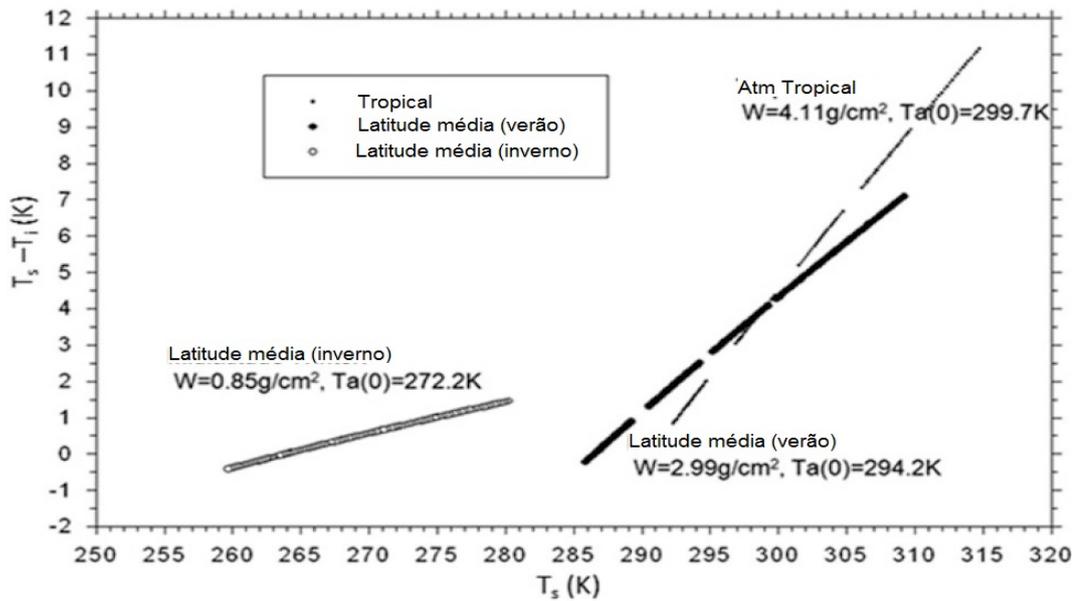


Figura 8 – Efeito de diferentes atmosferas na recuperação da TST. Onde  $W$  é a coluna de vapor d'água na atmosfera, e  $T_a(0)$  é a temperatura do ar próximo a superfície. Adaptado de (LI, 2014).

## 7.2 Número de variáveis versus o número de medidas

Recuperar a temperatura da superfície terrestre é um problema matemático subdeterminado<sup>1</sup> (KEALY; HOOK, 1993), pois a radiância captada por cada banda do sensor está relacionada com a temperatura e emissividade conforme a Equação (3), reescrita a seguir

$$R(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) \frac{C_1}{\lambda^5 \pi \left( e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)}.$$

Assim, tem-se a radiância medida em  $N$  bandas, mas sempre existirá  $N + 1$  incógnitas. Isto é,  $N$  emissividades, uma para cada canal e uma incógnita para a temperatura. Para tornar a recuperação de TST determinística, a EST deve ser conhecida, ou a TST e EST têm de ser resolvidos simultaneamente com o auxílio de algumas suposições ou restrições sobre a emissividade.

## 7.3 Medidas correlacionadas

Medições na região do TIR são altamente correlacionadas, implicando que o ruído introduzido pelos instrumentos e a imprecisão na determinação dos parâmetros atmosféricos exercem fortes influências sobre a precisão na estimativa da temperatura. Tornando as soluções das equações instáveis.

Por exemplo, se houver um erro de medição de  $0,1 K$  no comprimento de onda de  $12 \mu m$ , isto pode resultar em um erro na temperatura de  $1,2 K$ . Esta correlação representa um problema, mesmo se as equações para estimar  $T$  e  $\varepsilon$  forem resolvidas de forma exata (LI, 2014).

Além disto, alguns estudos (RICHTER; SCHLÄPFER, 2015; VIDAL, 1991) afirmam que, em geral, um erro de emissividade de  $0,01$  pode gerar um erro de temperatura de  $0,5 - 1 K$  para coberturas típicas da superfície. Para atmosferas com alta concentração de vapor d'água o erro na temperatura pode chegar a valores acima de  $2 K$  (FREITAS et al., 2010).

Este último item também está relacionado ao processo de correção atmosférica. Pois para corrigir o efeito da atmosfera nos dados captados pelo sensor é necessária uma estimativa para o valor da emissividade, conforme o segundo termo da Equação (6.7), representada a seguir

$$R_i = \frac{R_{s_i} - R_{at_i\uparrow}}{\tau_i} + (\varepsilon_i - 1)R_{at_i\downarrow}.$$

<sup>1</sup> Quando o sistema possui menos equações do que incógnitas.

Assim, mesmo que os valores dos parâmetros atmosféricos estejam bem determinados, um erro na emissividade também pode acarretar em desvios significativos na recuperação da temperatura.

## 7.4 Parâmetros atmosféricos

As correções atmosféricas são difíceis de implementar, pois a presença da atmosfera entre a superfície da Terra e os sensores perturba as medidas no TOA. As correções atmosféricas consistem em corrigir a radiância medida pelos sensores para os efeitos da absorção e emissão atmosférica. No entanto, a grande variabilidade dos perfis verticais de temperatura e vapor d'água faz com que estes efeitos sejam altamente variáveis.

Conforme a Equação (7.4), o efeito de uma atmosfera seca e fria sobre  $\Delta T_{atm}$  é pequeno e pode ser ignorado às vezes. Mas para uma atmosfera quente e úmida,  $\Delta T_{atm}$  pode ser significativa, o que indica que deve ser considerado os perfis verticais de temperatura e do vapor d'água na atmosfera para recuperar a TST e a EST (LI, 2014).

## 7.5 Definição de temperatura

A temperatura da superfície utilizada na Equação (6.5), e reescrita no início deste Capítulo, chama-se temperatura radiométrica que corresponde a radiação emitida por uma superfície com profundidade menor que a profundidade de penetração de um determinado comprimento de onda. A profundidade de penetração é, geralmente, dentro de alguns milímetros na região TIR. A temperatura radiométrica difere de outras definições de temperaturas, tais como a temperatura termodinâmica definida para um meio em equilíbrio térmico (LI, 2014).

## 7.6 Validação dos dados

É muito difícil validar a TST a partir de dados de satélites, pois cada pixel pode ter resolução de vários metros ou até quilômetros. Neste caso, alguns fatos devem ser observados: (1) a dificuldade de se realizar medições *in situ* da TST e (2) a dificuldade de obtenção de dados representativos da TST na escala de um único pixel. Geralmente, as temperaturas na superfície da Terra variam no espaço e no tempo e não é incomum que a TST varie mais de 10 K ao longo de alguns centímetros de distância, ou por mais de 1 K em menos de um minuto.

A questão mais importante é como relacionar os dados provenientes de satélites com medidas obtida ao nível do solo, especialmente em grande escala. A variação espacial

e temporal da TST limita a validação dos dados somente para superfícies relativamente homogêneas, tais como: lagos, desertos e terras com densa vegetação (LI, 2014).

## 8 Uma nova abordagem para o problema de separação de temperatura e emissividade

Embora existam muitas dificuldades e problemas descritos no Capítulo anterior (7) para recuperar a TST e a EST a partir de medições do espaço, ao longo das últimas décadas, os algoritmos têm progredido significativamente. Estes algoritmos utilizam diferentes hipóteses e aproximações para a equação de transferência radiativa e para os parâmetros temperatura e emissividade (LI, 2014).

Os algoritmos podem ser agrupados em três categorias: métodos mono canal, métodos multicanais e métodos multiângulo, desde que a EST seja conhecida a priori. Se a EST não for conhecida, os algoritmos podem ser classificados em três tipos: método de recuperação gradual, recuperação simultânea de TST e EST com informação atmosférica conhecida e recuperação simultânea com informações atmosféricas desconhecidas (LI, 2014). Para uma revisão detalhada sobre estes métodos, pode-se consultar o trabalho de Grondona (2015).

No presente trabalho, duas técnicas foram desenvolvidas para recuperar valores de temperatura e emissividade a partir de dados de sensores orbitais. Os métodos foram desenvolvidos a partir de algoritmos baseados na desigualdade de Cauchy-Schwarz, tratando o problema de separação de temperatura e emissividade como uma comparação entre vetores. Tais vetores correspondem a valores de radiância de imagens ASTER e de assinaturas espectrais de experimentos realizados em laboratório.

Cada técnica visa proporcionar uma solução única para a Equação (3). Os algoritmos serão discutidos no próximo Capítulo (10). Seções (10.1), (10.2) e (10.3).

A desigualdade de Cauchy-Schwarz é central nos desenvolvimentos dos métodos propostos neste trabalho. Assim, os principais aspectos desta desigualdade serão apresentados.

### 8.1 Desigualdade de Cauchy-Schwarz

Em álgebra o conjunto dos números: racionais ( $\mathbb{Q}$ ), reais ( $\mathbb{R}$ ) e complexos ( $\mathbb{C}$ ) são exemplos de uma estrutura algébrica denominada de corpo (PREVIATO, 2002). Assim, considere o corpo  $\mathbb{F}$  em que seus elementos serão chamados de escalares.

**Definição 8.1.1** *Seja  $n$  um número inteiro positivo. Denomina-se por  $\mathbb{F}^n$  o conjunto de  $n$  elementos de  $\mathbb{F}$ . Os elementos de  $\mathbb{F}^n$  são chamados vetores e são denotados na forma de*

linha  $X = (x_1, \dots, x_n)$  ou por coluna

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad (8.1)$$

O escalar  $x_\ell$  é chamado de  $\ell$ -ésima coordenada de  $X$

**Definição 8.1.2** *Seja  $m, n$  valores inteiros positivos. Uma matriz  $m \times n$  com entradas em  $\mathbb{F}$  é um arranjo retangular.*

$$A = [a_{\ell c}] = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad (8.2)$$

O escalar  $a_{\ell c} \in \mathbb{F}$  é chamado de  $(\ell, c)$ -entrada de  $A$ . O vetor-coluna

$$C_c = \begin{bmatrix} a_{1c} \\ a_{2c} \\ \vdots \\ a_{mc} \end{bmatrix} \quad (8.3)$$

é chamado de  $c$ -ésima coluna de  $A$  e o vetor-linha  $L_\ell = (a_{\ell 1}, a_{\ell 2}, \dots, a_{\ell n})$  é chamado de  $\ell$ -ésima linha de  $A$ . Denota-se por  $M_{m,n}(\mathbb{F})$  o conjunto de todas as matrizes  $m \times n$  com entradas em  $\mathbb{F}$ .

**Definição 8.1.3** *Seja  $A = [a_{ij}]$  e  $B = [b_{ij}]$  matrizes em  $M_{m,n}(\mathbb{F})$  e seja  $c \in F$  um escalar.*

a) A soma  $A + B$  das matrizes  $A$  e  $B$  é a matriz

$$A + B = [a_{\ell c} + b_{\ell c}]. \quad (8.4)$$

b) O redimensionamento de  $A$  por  $c$  é a matriz

$$cA = [ca_{\ell c}]. \quad (8.5)$$

### 8.1.1 Matrizes como funções lineares

Seja  $\mathbb{F}$  um corpo e  $A \in M_{m,n}(\mathbb{F})$  uma matriz com entradas  $a_{\ell c}$ . Para cada vetor

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \in \mathbb{F}^n$$

será associado um novo vetor  $AX \in \mathbb{F}^m$  definido por

$$AX = \begin{bmatrix} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \\ \vdots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \end{bmatrix}. \quad (8.6)$$

Obtém-se portanto uma função  $\mathbb{F}^n \rightarrow \mathbb{F}^m$  relacionando  $X$  a  $AX$ .

### 8.1.2 Tipos de matriz

Algumas matrizes recebem certos tipos de nomes, pois possuem características específicas.

#### Transposta

Dado  $A \in M_{m,n}(F)$  uma matriz de dimensões  $m \times n$ . A transposta da matriz  $A$  é a matriz  $A^t$  obtida pela mudança de linhas por colunas de  $A$ . Consequentemente  $A^t$  é uma matriz  $n \times m$ , isto é,  $A^t \in M_{n,m}(\mathbb{F})$ . Note que se  $A = [a_{\ell c}]$ , então  $A^t = [a_{c\ell}]$ , no qual

$$A_{\ell c}^t = A_{c\ell} \quad (8.7)$$

#### Matriz simétrica

São matrizes  $A \in M_n(\mathbb{F})$  em que  $A^t = A$  ou equivalentemente  $a_{ij} = a_{ji}$  para todos os  $i, j$ .

### 8.1.3 Espaços vetoriais

Nesta seção, o conceito de vetor será estendido. Além disto, serão apresentadas as principais propriedades de espaços vetoriais.

**Definição 8.1.4** *Um espaço vetorial sobre  $\mathbb{F}$  é um grupo comutativo  $(V, +)$  dotado de uma função  $\mathbb{F} \times V \rightarrow V$ , chamado de multiplicação por escalar e denotado  $(a, v) \rightarrow a \cdot v$  de tal forma que para todos  $a, b \in \mathbb{F}$  e  $u, v \in V$  têm-se*

1.  $a \cdot (v + w) = a \cdot v + a \cdot w$  e  $(a + b) \cdot v = a \cdot v + b \cdot v$ .

$$2. 1 \cdot v = v$$

$$3. (ab) \cdot v = a \cdot (b \cdot v)$$

Os elementos de  $V$  são chamados vetores.

Observação: Usualmente, escreve-se  $av$  ao invés de  $a \cdot v$ .

Assim, um espaço vetorial sobre  $\mathbb{F}$  é um conjunto  $V$ , no qual os elementos são chamados de vetores, em que duas operações podem ser realizadas:

- adição, com dois vetores  $v, w$ , pode-se retornar um vetor  $v + w$
- multiplicação por escalar, com um escalar  $c \in \mathbb{F}$  e um vetor  $v \in V$ , pode-se retornar um vetor  $cv$ .

Além disso, as seguintes propriedades podem ser verificadas ([ANDREESCU, 2014](#)):

1. Adição é comutativa:  $v + w = w + v$  para todos os vetores  $v, w \in V$ .
2. Adição é associativa:  $(u + v) + w = u + (v + w)$  para todos os vetores  $u, v, w \in V$ .
3. Adição tem um elemento neutro: há um vetor  $0 \in V$  no qual  $0 + v = v + 0 = v$  para todo  $v \in V$ .
4. Há adição inversa: para todo  $v \in V$  há um vetor  $w \in V$  no qual  $v + w = 0$ .
5.  $1v = v$  para todo  $v \in V$ .
6. Para todo escalar  $a, b \in \mathbb{F}$  e todo  $v \in V$ , pode-se mostrar que  $(ab)v = a(bv)$ .
7. A multiplicação por escalar é aditiva: para todo escalar  $a \in \mathbb{F}$  e todo  $a, b \in \mathbb{F}$  e todo  $v \in V$ , tem-se que  $a(v + w) = av + aw$ .
8. A multiplicação por escalar é distributiva sobre adição: para todo escalar  $a, b \in \mathbb{F}$  e todo  $v \in V$ , pode-se mostrar que  $(a + b)v = av + bv$ .

Além das propriedades descritas anteriormente, seguem algumas definições fundamentais para compreender a desigualdade de Cauchy-Schwarz.

**Definição 8.1.5** *Seja  $V$  um espaço vetorial em  $\mathbb{R}$ . Uma forma bilinear em  $V$  é uma função  $b : V \times V \rightarrow \mathbb{R}$  tal que*

- Para todo  $x \in V$  a função  $b(x, \cdot) : V \rightarrow \mathbb{R}$  é linear
- Para todo  $y \in V$  a função  $b(\cdot, y) : V \rightarrow \mathbb{R}$  é linear

**Definição 8.1.6** Uma forma quadrática em  $V$  é uma função  $q : V \rightarrow \mathbb{R}$  tal que  $q(x) = b(x, x)$  para todo  $x \in V$ .

**Definição 8.1.7** Uma forma simétrica bilinear  $b : V \times V \rightarrow \mathbb{R}$  é chamada positiva se  $b(x, x) \geq 0$  para todo  $x \in V$ . Diz-se que  $b$  é positiva definida se  $b(x, x) > 0$  para todo vetor não-nulo  $x \in V$ .

**Definição 8.1.8** Um produto interno em um espaço vetorial  $V$  com elementos em  $\mathbb{R}$  é uma forma bilinear simétrica positiva definida em  $V$ .

**Definição 8.1.9** Um espaço Euclidiano é um espaço vetorial  $V$  com elementos em  $\mathbb{R}$  de dimensão finita dotado de produto interno.

Quando se lida com produtos internos e espaços Euclidianos, a notação  $\langle x, y \rangle$  é preferida a  $b(x, y)$ , onde  $b$  é um produto interno sobre  $V$ . Se  $\langle \cdot, \cdot \rangle$  é um produto interno sobre  $V$ , então

$$\|x\| = \sqrt{\langle x, x \rangle} \quad (8.8)$$

é denominada de norma de  $x$ .

Assim, o espaço  $\mathbb{R}^n$  dotado de produto interno pode ser calculado da seguinte forma

$$\langle (x_1, \dots, x_n), (y_1, \dots, y_n) \rangle = x_1y_1 + x_2y_2 + \dots + x_ny_n. \quad (8.9)$$

O resultado fundamental sobre formas bilineares simétricas positivas é o seguinte.

**Teorema 1 (Desigualdade de Cauchy-Schwarz).** Seja  $b : V \times V \rightarrow \mathbb{R}$  uma forma bilinear simétrica e seja  $q$  sua forma quadrática associada.

1. Se  $b$  é positiva, então para todo  $x, y \in V$  tem-se

$$b(x, y)^2 \leq q(x)q(y). \quad (8.10)$$

2. Se além disso  $b$  é positiva definida e se  $b(x, y)^2 = q(x)q(y)$  para algum  $x, y \in V$ , então  $x$  e  $y$  são linearmente dependentes.

**Demonstração:**

a) Considere a função  $\mathbb{F} : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  dado por

$$\mathbb{F}(t) = q(x + ty). \quad (8.11)$$

Sendo  $b$  bilinear e simétrica, tem-se

$$\begin{aligned}
 \mathbb{F}(t) &= b(x + ty, x + ty) \\
 &= b(x, x) + b(x, ty) + b(ty, x) + b(ty, ty) \\
 &= q(x) + tb(x, y) + tb(x, y) + t^2b(y, y) \\
 &= q(x) + 2tb(x, y) + t^2q(y).
 \end{aligned} \tag{8.12}$$

Então  $\mathbb{F}(t)$  é uma função polinomial quadrática com coeficiente  $q(y) \geq 0$ . Além disso, dado que  $b$  é positiva, tem-se  $\mathbb{F}(t) \geq 0$  para todo  $t \in \mathbb{R}$ . Isto resulta que o discriminante de  $\mathbb{F}$  é não positivo, tal que

$$4b(x, y)^2 - 4q(x)q(y) \leq 0. \tag{8.13}$$

Mas isto é justamente a desigualdade desejada (depois de dividir por 4).

b) Supondo que  $b$  seja positiva definida e que  $b(x, y)^2 = q(x)q(y)$ , pode-se assumir que  $y \neq 0$ , tal que  $q(y) > 0$ . Então com as notações empregadas na demonstração da parte a), o discriminante de  $\mathbb{F}$  é 0. Isto indica que  $\mathbb{F}$  tem uma única raiz real ( $t$ ). Então  $q(x + ty) = 0$  e desde que  $q$  seja positiva definida, isto pode acontecer somente se  $(x + ty = 0)$ . Então  $x$  e  $y$  são linearmente dependentes.

□

O seguinte resultado é uma consequência direta do Teorema anterior e de fundamental importância para este trabalho.

**Corolário 1** *Se  $V$  é um espaço vetorial em  $\mathbb{R}$  dotado de produto interno  $\langle \cdot, \cdot \rangle$ , então para todo  $x, y \in V$  tem-se*

$$|\langle x, y \rangle| \leq \|x\| \cdot \|y\|. \tag{8.14}$$

Desta forma, pelo Corolário (1), resulta que

$$-1 \leq \frac{\langle x, y \rangle}{\|x\| \|y\|} \leq 1 \quad \text{para todo } x, y \in V - \{0\} \tag{8.15}$$

Assim, existe um único ângulo  $\theta \in [0, \pi]$  que satisfaz

$$\cos \theta = \frac{\langle x, y \rangle}{\|x\| \|y\|} \tag{8.16}$$

Define-se o ângulo  $\theta$  como sendo o ângulo entre os vetores  $x, y$ . Se os elementos desses vetores forem positivos, então  $0 \leq \cos \theta \leq 1$ .

Dois resultados devem ser observados quanto aos valores extremos de  $\cos \theta$ :

- se  $\langle x, y \rangle = 0$  (definição de ortogonalidade entre vetores), então  $\theta = \frac{\pi}{2}$ . Isto é,  $\cos \theta = 0$ ;
- se o vetor  $x$  for múltiplo escalar de vetor  $y$ , então  $\theta = 0$ . Isto é,  $\cos \theta = 1$ .

Os resultados descritos a cima serão utilizados para verificar a “semelhança” entre dois vetores.

A Figura (9) apresenta os vetores  $u$  e  $v$ . Em que  $\theta_1$  é o ângulo do vetor  $v$  com o eixo  $x$ ,  $\theta_2$  é o ângulo do vetor  $u$  com o eixo  $x$  e  $\theta$  é o ângulo entre os vetores.

Pode-se considerar que quanto mais próximo de zero for o ângulo  $\theta$ , então mais semelhantes serão os vetores.

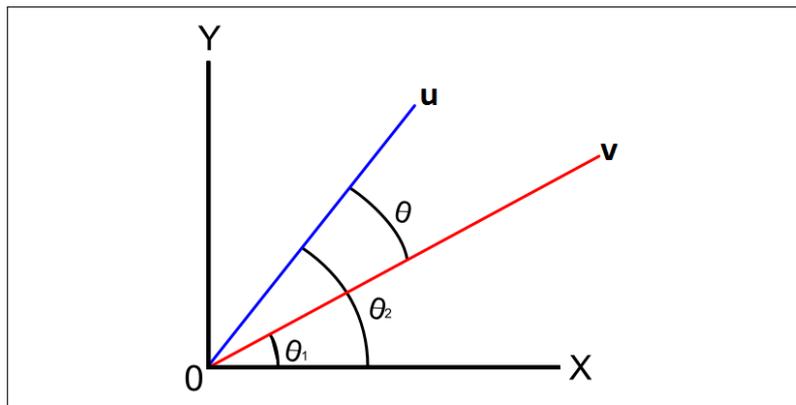


Figura 9 – ângulo entre dois vetores

## 8.2 Análise dos Erros de Quantização

O desenvolvimento desta Seção apresenta os limites dos erros de estimação da temperatura. Este tópico será de fundamental importância no Capítulo (12), em que os resultados serão apresentados.

O quantizador é um sistema não linear que tem o objetivo de transformar a amostra de entrada  $x[n]$  em um único valor de um conjunto finito de possibilidades. Esta operação é representada da seguinte forma:

$$\hat{x}[n] = Q(x[n]) \quad (8.17)$$

e refere-se a  $\hat{x}$  como uma amostra quantizada. Os quantizadores podem ser definidos em níveis de espaçamento uniforme ou não-uniforme, de qualquer modo, quando a Equação (8.17) for aplicada nas amostras, os passos quantizados, isto é, os valores da variável dependente, são usualmente uniformes. A Figura (10) mostra uma característica dos quantizadores uniformes em que os valores das amostras são arredondados para o nível de quantização mais próximo (OPPENHEIM et al., 1998).

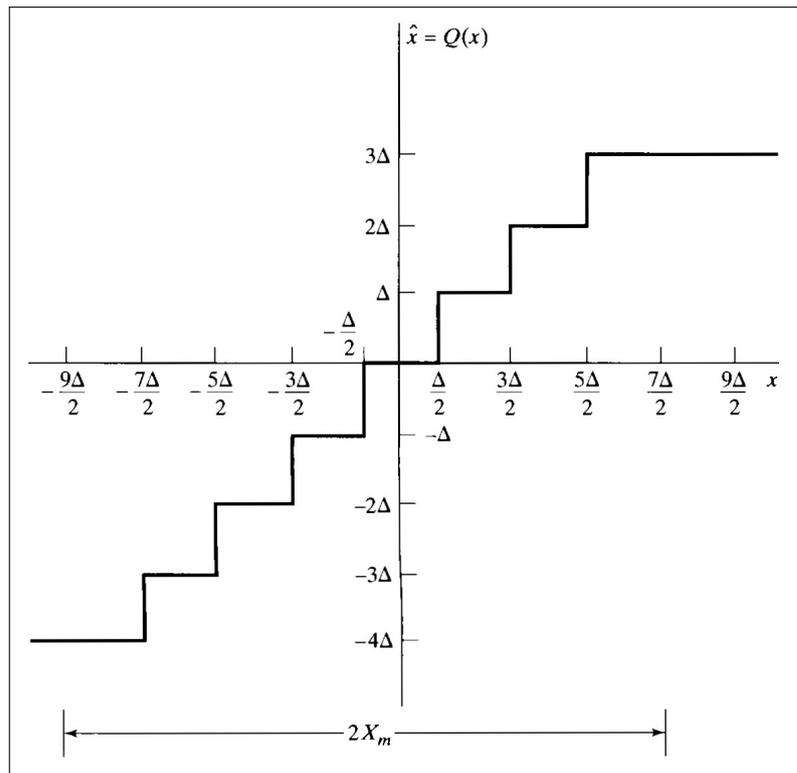


Figura 10 – Quantizador com espaçamentos uniformes para as variáveis dependente e independente. Adaptado de (OPPENHEIM et al., 1998).

A Figura (10) também retrata os níveis quantizados (possibilidades de valores para  $\hat{x}$ ). Uma vez que existem oito níveis de quantização, pode-se rotulá-los por um código binário de 3 bits. Em geral,  $2^{B+1}$  níveis podem ser codificados com um  $(B + 1)$ -bit do código binário.

A relação entre o código binário e os níveis quantizados depende do parâmetro  $X_m$ , em que  $x[n] \in [-X_m, X_m]$ . Assim, o tamanho do passo do quantizador é descrito da seguinte forma:

$$\Delta = \frac{2X_m}{2^{B+1}} = \frac{X_m}{2^B} \quad (8.18)$$

Geralmente, a amostra quantizada  $\hat{x}[n]$  será diferente da amostra de valores verda-

deiros  $x[n]$ . A diferença entre eles é o erro de quantização, definido por

$$e[n] = \hat{x}[n] - x[n]. \quad (8.19)$$

Por exemplo, para uma quantização de 3 bits como na Figura (10), se  $\Delta/2 < x[n] \leq 3\Delta/2$ , então  $\hat{x}[n] = \Delta$ , o que resulta em

$$-\Delta/2 < e[n] \leq \Delta/2. \quad (8.20)$$

No caso da Figura (10), a Equação (8.19) é válida sempre que

$$-9\Delta/2 < x[n] \leq 7\Delta/2. \quad (8.21)$$

Generalizando para uma quantização de  $(B + 1)$ -bit com  $\Delta$  dado pela Equação (8.18), os erros de quantização satisfazem a Equação (8.20) sempre que

$$(-X_m - \Delta/2) < x[n] \leq (X_m - \Delta/2). \quad (8.22)$$

Um modelo de amostra de erro quantização ( $e[n]$ ) simplificado, mas útil, é representado como um ruído aditivo (Figura 11)

$$\hat{x}[n] = x[n] + e[n]. \quad (8.23)$$

Na maioria dos casos  $e[n]$  não tem uma expressão matemática conhecida.

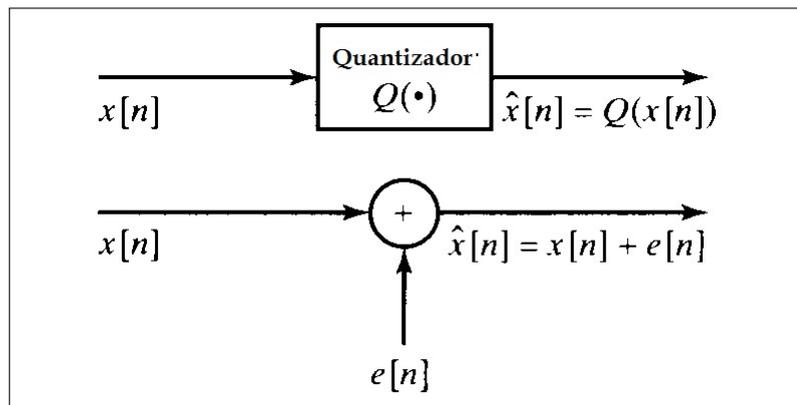


Figura 11 – Modelo de ruído aditivo para o quantizador. Adaptado de (OPPENHEIM et al., 1998).

A representação estatística dos erros de quantização está baseada nos pressupostos a seguir:

1. A sequência de erros  $e[n]$  é uma amostra de um processo estocástico estacionários<sup>1</sup>.
2. A sequência de erros  $e[n]$  não é correlacionada<sup>2</sup> com a sequência  $x[n]$ .
3. As variáveis aleatórias deste processo estocástico não são correlacionadas.
4. A distribuição de probabilidade deste processo estocástico é uniforme ao longo do intervalo de quantização do erro.

Conforme a Equação (8.20), apresentada anteriormente, para os quantizadores que arredondam os valores da amostra para o nível mais próximo, a amplitude do erro quantizado está entre

$$-\Delta/2 < e[n] \leq \Delta/2,$$

é razoável assumir que  $e[n]$  é uma variável aleatória uniformemente distribuída entre  $-\Delta/2$  e  $\Delta/2$ . Portanto, a função de densidade de probabilidade para o ruído quantizado é  $\frac{1}{\Delta}$  conforme mostra a Figura (12).

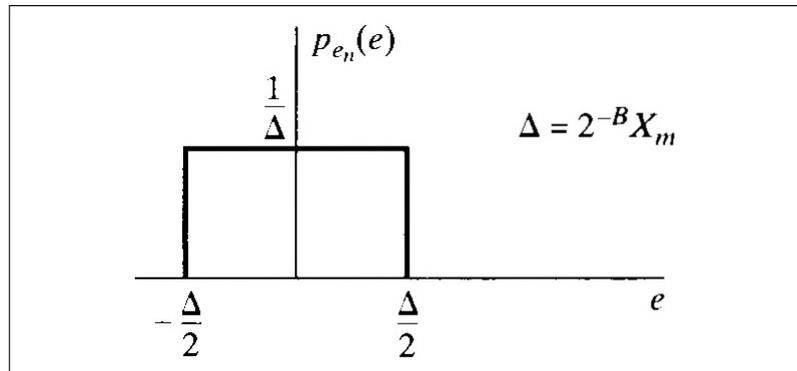


Figura 12 – Função densidade de probabilidade para o erro de quantização. Adaptado de (OPPENHEIM et al., 1998).

Para completar o modelo estatístico para a quantização do ruído, assume-se que as amostras sucessivas dos ruídos têm covariância igual a zero e que  $e[n]$  não é correlacionado com  $x[n]$ . Assim, assume-se que  $e[n]$  é uma sequência uniformemente distribuída com média zero, e a variância é

$$\sigma_e^2 = \int_{-\Delta/2}^{\Delta/2} e^2 \frac{1}{\Delta} de = \frac{\Delta^2}{12}. \quad (8.24)$$

<sup>1</sup> Um processo estocástico é dito ser estacionário se suas propriedades estatísticas são invariantes com relação a translação (MORETTIN, 2014)

<sup>2</sup> Quando a covariância entre duas variáveis for nula, diz-se que elas são não correlacionadas (MORETTIN, 2014)

Neste caso, o desvio padrão é

$$\sigma_e = \frac{\Delta}{2\sqrt{3}} \quad (8.25)$$

Para um quantizador  $(B + 1)$ -bit e amplitude de escala  $X_m$ , a variância do ruído é

$$\sigma_e^2 = \frac{2^{-2B} X_m^2}{12}, \quad (8.26)$$

com desvio padrão

$$\sigma_e = \frac{X_m}{2^{B+1}\sqrt{3}}. \quad (8.27)$$

### Relação sinal-ruído (SNR)

Uma medida comum da quantidade degradada de um sinal pelo ruído aditivo é a relação sinal-ruído (SNR), definido como a razão do sinal da variância sobre a variância do ruído. Expressa em decibel (dB), a razão sinal-ruído de um quantizador  $(B + 1)$ -bit é

$$\begin{aligned} SNR &= 10 \log_{10} \left( \frac{\sigma_x^2}{\sigma_e^2} \right) = 10 \log_{10} \left( \frac{12 \cdot 2^{2B} \sigma_x^2}{X_m^2} \right) \\ &= 6.02B + 10.8 - 20 \log_{10} \left( \frac{X_m}{\sigma_x} \right). \end{aligned} \quad (8.28)$$

Da Equação (8.28), pode-se observar que a relação sinal-ruído aumenta aproximadamente 6 dB para cada bit adicionado.

## Parte III

### Materiais e Métodos

## 9 Materiais

### 9.1 Alvo de estudo: Quartzo (Silicato)

Os métodos foram testados em dados reais de temperatura e emissividade de uma amostra de quartzo (silicato -  $SiO_2$ ). A amostra foi medida utilizando um espectrorradiômetro de campo  $\mu$ FT-IR Modelo 102 pertencente ao Laboratório de Sensoriamento Remoto Geológico (LABSRGEO) do Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia (CEPSRM) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Este instrumento permite a aquisição de espectros no infravermelho de superfícies naturais entre 2 e 16  $\mu m$  com resoluções espectrais de 2, 4 e 16  $cm^{-1}$  (HOOK; KAHLE, 1996).

Devido ao intervalo de temperatura da amostra, o pico de emissão da radiação ocorre próximo aos 10  $\mu m$ , e para os comprimentos de onda menores do que 7  $\mu m$  as medidas são ruidosas. Por esta razão, a região abaixo deste comprimento de onda foi descartada, utilizando somente os dados compreendidos entre 7  $\mu m$  - 16  $\mu m$  com resolução espectral de 4  $cm^{-1}$ . A amostra foi submetida a diversas medições, estas sob condições controladas de temperatura da amostra, temperatura do ambiente e umidade relativa.

Em cada experimento (Tabela 5) foi medida a emissividade da amostra de quartzo em uma determinada temperatura (medida diretamente com um termômetro) e respectivo comprimento de onda. Neste caso, através da Equação (3) e conhecendo a temperatura e emissividade da amostra é possível calcular a radiação do quartzo para um determinado comprimento de onda, sem perda de informação.

Segue um resumo dos dados coletados:

- 12 valores de temperatura entre 16,3°C e 53,6°C. Com espaçamentos desiguais;
- 280 comprimentos de onda entre 7,0064  $\mu m$  e 15,9299  $\mu m$
- 3.360 valores de emissividade. Um para cada comprimento de onda (280) e temperatura (12);
- 3.360 valores para radiação de corpo negro. Um para cada comprimento de onda e temperatura;
- 3.360 valores para radiação da amostra. Um para cada comprimento de onda e temperatura;

A Figura (13) apresenta uma assinatura de quartzo medida em laboratório. Neste caso, a radiação ( $R$ ) é apresentada como função do comprimento de onda ( $\lambda$ ) e temperatura

Tabela 5 – Algumas informações sobre os dados de quartzo medidos com espectrorradiômetro em ambiente controlado. Os experimentos que contém um asterisco (\*) foram utilizados nos experimentos da Seção (11)

| Experimento | Temperatura da Amostra ( $^{\circ}C$ ) | Temperatura do Ambiente ( $^{\circ}C$ ) | Umidade |
|-------------|--|---|---------|
| 1           | 53,6                                   | 22,0                                    | 61,90%  |
| 2           | 43,5                                   |   |         |
| * 3         | 29,3                                   |   |         |
| * 4         | 16,3                                   |   |         |
| 5           | 36                                     | 26,0                                    | 69,30%  |
| * 6         | 35,5                                   |   |         |
| * 7         | 35                                     |   |         |
| 8           | 52,5                                   | 19,15                                   | 56,20%  |
| 9           | 43,6                                   |   |         |
| 10          | 42,8                                   |   |         |
| 11          | 42,3                                   |   |         |
| 12          | 36,2                                   |   |         |

fixa de  $16,3^{\circ}C$ . Os asteriscos representam os valores de radiância reamostrados para cada banda do sensor ASTER.

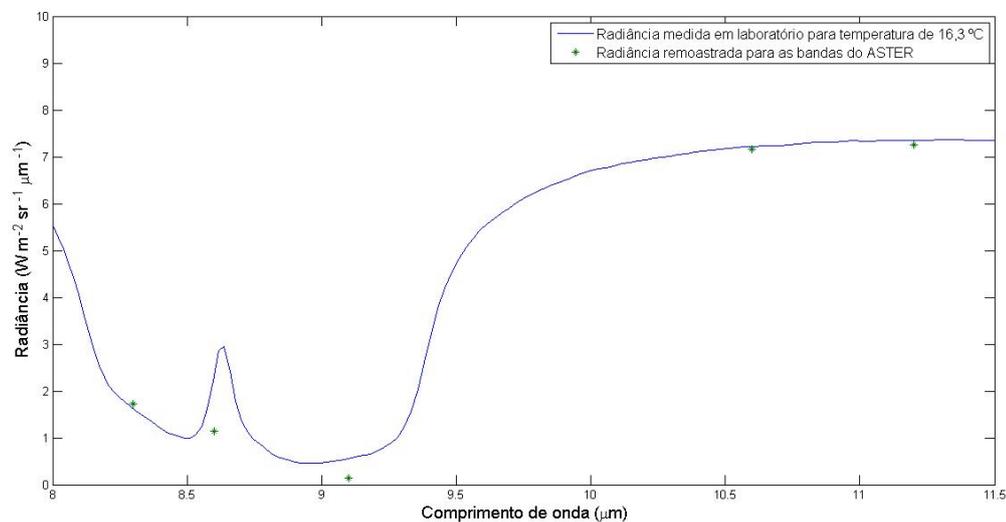


Figura 13 – Assinatura espectral do quartzo para temperatura de  $16,3^{\circ}C$  e os valores de radiância reamostrados para o ASTER.

### 9.1.1 Feição Reststrahlen

Na região de comprimento de onda do TIR, grupos minerais incluindo silicatos, carbonatos, sulfatos, fosfatos e hidróxidos exibem características de absorção espectral

denominada de feição Reststrahlen. Esta característica aparece como níveis mínimos de emissividade, que estão relacionados às vibrações moleculares fundamentais dentro de grupos como  $CO_3$ ,  $SO_4$ ,  $PO_4$  e  $SiO_2$  (KUENZER; DECH, 2013).

No caso do quartzo, as variações de emissividade são maiores na banda Reststrahlen situada entre  $8,3 \mu m$  e  $9,6 \mu m$  aproximadamente (Figura 13). Devido as vibrações nas ligações  $Si - O$  (KUENZER; DECH, 2013).

## Observações quanto a utilização dos dados de laboratório

Com este banco de dados, pode-se simular cenários controlados a fim de verificar o comportamento dos algoritmos propostos. Os dados de laboratório foram utilizados no experimento 1 (Seção (11.1) para simular dados reais e possíveis bancos de dados. Já no experimento 2 (Seção (11.2) os dados brutos de laboratório foram utilizados para compor o banco de dados dos algoritmos.

## 9.2 Imagens TIR/ASTER

Neste trabalho, utilizou-se imagens do sensor ASTER provenientes do subsistema TIR da região de estudo apresentada no Capítulo (2). As imagens foram captadas em 26/09/2000, com coordenadas ( $29^{\circ}31'42''$ ,  $-51^{\circ}40'19''$ ) Estes dados foram utilizados no experimento 2 (Seção 11.2) para compor os dados de entrada.

Uma imagem de radiância do sensor ASTER, ou seja, uma imagem ASTER com nível de processamento L1B. Além do produto de temperatura do sensor ASTER (AST08) foi utilizado para testar os dados gerados pelos métodos propostos. O produto de temperatura (AST08) e o de radiância (L1B) são disponibilizados pelo site <<http://reverb.echo.nasa.gov/reverb>> após a avaliação de um projeto, o qual deve informar o motivo da requisição e a aplicabilidade do produto.

## 9.3 MATLAB

MATLAB (MATrix LABoratory) é uma linguagem de programação e um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE, do inglês, Integrated Development Environment) muito utilizada por engenheiros e cientistas para computação numérica (GILAT, 2009). Neste trabalho, as imagens foram processadas com o software MATLAB versão R2010b. As principais rotinas computacionais estão implementadas no Apêndice D e outras foram adaptadas do trabalho de Grondona (2015).

# 10 Métodos

Neste trabalho, dois algoritmos foram desenvolvidos a fim de estimar temperatura e emissividade da superfície terrestre. A Seção (10.1) irá apresentar as três etapas básicas dos algoritmos. E os detalhes de cada método serão expostos nas Seções (10.2) e (10.3).

## 10.1 Algoritmos: etapas básicas

A Figura (14) representa o fluxograma das três etapas básicas dos algoritmos propostos: dados de entrada, processamento de dados e dados de saída<sup>1</sup>. Cada etapa pode ser resumida da seguinte forma:

### Dados de Entrada

Nesta etapa, duas entradas são necessárias:

1. Dados do sensor ASTER;
2. Banco de dados que será utilizado para comparar com os sinais provenientes do sensor.

### Processamento de dados

Os dados de entrada são manipulados na etapa seguinte a fim de estimar os parâmetros de interesse ( $T$  e  $\varepsilon$ ). Os dois métodos propostos utilizam a desigualdade de Cauchy-Schwarz. Em um deles é adicionado mais uma etapa de processamento que aplica regressão linear para um polinômio do segundo grau entre produto interno e temperatura.

### Dados de Saída

A última etapa de cada algoritmo corresponde aos valores estimados de temperatura e emissividade. O resultado final é uma imagem para temperatura e cinco imagens para emissividade, uma para cada banda do ASTER.

---

<sup>1</sup> Os símbolos dos fluxogramas foram descritos na Tabela (16) do Apêndice A.

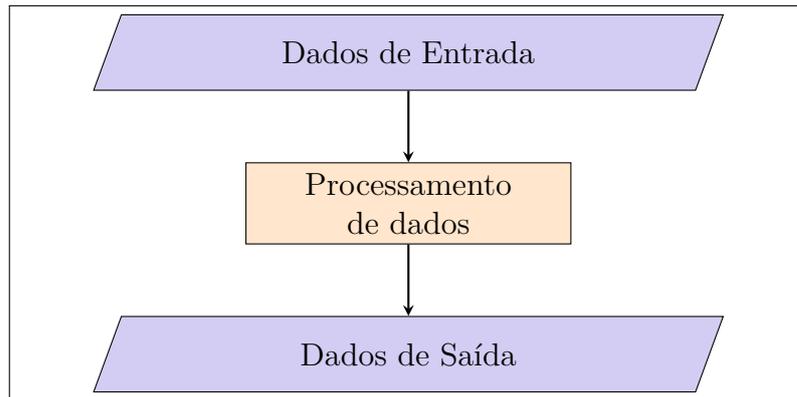


Figura 14 – Fluxograma genérico dos algoritmos propostos.

## 10.2 Algoritmo 1: Cauchy-Schwarz

Este algoritmo utiliza a desigualdade de Cauchy-Schwarz para selecionar o vetor do banco de dados mais semelhante ao vetor criado com pixels das imagens do ASTER. Este método é composto de quatro etapas (Figura 15)

- Etapa 1: Dados do sensor ASTER;
- Etapa 2: Banco de dados;
- Etapa 3: Desigualdade de Cauchy-Schwarz;
- Etapa 4: Estimativa da temperatura e emissividade

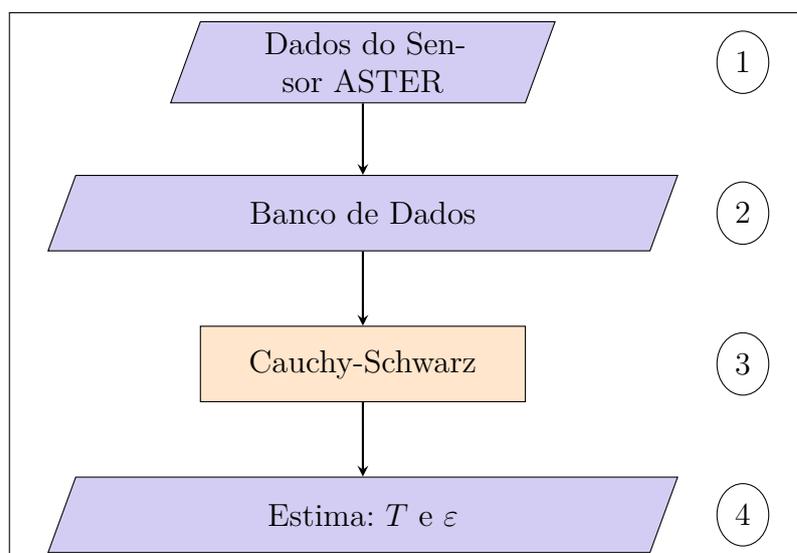


Figura 15 – Fluxograma referente ao algoritmo 1

### Etapa 1: Dados do sensor ASTER

Conforme descrito no Capítulo (4), o subsistema TIR/ASTER é composto de cinco bandas/canais (10, 11, 12, 13 e 14) no espectro do infravermelho termal. A Figura (16) representa o produto L1B, em que cada imagem, representada por uma matriz, armazena os valores de radiância de uma determinada região da superfície terrestre. Além disto, a posição  $(\ell, c)$  corresponde a uma mesma posição espacial para cada matriz.

A primeira imagem corresponde aos dados de radiância na banda 10, a segunda da banda 11 e assim por diante até a banda 14. Agora, o termo “imagem 10” representa uma matriz que armazena dados de radiância da banda 10 do subsistema TIR/ASTER. O mesmo vale para as demais bandas.

Estes dados serão utilizados para construir um vetor  $X$  com cinco elementos (número de canais do sensor TIR/ASTER) da seguinte forma:

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_5 \end{bmatrix} \quad (10.1)$$

1. O valor da posição  $(\ell, c)$  da imagem 10 é armazenado na primeira posição do vetor  $(x_1)$ ;
2. O valor da posição  $(\ell, c)$  da imagem 11 é armazenado na segunda posição do vetor  $(x_2)$ ;
3. Assim, sucessivamente até a imagem 14. Última posição do vetor  $(x_5)$ ;

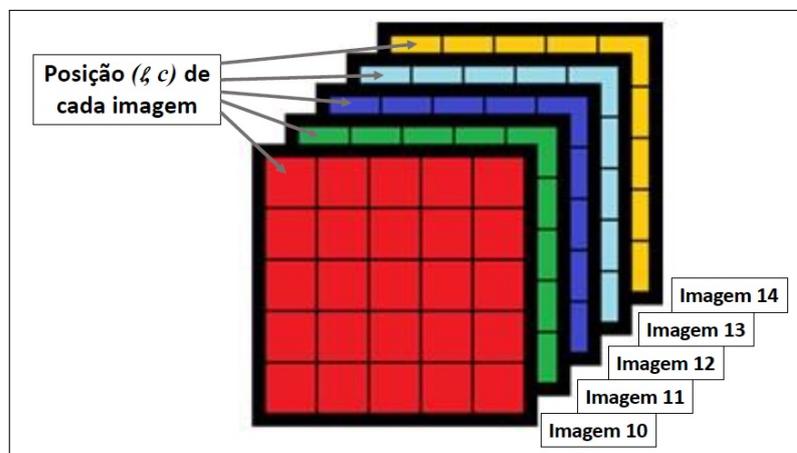


Figura 16 – Representação de uma imagem multiespectral com cinco bandas. Adaptado de [http://www.ok.ctrl.titech.ac.jp/res/MSI/MSI\\_e.html](http://www.ok.ctrl.titech.ac.jp/res/MSI/MSI_e.html)

Assim, serão construídos tantos vetores ( $X$ ) quanto for o número de posições ( $\ell, c$ ) analisados.

Cada vetor  $X$ , criado pelo processo descrito acima, será comparado com um banco de dados. O objetivo básico é selecionar o elemento do banco de dados mais semelhante ao vetor  $X$ .

Antes de compor o vetor  $X$ , as imagens do ASTER devem passar pelo processo de correção atmosférica adequada conforme a descrição do Capítulo (6) a fim de obter resultados confiáveis.

## Etapa 2: Banco de dados

O banco de dados (BD) é uma parte muito importante para obter bons resultados na recuperação da temperatura e emissividade, pois será utilizado para comparar com os dados captados pelo sensor.

Os elementos do BD podem ser obtidos por experimentos realizados em ambiente controlado. Desta forma, a qualidade das estimativas de  $T$  e  $\varepsilon$  dependerão da qualidade dos dados obtidos em laboratório.

Inicia-se esta etapa com a reamostragem dos dados de laboratório (Seção 6.1.1). Como o sensor utilizado neste trabalho é o subsistema TIR/ASTER, então o banco de dados reamostrado pode ser representado pela matriz (8.2), com  $n = 5$ , da seguinte forma:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{15} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{25} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{m5} \end{bmatrix} \quad (10.2)$$

em que

- A matriz tem  $m$  linhas e 5 colunas;
- as cinco colunas correspondem ao número de bandas do subsistema TIR/ASTER;
- $m$  é o número de experimentos realizados a uma temperatura fixa. Por exemplo,
  - Pode-se utilizar todos os experimentos da Tabela (5). Neste caso,  $m = 12$ ;
  - No experimento 2 (Seção 11.2) foram utilizados os experimentos da Tabela (5) marcados com um asterisco (\*) o que resulta em  $m = 4$ .
- Cada linha da matriz representa dados de radiância obtidos em laboratório;
- Cada elemento da linha é o dado de radiância obtido em laboratório e reamostrado para a banda do subsistema TIR/ASTER correspondente.

### Etapa 3: Desigualdade de Cauchy-Schwarz

Uma das desigualdades mais utilizadas, em diversas áreas da matemática, é a desigualdade de Cauchy-Schwarz (STEELE, 2004), que foi descrita na Seção (8.1).

Nos algoritmos desenvolvidos neste trabalho, esta desigualdade é de fundamental importância, pois será utilizada para comparar dados obtidos pelo sensor ASTER com o banco de dados da seguinte forma:

Seja  $X$  o vetor (10.1) com dados do ASTER e  $A$  a matriz (10.2) que representa o banco de dados. Pela expressão (8.6), tem-se que

$$AX = \begin{bmatrix} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{15}x_5 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{25}x_5 \\ \vdots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{m5}x_5 \end{bmatrix}. \quad (10.3)$$

Deve-se observar que a matriz tem  $m$  linhas, pois trata-se da explanação do algoritmo e não de uma situação em especial. Este último caso será tratado nos experimentos do Capítulo (11).

Dado que  $L_\ell = (a_{\ell 1}, a_{\ell 2}, \dots, a_{\ell 5})$  é a  $\ell$ -ésima linha da matriz  $A$  e pelo resultado (8.9), pode-se reescrever a Equação (10.3) com a notação de produto interno

$$AX = \begin{bmatrix} \langle L_1, X \rangle \\ \langle L_2, X \rangle \\ \vdots \\ \langle L_m, X \rangle \end{bmatrix}. \quad (10.4)$$

Além disto, cada linha do vetor  $AX$  será dividida pela multiplicação das normas de  $L_\ell$  e  $X$ . A fim de obter outro vetor  $Z$

$$Z = \begin{bmatrix} \langle L_1, X \rangle \backslash \|L_1\| \|X\| \\ \langle L_2, X \rangle \backslash \|L_2\| \|X\| \\ \vdots \\ \langle L_m, X \rangle \backslash \|L_m\| \|X\| \end{bmatrix}. \quad (10.5)$$

Agora, o vetor  $Z$  permite igualar cada linha ao resultado da Equação (8.16). Assim,

$$Z = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 \\ \cos \theta_2 \\ \vdots \\ \cos \theta_m \end{bmatrix} \quad (10.6)$$

em que  $\cos \theta_\ell = \langle L_\ell, X \rangle / \|L_\ell\| \|X\|$ . Pode-se observar que cada linha de  $Z$  é um valor entre zero e um. E quanto mais próximo  $\cos \theta_\ell$  estiver de um, menor é o ângulo  $\theta_\ell$  entre dois vetores<sup>2</sup>.

Seja  $\ell_{max}$  a linha do vetor  $Z$  com o maior valor e  $t_{\ell_{max}}$  a temperatura correspondente a essa linha. Assim, a estimativa para a temperatura de uma determinada posição  $(\ell, c)$  da imagem será igual a  $t_{\ell_{max}}$ .

## Resumo do algoritmo 1

Utilizar a desigualdade de Cauchy-Schwarz para estimar a temperatura de uma posição na imagem  $(\ell, c)$ , pode ser resumida conforme o Quadro 1:

Quadro 1: Desigualdade de Cauchy-Schwarz para estimar temperatura.

1. Reamostrar os dados de laboratório para criar um banco de dados  $A$
2. Cada vetor  $X$ , formado por dados do sensor, será multiplicado pelo banco de dados  $A$  para gerar um vetor  $AX$  de produtos internos (Equação 10.4);
3. Cada linha  $\ell$  do vetor  $AX$  será dividida pelo produto das normas de  $L_\ell$  e  $X$ , a fim de obter outro vetor  $Z$  (Equação 10.6);
4. Selecionar a linha  $\ell_{max}$  da Equação (10.6) que tiver o valor mais próximo de um;
5. Verificar qual é a temperatura  $(t_{\ell_{max}})$  relacionada a linha  $\ell_{max}$ ;
6. O valor de  $t_{\ell_{max}}$  será a estimativa para a temperatura em um determinado pixel da imagem.

### Etapa 4: Estimativa da temperatura ( $T$ ) e emissividade ( $\varepsilon$ )

O último passo do Quadro 1 fornece o valor da temperatura para uma posição  $(\ell, c)$ .

Após estimar a temperatura, deve-se calcular a emissividade da seguinte forma:

1. Isolar a variável  $\varepsilon$  da Equação (3). O que resulta em

$$\varepsilon(\lambda, T) = R(\lambda, T) \frac{\lambda^5 \pi \left( e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right)}{C_1} \quad (10.7)$$

<sup>2</sup> Observação: Neste ponto, vale lembrar que cada linha de  $Z$ , bem como de  $A$ , está relacionada a um experimento realizado em laboratório. E que cada experimento foi executado a uma temperatura fixa de um alvo. No caso deste trabalho o alvo foi uma rocha de quartzo.

2. Com o valor estimado da temperatura ( $t_{\ell_{max}}$ ) e a radiância ( $R$ ) fornecida pelo sensor para uma determinada banda, calcula-se a emissividade ( $\varepsilon$ ) para esta banda centrada em seu respectivo comprimento de onda ( $\lambda$ ).

### 10.3 Algoritmo 2: Cauchy-Schwarz + regressão linear

Pode-se melhorar as estimativas de temperatura acrescentando uma etapa em que é aplicado regressão linear (Apêndice C - Seção C.2) entre as variáveis: produto interno e temperatura.

O método de Cauchy-Schwarz limita as estimativas de temperatura aos valores dos experimentos de laboratório que estão armazenados no banco de dados. A ideia de utilizar regressão linear é obter outras estimativas de temperatura além dos valores do BD.

O segundo algoritmo desenvolvido (Figura 17) mantém os mesmos passos apresentados anteriormente. Contudo, adiciona-se uma etapa (3.1) denominada de regressão linear, que utiliza resultados da etapa (3).

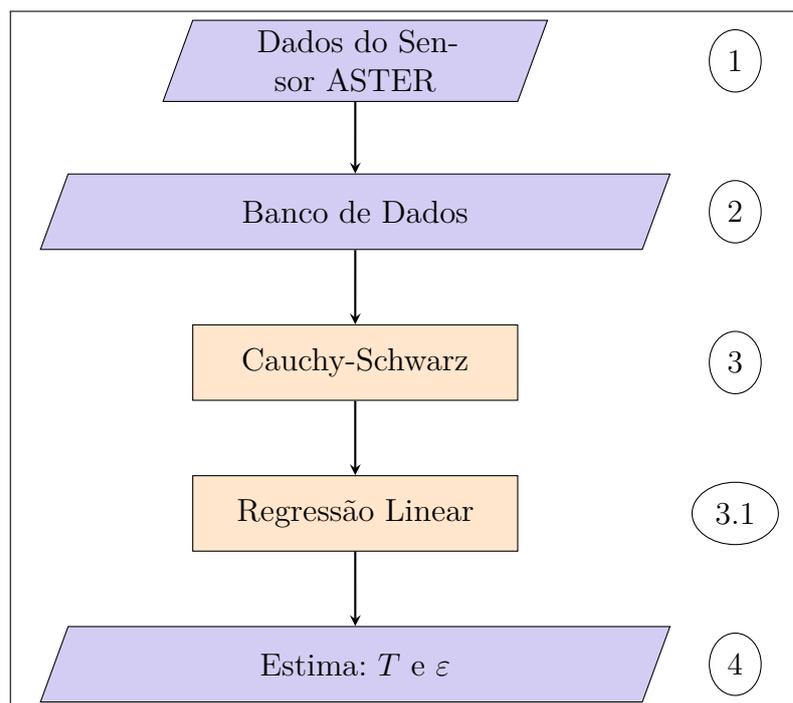


Figura 17 – Fluxograma referente ao algoritmo 2

#### Etapa 3.1: regressão linear para polinômio de segundo grau

Com o vetor  $Z$ , a linha  $\ell_{max}$  e a temperatura  $t_{\ell_{max}}$ , obtidos na etapa (3), pode-se aplicar o método de regressão linear para uma função do segundo grau  $y = a_0 + a_1x + a_2x^2$ ,

em que  $x$  é temperatura (eixo das abscissas) e  $y$  é um elemento do vetor  $Z$  (eixo das ordenadas), da seguinte forma:

Seja  $Z_\ell$  a linha  $\ell$  do vetor  $Z$ .

Quadro 2: Regressão linear para estimar temperatura.

1. Após selecionar a temperatura  $t_{\ell_{max}}$ , pode-se selecionar o seguinte conjunto de pontos:  $(t_{\ell_{max}-1}, Z_{\ell_{max}-1})$ ,  $(t_{\ell_{max}}, Z_{\ell_{max}})$ ,  $(t_{\ell_{max}+1}, Z_{\ell_{max}+1})$ ;
2. Com estes três pontos, aplica-se regressão linear para um polinômio do segundo grau (Apêndice C - Seção C.2) para encontrar os coeficientes  $a_0$ ,  $a_1$  e  $a_2$ ;
3. A função do segundo grau  $y = a_0 + a_1x + a_2x^2$  tem um vértice de coordenada  $(x_v, y_v)$ ;
4. Calcula a abscissa do vértice  $(x_v)$ , da seguinte forma:  $x_v = -\frac{a_1}{2a_2}$ .
5. Se  $x_v \in [t_{\ell_{inf}}, t_{\ell_{sup}}]$ , em que  $t_{\ell_{inf}}$  e  $t_{\ell_{sup}}$  representam a menor e maior temperatura do banco de dados respectivamente, então a estimativa para a temperatura será  $x_v$ . Caso contrário, a temperatura estimada será  $t_{\ell_{max}}$ .

# 11 Experimentos

Para testar os algoritmos desenvolvidos nas Seções (10.2) e (10.3), dois experimentos foram realizados. A diferença entre os experimentos está relacionada somente aos dados de entrada (dados do ASTER e banco de dados).

O primeiro teste utilizou dados de laboratório para criar os dados de entrada (dados do ASTER e banco de dados). E o segundo teste utilizou imagens reais do subsistema TIR/ASTER e os dados brutos adquiridos em laboratório.

As demais etapas (processamento de dados e dados de saída) foram executadas da mesma forma para os dois experimentos. Os códigos-fonte que geraram os resultados dos experimentos A e B foram transcritos no Apêndice (D).

Observação 1: Neste trabalho, o termo simulação foi empregado com o sentido de imitar ou reproduzir um sistema real. Mais especificamente, pretende-se imitar/reproduzir possíveis valores de radiância a partir de dados reais coletados em laboratório. Assim, a expressão “temperatura real” refere-se a uma temperatura simulada. Este termo será empregado no experimento A.

Observação 2: Para o experimento B será utilizado o termo “temperatura de referência”, pois as estimativas obtidas pelos algoritmos utilizaram dados de temperatura do arquivo AST08 para comparação.

## 11.1 Experimento A: Dados simulados

O primeiro experimento foi desenvolvido, principalmente, para averiguar se os limites dos erros dos algoritmos estão dentro dos limites teóricos desenvolvidos na Seção (8.2). Neste caso, a correção atmosférica foi realizada perfeitamente. Em outras palavras, os dados captados pelo sensor não sofreram interferência da atmosfera.

O experimento foi elaborado para:

- Simular dados de radiância captados pelo subsistema TIR/ASTER livres de interferência atmosférica;
- Simular cinco bancos de dados em que cada BD tem um espaçamento entre as temperaturas diferente dos demais.

### 11.1.1 Dados do sensor ASTER: Simulação

Para simular a radiância de quartzo interceptada pelo sensor TIR/ASTER, criou-se um conjunto de dados da seguinte forma:

Quadro 3: Procedimento para simular dados captados pelo sensor TIR/ASTER.

1. Uma amostra dos dados de laboratório (Tabela 5) foi selecionada;
2. Os dados selecionados têm os seguintes valores para temperatura:  $16,3^{\circ}C$ ;  $29,3^{\circ}C$ ;  $35,0^{\circ}C$  e  $35,5^{\circ}C$ . A Figura (18) apresenta as assinaturas espectrais dos dados, obtidas em laboratório, que foram utilizadas para simular possíveis valores de radiância;
3. As assinaturas espectrais das radiâncias para cada temperatura foram reamostradas para as bandas do ASTER (Figura 19).
4. A fim de obter uma função para simular a radiância ( $R$ ) em função da temperatura ( $T$ ) para cada banda do ASTER, aplicou-se o método de regressão linear com estas duas variáveis. A função de ajuste foi um polinômio do primeiro grau (Apêndice C - Seção C.1) e obteve os resultados apresentados na Figura (20). A Tabela (6) mostra os coeficientes de determinação  $r^2$  (Apêndice C - Seção C.1) para cada regressão.
5. Com a regressão de cada banda, simulou-se valores de radiância para temperaturas entre  $16^{\circ}C$  e  $36^{\circ}C$ . O espaçamento entre as temperaturas foi de  $0,01^{\circ}C$ . Neste caso, gerou-se um conjunto de 2001 valores de radiância em função da temperatura.
6. A Figura (21) mostra o resultado deste procedimento para cada uma das cinco bandas do TIR/ASTER.

Tabela 6 – Coeficientes de determinação ( $r^2$ ) para as regressões lineares.

| Banda nº | ( $r^2$ ) Função de Primeiro Grau |
|----------|-----------------------------------|
| 10       | 0,8524                            |
| 11       | 0,7831                            |
| 12       | 0,7332                            |
| 13       | 0,9784                            |
| 14       | 0,9823                            |

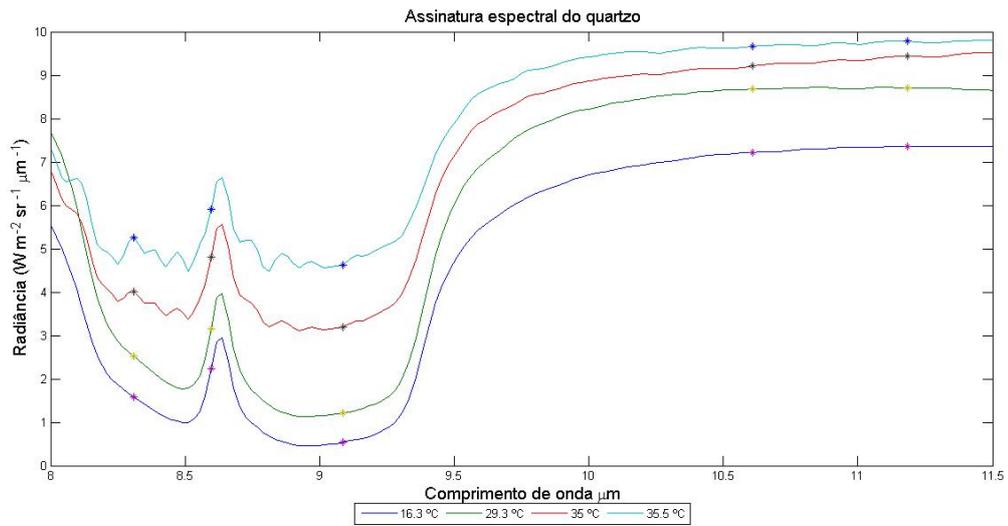


Figura 18 – Assinaturas espectrais do quartzo para quatro temperaturas fixas. O asterisco refere-se ao valor da radiação para o comprimento de onda central das bandas do ASTER.

### 11.1.2 Banco de dados: Simulação

Para este experimento, cinco bancos de dados foram construídos. Eles foram simulados assim como os dados do ASTER, a diferença reside no espaçamento entre os valores de temperatura.

Os procedimentos são semelhantes aos passos descritos no Quadro 3 para criar os

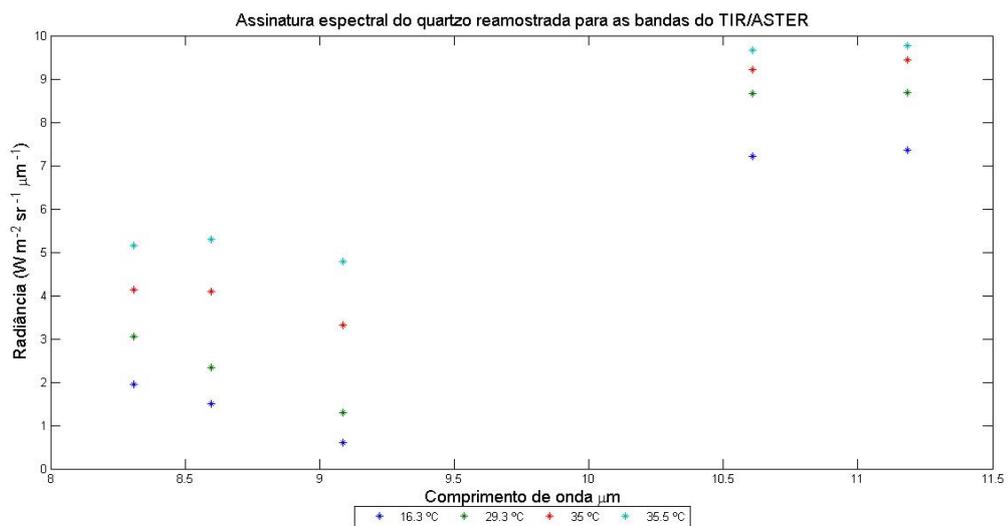


Figura 19 – Assinaturas espectrais do quartzo reamostradas para o subsistema TIR/ASTER.

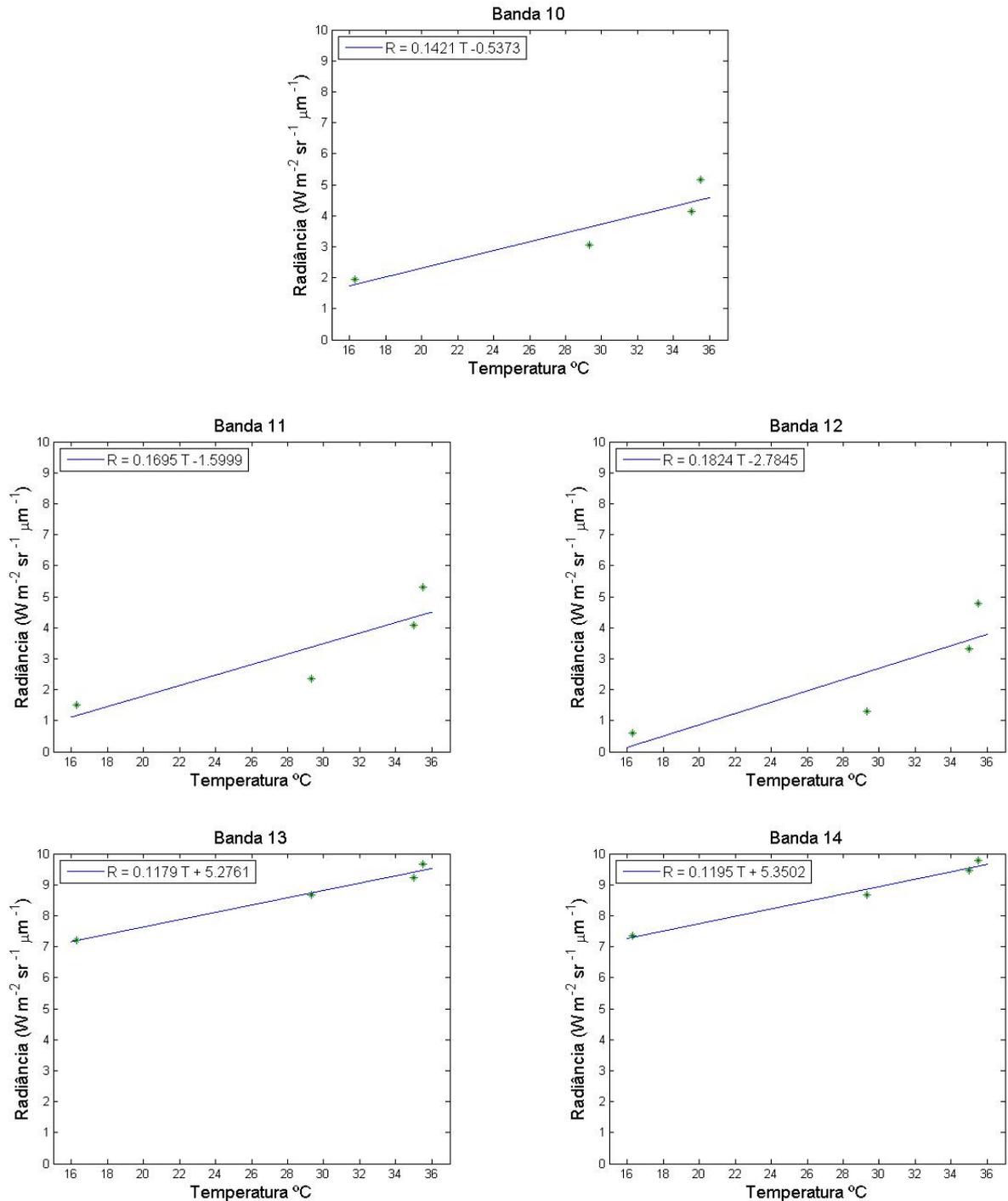


Figura 20 – Valores de radiância por temperatura da amostra de quartzo reamostrados para cada banda do sensor ASTER com sua respectiva regressão linear.

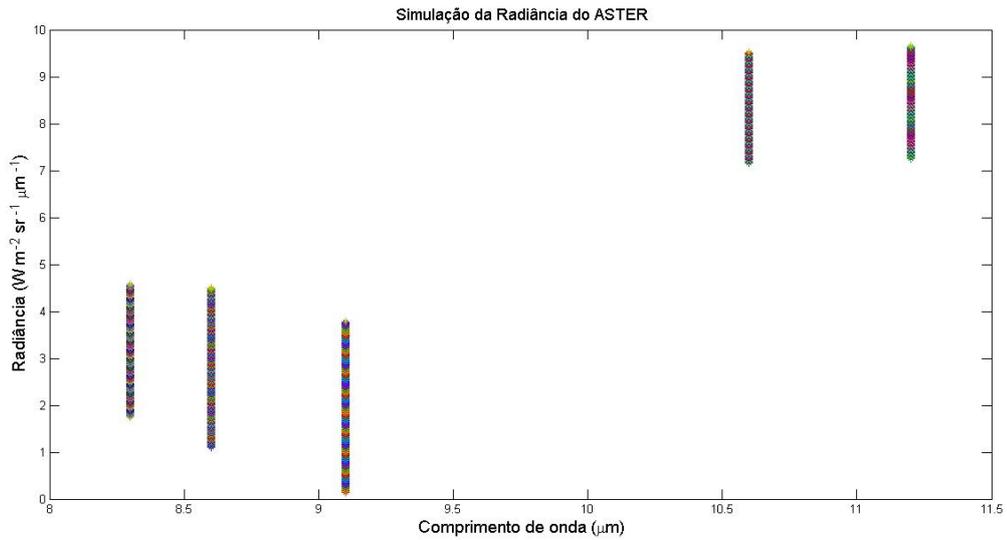


Figura 21 – Simulação da radiância captada para as bandas do ASTER para 2001 temperaturas diferentes.

dados do ASTER. A única diferença reside no quinto item, pois cinco espaçamentos entre as temperaturas foram definidos:  $1^{\circ}C$ ,  $2^{\circ}C$ ,  $4^{\circ}C$ ,  $5^{\circ}C$  e  $10^{\circ}C$ , resultando em cinco bancos de dados, em que cada BD tem igual espaçamento entre as temperaturas.

Conforme a descrição do Quadro 3, simulou-se radiâncias para temperaturas entre  $16^{\circ}C$  e  $36^{\circ}C$ . Assim, deve-se observar que os bancos de dados têm quantidades diferentes de temperaturas, que podem ser resumidas pela seguinte fórmula:

$$nt = \frac{tf - ti}{\Delta} + 1. \quad (11.1)$$

onde  $nt$  é o número de temperaturas,  $tf$  é a temperatura final,  $ti$  é a temperatura inicial.  $\Delta$  corresponde ao tamanho do passo do quantizador descrito na Seção (8.2), isto é, o espaçamento entre as temperaturas. Neste caso, os bancos de dados têm as seguintes quantidades de temperaturas.

Tabela 7 – Quantidade de temperaturas para cada BD simulado.

| Espaçamento entre temperaturas ( $\Delta$ ) | Número de temperaturas |
|---|------------------------|
| $1^{\circ}C$                                | 21                     |
| $2^{\circ}C$                                | 11                     |
| $4^{\circ}C$                                | 6                      |
| $5^{\circ}C$                                | 5                      |
| $10^{\circ}C$                               | 3                      |

A Figura (22) apresenta o BD para um intervalo de  $10^{\circ}C$  entre as temperaturas. Note que existem somente três possíveis valores para a variável temperatura ( $16^{\circ}C$ ,  $26^{\circ}C$  e  $36^{\circ}C$ ).

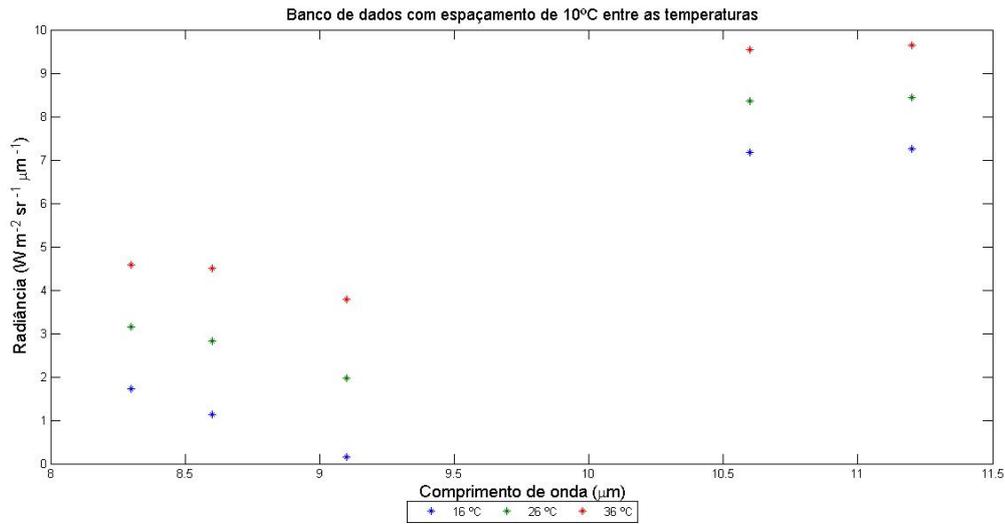


Figura 22 – BD gerado por regressão linear e reamostrados para as bandas do ASTER. O espaçamento entre as temperaturas é de 10C.

### 11.1.3 Execução dos algoritmos propostos

Desta forma, após a criação dos dados de entrada, os dois algoritmos propostos (Subseções: 10.2 e 10.3) foram executados e avaliados.

Tabela 8 – Coordenadas dos 13 pixels utilizados no experimento B com as respectivas temperaturas provenientes do produto AST08.

| Pixel | Temperatura (K) | Temperatura (C) | Coordenada |     |           |            |
|-------|-----------------|-----------------|------------|-----|-----------|------------|
|       |                 |                 | Imagem     |     | Mapa      |            |
|       |                 |                 | X          | Y   | X         | Y          |
| 1     | 294,2           | 21,05           | 586        | 678 | 452488.29 | 6708917.96 |
| 2     | 295,7           | 22,55           | 586        | 680 | 452666.28 | 6708891.15 |
| 3     | 296,2           | 23,05           | 586        | 679 | 452577.28 | 6708904.55 |
| 4     | 297,6           | 24,45           | 587        | 679 | 452563.88 | 6708815.56 |
| 5     | 297,7           | 24,55           | 652        | 692 | 452849.52 | 6702856.54 |
| 6     | 298,9           | 25,75           | 587        | 680 | 452652.87 | 6708802.15 |
| 7     | 299,0           | 25,85           | 651        | 692 | 452862.92 | 6702945.54 |
| 8     | 299,2           | 26,05           | 650        | 692 | 452876.33 | 6703034.54 |
| 9     | 299,6           | 26,45           | 651        | 691 | 452773.93 | 6702958.95 |
| 10    | 300,7           | 27,55           | 649        | 693 | 452978.73 | 6703110.13 |
| 11    | 301,1           | 27,95           | 652        | 691 | 452760.52 | 6702869.95 |
| 12    | 302,6           | 29,45           | 651        | 693 | 452951.92 | 6702932.14 |
| 13    | 302,9           | 29,75           | 650        | 693 | 452965.32 | 6703021.13 |

## 11.2 Experimento B: Dados Reais

O primeiro experimento utilizou dados simulados para criar valores de radiância captados pelo ASTER e para construir os BDs. Já o segundo experimento utilizou imagens de radiância do sensor TIR/ASTER (nível L1B) da região de estudo (Capítulo 2). No total 13 pixels, compostos principalmente por quartzo, foram selecionados dentro da área de estudo. A Tabela (8) indica as coordenadas de cada pixel, bem como suas respectivas temperaturas provenientes do produto AST08 (Seção 4.2). Estas temperaturas serão utilizadas como referências para testar os algoritmos propostos. Além disto, utilizou-se dados brutos coletados em laboratório (Seção 9.1) para compor o banco de dados.

### 11.2.1 Dados do sensor ASTER

A Figura (23) apresenta os dados brutos de radiância em função do comprimento de onda para os 13 pixels. As temperaturas variam entre  $21,05^{\circ}C$  e  $29,75^{\circ}C$  com espaçamentos desiguais. A legenda da Figura indica a temperatura de referência para cada pixel.

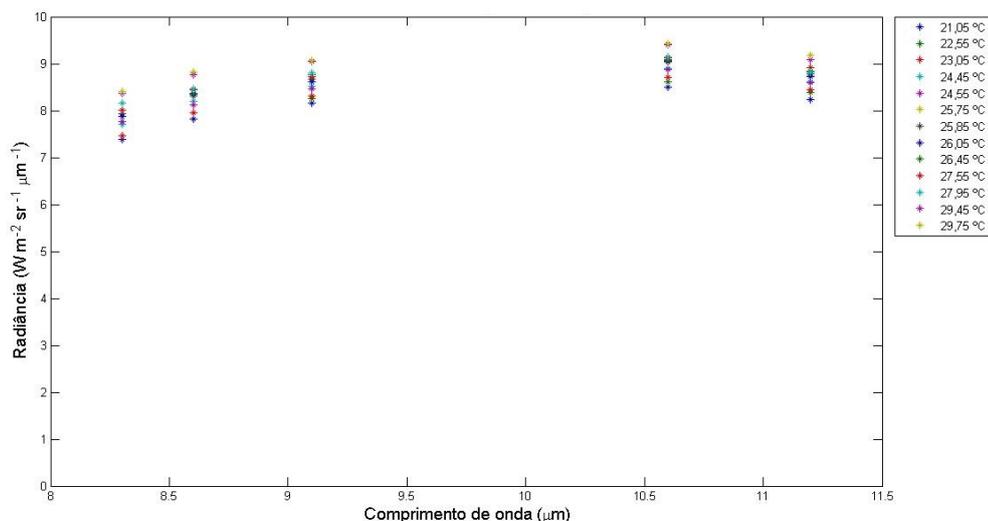


Figura 23 – Radiância dos 13 pixels de quartzo sem correção atmosférica. A legenda indica a temperatura de cada pixel.

### Correção Atmosférica

A radiação no espectro do infravermelho termal, quando medida por um sensor instalado em um satélite, irá incluir emissão, dispersão e absorção pelos gases da atmosfera conforme apresentado no Capítulo (3). Estes efeitos atmosféricos precisam ser removidos da imagem capturada, a fim de diminuir a contribuição da radiância que emana da superfície terrestre, a fim de recuperar as variáveis de interesse (KUENZER; DECH, 2013).

A Equação (6.7) foi utilizada para corrigir o efeito da atmosfera e, conforme a observação na Seção (6.2), esta equação necessita de uma estimativa inicial para a emissividade para cada banda do sensor. Neste caso, a estimativa utilizada, para cada banda, foi o menor valor de emissividade presente no banco de dados. Os parâmetros atmosféricos: transmitância ( $\tau_i$ ), radiância ascendente ( $R_{at_i\uparrow}$ ) e radiância descendente ( $R_{at_i\downarrow}$ ) foram calculados com o software MODTRAN. E a variável ( $R_{s_i}$ ) foi obtida pelas imagens ASTER.

A Figura (24) apresenta as radiâncias corrigidas para o clima da região de estudo.

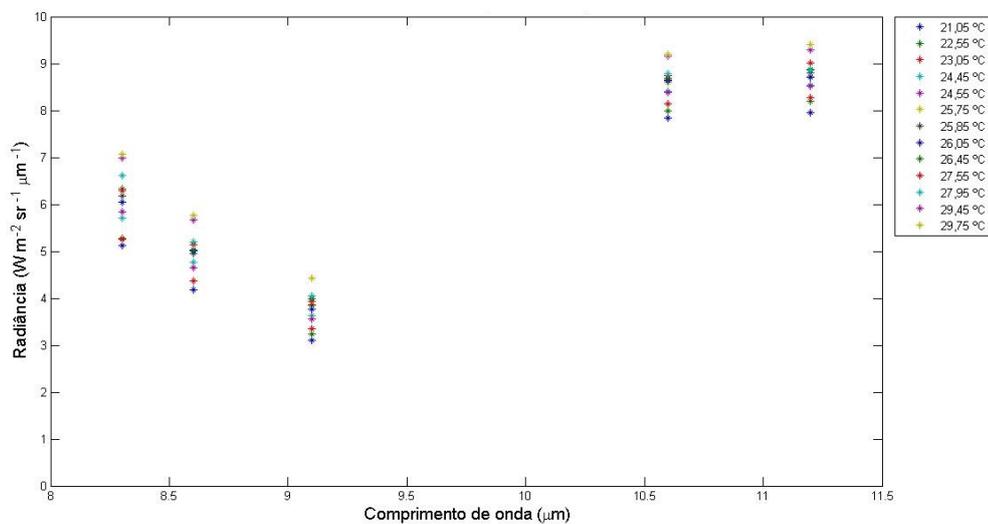


Figura 24 – Radiância dos 13 pixels de quartzo com correção atmosférica para o clima da região. A legenda indica a temperatura de referência de cada pixel.

### 11.2.2 Banco de dados

Para compor o BD deste experimento, selecionou-se dados brutos de radiância e emissividade para quatro temperaturas fixas:  $16,3^{\circ}\text{C}$ ;  $29,3^{\circ}\text{C}$ ;  $35,0^{\circ}\text{C}$  e  $35,5^{\circ}\text{C}$ . A Figura (18) apresenta as assinaturas espectrais dos dados brutos de radiância.

Após este procedimento, o banco de dados foi reamostrado para o subsistema TIR/ASTER e o resultado pode ser observado na Figura (19).

### 11.2.3 Execução dos algoritmos propostos

Após a correção atmosférica dos dados do sensor ASTER e da reamostragem do banco de dados para o subsistema TIR, pode-se executar e avaliar os dois algoritmos propostos (Subseções 10.2 e 10.3). Para comparar os resultados deste experimento foram utilizados dados do arquivo AST08 (Seção 4.2).

## Parte IV

### Resultados e Discussão

## 12 Resultados

Este Capítulo apresenta os resultados e discussões do experimento A (Seção 11.1) e do experimento B (Seção 11.2) realizados neste trabalho. Cada experimento aplicou os dois algoritmos propostos, em que o primeiro algoritmo (Seção 10.2) utiliza a desigualdade de Cauchy-Schwarz e o segundo algoritmo (Seção 10.3) implementa, além da dessa desigualdade, mais uma fase no processamento de dados. Esta fase aplica regressão linear para uma função de segundo grau entre produto interno (eixo das ordenadas) e temperatura (eixo das abscissas).

### 12.1 Resultados do experimento A: algoritmo 1

No experimento A foram gerados 2001 valores de temperaturas diferentes entre  $16^{\circ}C$  e  $36^{\circ}C$ . Além de cinco bancos de dados com espaçamentos ( $\Delta$ ) de  $1^{\circ}C$ ,  $2^{\circ}C$ ,  $4^{\circ}C$ ,  $5^{\circ}C$  e  $10^{\circ}C$ .

Tabela 9 – Estatística descritiva dos erros do algoritmo 1 aplicado no experimento A.

| Erro ( $^{\circ}C$ )                          |        |        |           |         |               |
|---|--------|--------|-----------|---------|---------------|
| (Temperatura Real Menos Temperatura Estimada) |        |        |           |         |               |
| $\Delta$                                      | Mínimo | Máximo | Amplitude | Média   | Desvio Padrão |
| 1   | -0,5   | 0,49   | 0,99      | -0,005  | 0,2887        |
| 2   | -1,02  | 0,98   | 2         | -0,0210 | 0,5774        |
| 4   | -2,08  | 1,92   | 4         | -0,0810 | 1,1547        |
| 5   | -2,62  | 2,38   | 5         | -0,1224 | 1,4434        |
| 10  | -5,5   | 4,51   | 10,01     | -0,4948 | 2,8867        |

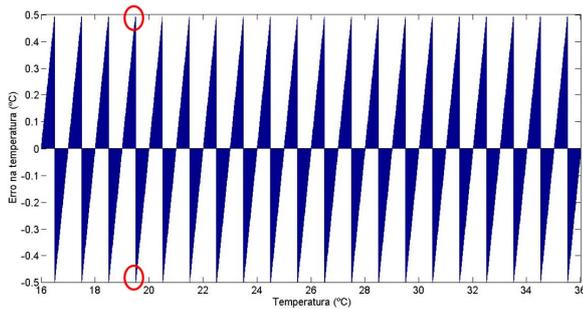
Seguem as considerações sobre os resultados da Tabela (9). Esta tabela resume algumas estatísticas descritivas relacionadas aos erros<sup>1</sup> do algoritmo 1 aplicado no experimento A.

- A amplitude do erro está dentro dos limites teóricos para cada espaçamento  $\Delta$  do BD;
- As médias negativas indicam que o método tende a superestimar os valores de temperatura, pois o erro é calculado pela diferença entre temperatura real e estimada;

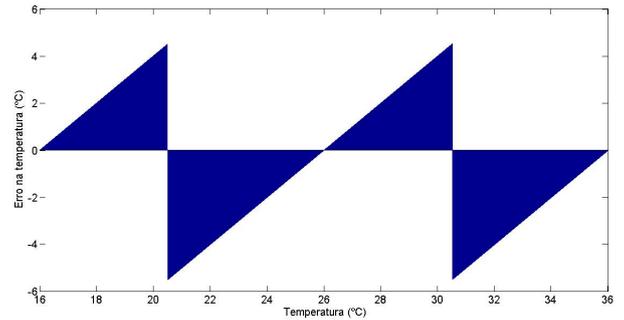
<sup>1</sup> Na Seção (8.2) o erro foi definido como a diferença entre o valor estimado e o valor real (Equação 8.19). Contudo, as análises deste experimento foram baseadas no valor real menos o valor estimado. Esta definição de erro não modifica a análise desenvolvida, pois uma das hipóteses é que o erro tem distribuição uniforme ao longo do intervalo de quantização.

- Não houve diferença entre o desvio padrão do erro teórico ( $\sigma_e$ ) calculado pela Equação (8.25), e o desvio padrão do erro proveniente da aplicação do algoritmo 1 (coluna “Desvio Padrão” da Tabela 9).

A Figura (25) apresenta os gráficos de barras das diferenças entre temperaturas reais e estimadas para  $\Delta$  igual a  $1^\circ C$  e  $10^\circ C$ .



(a) BD para  $\Delta = 1$ . Círculos para as temperaturas de  $18,5^\circ C$  e  $19,49^\circ C$ .



(b) BD para  $\Delta = 10$

Figura 25 – Diferença entre a temperatura real e a temperatura estimada pelo algoritmo 1 para dois bancos de dados simulados. Os círculos da Figura (a) mostram duas temperaturas em que ocorrem erro máximo.

## 12.2 Resultados do experimento A: algoritmo 2

Antes de apresentar os resultados do algoritmo 2, aplicados no experimento A, será discutida brevemente a motivação de utilizar regressão linear entre produto interno e temperatura.

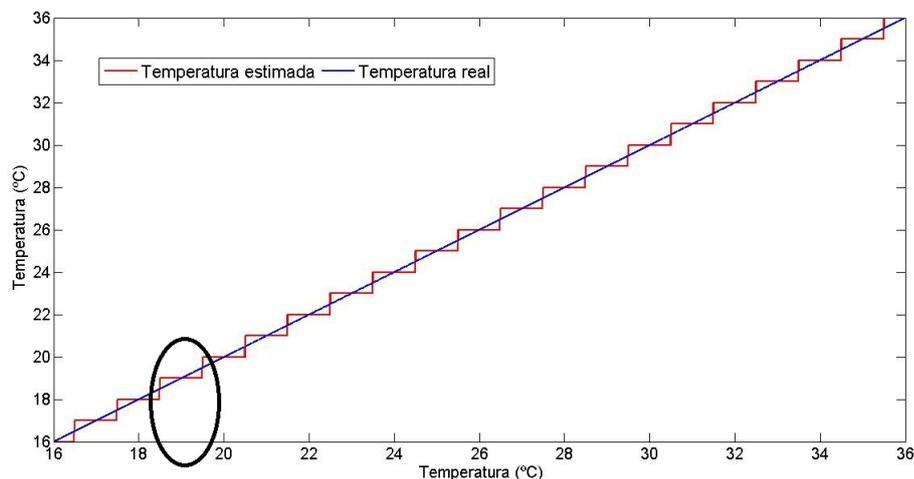


Figura 26 – Temperatura real e temperatura estimada pelo algoritmo 1 com  $\Delta = 1$  para o espaçamento entre as temperaturas. A diferença entre elas resulta na Figura (25(a)).

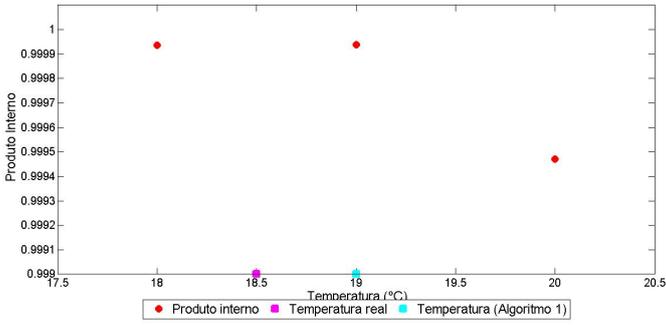
A Figura (26) mostra a temperatura real (linha reta) e a temperatura estimada pelo algoritmo 1 (“função escada”). Neste caso foi utilizado o BD com  $\Delta = 1$ . Na Figura, pode-se observar que no intervalo do domínio  $I = [18, 50; 19, 49]$  o algoritmo 1 retornou o valor de  $19^{\circ}\text{C}$  para a temperatura. Os círculos da Figura (25(a)) mostram que o maior erro se encontra nos extremos do intervalo  $I$ . Assim, o algoritmo 2 foi desenvolvido para diminuir o erro próximo das extremidades destes intervalos sem interferir, significativamente, nas estimativas para os valores centrais.

A Figura (27) apresenta dois resultados do algoritmo 2 aplicado no experimento A. Um para a temperatura real de  $18,5^{\circ}\text{C}$  (extremo inferior do intervalo  $I$ ) e outro para temperatura real de  $19^{\circ}\text{C}$  (centro do intervalo  $I$ ).

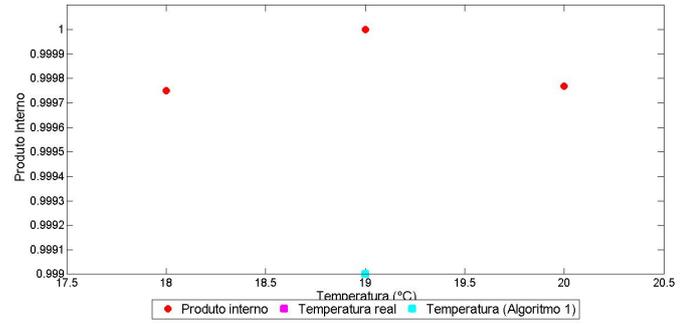
Nos dois casos o algoritmo 1 retornou a temperatura de  $19^{\circ}\text{C}$  como estimativa para uma determinada posição da imagem, pois o produto interno entre o vetor formado pelos dados do ASTER com o vetor do BD correspondente a  $19^{\circ}\text{C}$  obteve o maior resultado.

Selecionada a temperatura de  $19^{\circ}\text{C}$  do BD, o algoritmo 2 utilizou os produtos internos resultantes dos vetores formados pelo ASTER com os vetores correspondentes as temperaturas de:  $18^{\circ}\text{C}$ ,  $19^{\circ}\text{C}$  e  $20^{\circ}\text{C}$  do BD (Figuras 27 (a) e (b)).

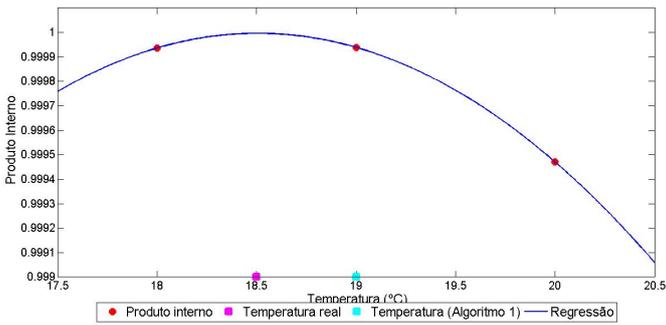
Com estes três pontos aplica-se regressão linear para um polinômio de segundo



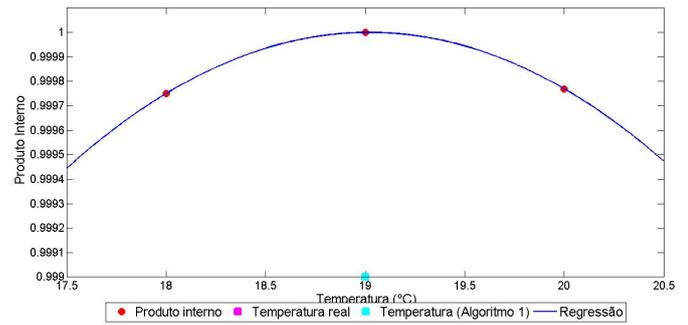
(a)  $T. \text{ real} = 18,5^{\circ}\text{C}$ ,  $T. \text{ algoritmo 1} = 19^{\circ}\text{C}$ .



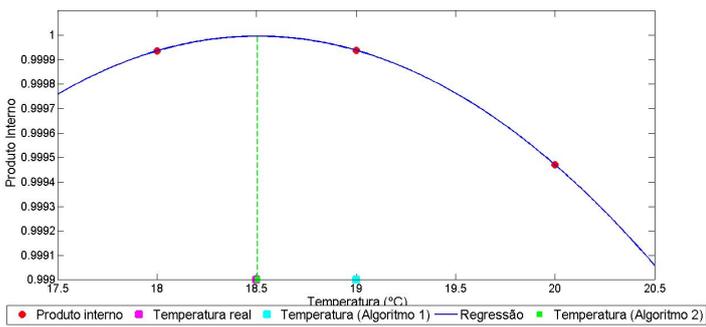
(b)  $T. \text{ real} 19^{\circ}\text{C}$ ,  $T. \text{ algoritmo 1} = 19^{\circ}\text{C}$ .



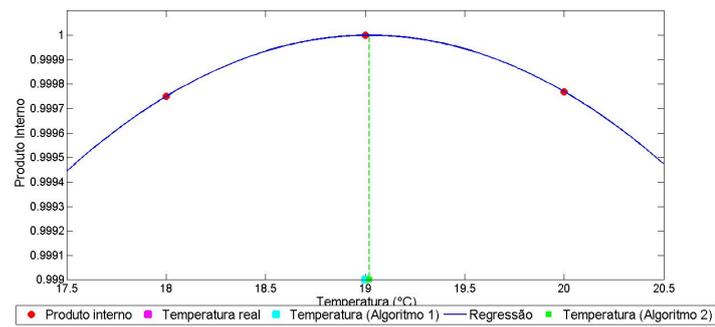
(c) Regressão linear



(d) Regressão linear



(e)  $T. \text{ algoritmo 2} = 18,5054^{\circ}\text{C}$



(f)  $T. \text{ algoritmo 2} = 19,0205^{\circ}\text{C}$

Figura 27 – Dois resultados do algoritmo 2 aplicado no experimento A com  $\Delta = 1$  para o espaçamento entre as temperaturas.

grau entre os produtos internos e suas respectivas temperaturas (Figuras 27 (c) e (d)). Na sequência calcula-se o vértice desta parábola que é a estimativa do algoritmo 2 para temperatura (Figuras 27 (e) e (f)).

Para as temperaturas reais de  $18,5^{\circ}C$  e  $19^{\circ}C$  o algoritmo 2 retornou  $18,5054^{\circ}C$  e  $19,0205^{\circ}C$  respectivamente. Enquanto o algoritmo 1 retornou  $19^{\circ}C$  nos dois casos. Isto é, o erro na extremidade inferior do intervalo diminuiu significativamente e pouca alteração foi observado no valor central<sup>2</sup>.

Tabela 10 – Estatísticas descritivas dos erros do algoritmo 2 aplicado no experimento A.

| Erro ( $^{\circ}C$ )                          |         |        |           |         |
|---|---------|--------|-----------|---------|
| (Temperatura Real Menos Temperatura Estimada) |         |        |           |         |
| $\Delta$                                      | Mínimo  | Máximo | Amplitude | Média   |
| 1   | -0,0206 | 0,0378 | 0,0584    | -0,0135 |
| 2   | -0,0821 | 0,1416 | 0,2237    | -0,0484 |
| 4   | -0,3275 | 0,5104 | 0,8379    | -0,1520 |
| 5   | -0,5110 | 0,7710 | 1,2820    | -0,2069 |
| 10  | -1,9905 | 2,5996 | 4,5901    | -0,2729 |

A Tabela (10) resume algumas estatísticas descritivas relacionadas aos erros do algoritmo 2 aplicado no experimento A. E a Tabela (11) mostra o desvio padrão do erro teórico ( $\sigma_e$ ) calculado pela Equação (8.25), e o desvio-padrão do erro dos resultados provenientes da aplicação do algoritmo 2.

Tabela 11 – Desvios-padrão dos erros tóricos e dos resultados provenientes da aplicação do algoritmo 2.

| Desvio-Padrão do Erro ( $\sigma_e$ ) |         |             |
|--------------------------------------|---------|-------------|
| $\Delta$                             | Teórico | Algoritmo 2 |
| 1                                    | 0,2886  | 0,0081      |
| 2                                    | 0,5774  | 0,0407      |
| 4                                    | 1,1547  | 0,2003      |
| 5                                    | 1,4434  | 0,3300      |
| 10                                   | 2,8867  | 1,3387      |

Seguem as considerações referentes a essas duas tabelas.

- Diferentemente do algoritmo 1, ainda não foi desenvolvido uma fórmula para calcular a amplitude do erro para o algoritmo 2. Mas os resultados mostram que as amplitudes dos erros são menores quando comparadas com as amplitudes do algoritmo 1. A coluna ‘Razão entre Amplitudes’ da Tabela (12) apresenta a razão da amplitude do algoritmo 2 pela amplitude do algoritmo 1;

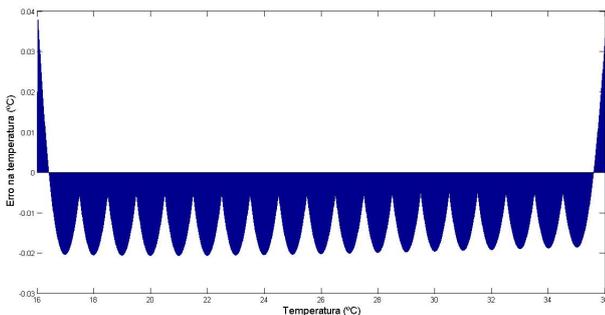
<sup>2</sup> Para a extremidade superior do intervalo  $I$  ( $19,49^{\circ}C$ ) o algoritmo 2 retornou  $19,4954^{\circ}C$ .

- As médias negativas indicam que o método tende a superestimar os valores de temperatura;
- Diferentemente do algoritmo 1, ainda não foi desenvolvida uma fórmula para calcular o desvio-padrão do erro ( $\sigma_e$ ) para o algoritmo 2. Mas os resultados mostram que esses desvios são menores quando comparados com as amplitudes do algoritmo 1. A coluna 'Razão entre Desvios-Padrão' da Tabela (12) apresenta a razão do desvio-padrão do erro do algoritmo 2 pelo desvio-padrão do erro do algoritmo 1;

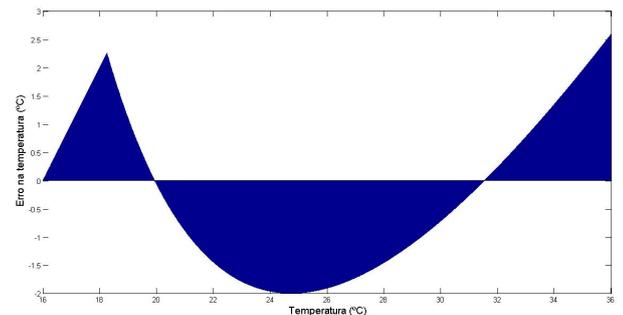
Tabela 12 – Segunda coluna mostra a razão entre a amplitude do erro do algoritmo 2 pela amplitude do erro do algoritmo 1. E a terceira coluna apresenta a razão do desvio-padrão do erro do algoritmo 2 pelo desvio-padrão do erro do algoritmo 1.

| $\Delta$ | Razão entre Amplitudes (%) | Razão entre Desvios-Padrão (%) |
|----------|----------------------------|--------------------------------|
| 1        | 5,84                       | 2,81                           |
| 2        | 11,19                      | 7,85                           |
| 4        | 20,95                      | 17,35                          |
| 5        | 25,64                      | 22,86                          |
| 10       | 45,90                      | 46,37                          |

A Figura (28) mostra os gráficos de barras das diferenças entre temperaturas reais e estimadas para  $\Delta$  igual a  $1^\circ C$  e  $10^\circ C$ .



(a) BD para  $\Delta = 1$



(b) BD para  $\Delta = 10$

Figura 28 – Diferença entre a temperatura real e a temperatura estimada pelo algoritmo 2 para dois bancos de dados simulados.

## 12.3 Discussão do experimento A

As colunas ‘Amplitude’ da Tabela (9) e da Tabela (10) mostram que os erros dos algoritmos aplicados no experimento A estão dentro dos limites teóricos para cada valor de espaçamento ( $\Delta$ ) entre as temperaturas. E o mesmo vale para as variâncias dos erros ( $\sigma_e^2$ ). No caso do algoritmo 1 estes valores são praticamente iguais. No entanto, os erros e os desvios-padrão dos erros para o algoritmo 2 são muito menores que os erros/desvios teóricos. Para  $\Delta = 1$  a amplitude do erro foi de 0,0584 e para  $\Delta = 10$  foi de 4,5901, isto é, eles correspondem a 5,84 % e 45,90 % do erro teórico, respectivamente, para cada caso.

A Seção (8.2) tratou de calcular o erro e o desvio-padrão do erro para o algoritmo 1, mas o desenvolvimento teórico para o algoritmo 2 não foi realizado. Assim, o segundo algoritmo obteve resultados mais precisos do que o primeiro, contudo não foi desenvolvido uma teoria que demonstre esta observação.

Este experimento foi projetado para simular bancos de dados a partir de dados reais de quartzo de tal forma que os intervalos entre as temperaturas fossem iguais para cada BD. Neste caso, os algoritmos 1 e 2 obtiveram resultados mais precisos para espaçamentos ( $\Delta$ ) menores. Mas na prática nem sempre é possível coletar dados de laboratório com intervalos de temperaturas muito próximos. Neste caso, o experimento A indica que o algoritmo 2 deve ser utilizado, pois seus resultados foram muito mais próximos dos dados reais.

Observação: O algoritmo 1 utiliza a operação de produto interno entre os dados do sensor e do BD para determinar a semelhança entre os vetores. Todos os resultados dos produtos internos deste experimento retornaram valores maiores do que 0,9429, isto é, muito próximos de 1 que é o maior valor possível. Isso indica que algumas modificações no algoritmo podem ser efetuadas para utilizá-lo como um método de classificação de alvos em imagens de satélites. Assim, a identificação da presença de um alvo para um determinado pixel fica condicionada ao valor do produto interno da imagem com o BD. Se o produto interno for maior que um determinado limiar, então o pixel será classificado com a provável presença do alvo de interesse.

## 12.4 Resultados do experimento B: algoritmo 1

Neste experimento foram utilizados dados do subsistema TIR/ASTER e dados brutos coletados em ambiente controlado para compor o BD.

A Tabela (13) resume algumas estatísticas descritivas relacionadas aos erros do algoritmo 1 aplicado no experimento B.

Tabela 13 – Estatísticas descritivas dos erros do algoritmo 1 aplicado no experimento B.

| Erro ( $^{\circ}C$ )                                   |        |           |       |               |
|--|--------|-----------|-------|---------------|
| (Temperatura de Referência menos Temperatura Estimada) |        |           |       |               |
| Mínimo   | Máximo | Amplitude | Média | Desvio-Padrão |
| -5,75  | -14,45 | 8,70      | -9,77 | 2,60          |

O algoritmo 1 retornou a estimativa de  $35,5^{\circ}C$  para os 13 pixels analisados. O que resultou em um erro médio de  $-9,7731^{\circ}C$ . A Figura (29) apresenta o gráfico de barras dos erros do algoritmo 1 neste experimento.

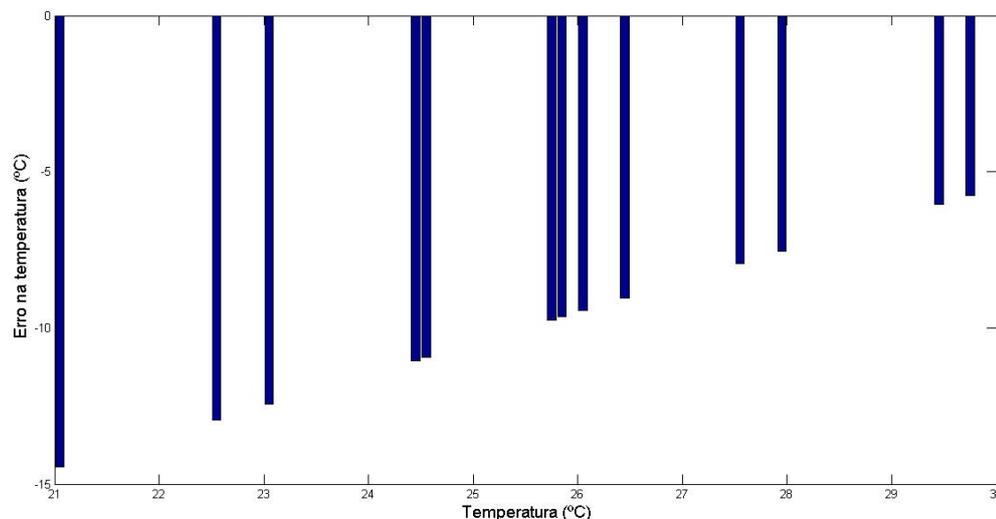


Figura 29 – Diferença entre a temperatura de referência e a temperatura estimada pelo algoritmo 1 para o experimento B.

## 12.5 Resultados do experimento B: algoritmo 2

Os mesmos dados de entrada da Seção anterior (12.4) foram utilizados no segundo algoritmo. A Tabela (14) resume algumas estatísticas descritivas relacionadas aos erros do algoritmo 2 aplicado no experimento B.

Tabela 14 – Estatísticas descritivas dos erros do algoritmo 2 aplicado no experimento B.

| Erro ( $^{\circ}C$ )                                   |         |           |         |               |
|--|---------|-----------|---------|---------------|
| (Temperatura de Referência menos Temperatura Estimada) |         |           |         |               |
| Mínimo   | Máximo  | Amplitude | Média   | Desvio-Padrão |
| -1,0843  | -5,3825 | 4,2982    | -3,9052 | 1,4533        |

Por estes resultados pode-se observar que o algoritmo 2 retornou estimativas mais aproximadas dos valores de referência em comparação com o primeiro método. A média do erro foi de  $-3,9052^{\circ}C$  e o menor erro foi de  $-1,08^{\circ}C$ . A Tabela (15) mostra as estimativas para cada pixel.

Tabela 15 – Temperatura de referência (AST08) e temperatura estimada pelo algoritmo 2 para cada pixel analisado.

| Temperatura ( $^{\circ}C$ ) |       |             |
|-----------------------------|-------|-------------|
| Pixel                       | AST08 | Algoritmo 2 |
| 1                           | 21,05 | 26,1959     |
| 2                           | 22,55 | 27,8255     |
| 3                           | 23,05 | 27,4798     |
| 4                           | 24,45 | 29,8325     |
| 5                           | 24,55 | 29,7429     |
| 6                           | 25,75 | 30,4155     |
| 7                           | 25,85 | 30,2994     |
| 8                           | 26,05 | 30,2327     |
| 9                           | 25,45 | 30,4673     |
| 10                          | 27,55 | 30,3731     |
| 11                          | 27,95 | 30,6835     |
| 12                          | 29,45 | 30,8359     |
| 13                          | 29,75 | 30,8343     |

E conforme apresentado na Figura (30) o segundo menor erro foi de  $-1,39^{\circ}C$ . Pode-se observar que os pixels com menores erros estão mais próximos dos valores  $29,3^{\circ}C$ ;  $35^{\circ}C$  e  $35,5^{\circ}C$  do BD.

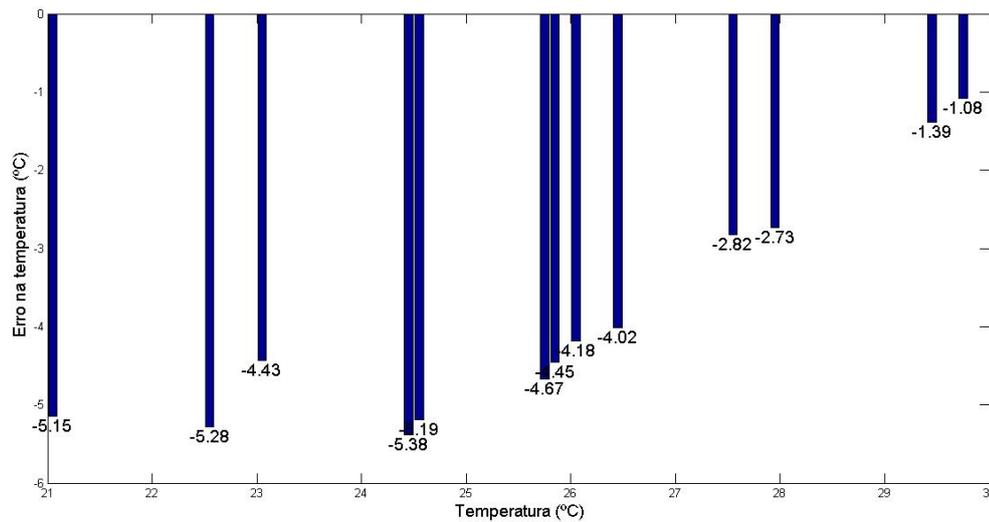


Figura 30 – Diferença entre a temperatura de referência e a temperatura estimada pelo algoritmo 2 para o experimento B.

## 12.6 Discussão do experimento B

O experimento B, ao contrário do experimento A, utilizou dados do subsistema TIR/ASTER e dados brutos de laboratório para compor o BD. As 13 temperaturas selecionadas da imagem ASTER variam entre  $21,05^{\circ}\text{C}$  e  $29,75^{\circ}\text{C}$  com espaçamentos não-uniformes, bem como os valores das temperaturas do banco de dados ( $16,3^{\circ}\text{C}$ ;  $29,3^{\circ}\text{C}$ ;  $35,0^{\circ}\text{C}$  e  $35,5^{\circ}\text{C}$ ) conforme apresentado na Figura (31). Neste caso, o tamanho do passo do quantizador  $\Delta$  definido na Equação (8.18) não é uniforme, então a análise dos erros de quantização da Seção (8.2) não pode ser utilizada.

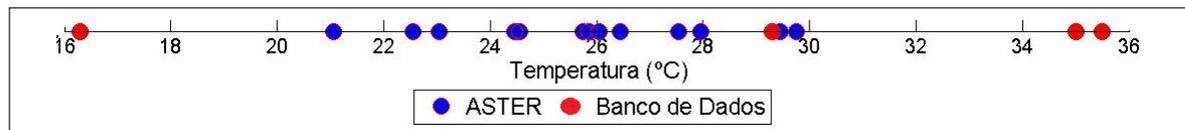


Figura 31 – Distribuição das temperaturas dos 13 pixels do sensor TIR/ASTER e das 4 temperaturas do banco de dados.

Os algoritmos 1 e 2 obtiveram resultados bem diferentes quando aplicados no experimento B. O primeiro método retornou o mesmo resultado para os 13 pixels analisados ( $35,5^{\circ}\text{C}$ ), já o segundo método obteve uma maior variedade de estimativas para a temperatura. Tais estimativas foram mais precisas nos valores próximos dos valores  $29,3^{\circ}\text{C}$ ;  $35^{\circ}\text{C}$  e  $35,5^{\circ}\text{C}$  do BD. Este fato, bem como os resultados do experimento A, indicam que um BD com temperaturas distribuídas mais uniformemente, ao longo de uma faixa de temperatura, pode auxiliar a retornar resultados mais precisos. O experimento A também

indicou que os dois algoritmos tendem a superestimar os valores de temperatura.

O Capítulo (7) tratou das principais restrições referentes a recuperação da TST e da EST. Das seis restrições discutidas neste Capítulo, duas serão comentadas para o experimento B.

O efeito da atmosfera (Seção 7.1) junto com a determinação dos parâmetros atmosféricos (Seção 7.4) devem ser os fatores que mais influenciaram na precisão das estimativas. A atmosfera úmida da região de estudo afeta significativamente as estimativas. A alta concentração de vapor d'água pode resultar em erros na temperatura de  $2^{\circ}C$  (FREITAS et al., 2010) até  $11^{\circ}C$  (LI, 2014).

No experimento B, os dados passaram pelo processo de correção atmosférica em que seus parâmetros foram estimados pelo modelo de transferência radiativa implementado no software MODTRAN (BERK et al., 2011). A temperatura atmosférica e a umidade relativa são dois parâmetros de entrada deste modelo. Assim, os perfis verticais destes parâmetros devem ser captados de forma adequada, pois a variabilidade interfere no resultado das estimativas. No entanto, os dados de entrada para o modelo de transferência radiativa foram obtidos pela estação meteorológica junto ao aeroporto de Porto Alegre que fica a aproximadamente 50 Km da região de estudo.

Observação: Da mesma forma que no experimento A, o algoritmo 1 retornou valores dos produtos internos muito próximos de 1 (neste experimento foram maiores do que 0,9119). O que indica mais uma vez a possibilidade de utilizá-lo como um método de classificação de alvos em imagens de satélites.

# Conclusões

Os algoritmos propostos neste trabalho obtiveram desempenho dentro do esperado para dados simulados livres de interferência atmosférica. As precisões das estimativas estão vinculadas ao tamanho do espaçamento ( $\Delta$ ) entre as temperaturas. Sendo que essas estimativas têm erros menores do que  $\frac{\Delta}{2}$ .

Nos dados simulados do experimento A, utilizou-se regressão linear para simular os dados, sendo que pode-se utilizar outras funções de ajuste de curvas. Como uma função exponencial por exemplo. Esta escolha para a função de regressão não precisa ser a mesma para todas as bandas do sensor.

Para dados de radiância que sofreram a interferência da atmosfera, deve-se corrigir este efeito com dados mais precisos da coluna de vapor d'água, temperatura atmosférica e outros gases da região de estudo no momento da captação da imagem. Neste caso, os métodos devem recuperar estimativas mais precisas.

Na média, os métodos tendem a superestimar os valores de temperatura. Esta constatação deve ser investigada em trabalhos futuros.

O segundo algoritmo obteve resultados mais precisos em relação ao primeiro quando aplicado em dados simulados.

Em dados reais, em que a interferência da atmosfera não foi removida completamente, o segundo algoritmo obteve resultados satisfatórios quando a temperatura de referência estava próxima dos valores do BD.

Algumas modificações no primeiro algoritmo proposto podem ser implementadas a fim de utilizá-lo como método de classificação de alvos em imagens orbitais. Neste caso, o algoritmo permite identificar os pixels da imagem que devem conter o alvo de interesse.

Os algoritmos podem ser aplicados em outros sensores além do TIR/ASTER, pois os métodos não fazem restrição quanto ao número de canais do sensor. Outra possibilidade é na construção de experimentos laboratoriais em que alguns cenários de interesse são criados. Neste trabalho foi utilizada a assinatura do quartzo para diferentes temperaturas, mas outros alvos ou composições com mais de um alvo podem ser criados. Alvos imersos em diferentes condições atmosféricas também devem ser considerados. Neste último caso, as imagens de satélites não precisam passar pelo processo de correção atmosférica, pois o BD seria formado por alvos com interferência da atmosfera.

## Perspectivas

- Testar os algoritmos desenvolvidos em dados de radiância com correções atmosféricas mais precisas;
- Criar banco de dados de radiância e emissividade com temperaturas distribuídas mais uniformemente ao longo de um determinado intervalo;
- Criar bancos de dados que contenham misturas de dois ou mais alvos em diferentes temperaturas;
- Avaliar a possibilidade de aplicar a desigualdade de Cauchy-Schwarz na classificação de alvos em imagens de satélite;
- Fazer testes com bancos de dados “híbridos” compostos por dados reais e dados criados por técnicas de interpolação;
- Aplicar os algoritmos em dados provenientes de outros sensores orbitais;
- Desenvolver uma teoria matemática para os limites dos erros do algoritmo 2;
- Desenvolver uma teoria matemática para o desvio-padrão dos erros do algoritmo 2;
- Desenvolver um fator de correção para diminuir a tendência de superestimar a temperatura dos métodos propostos.

# Referências

- ABRAMS, M.; HOOK, S.; RAMACHANDRAN, B. Aster user handbook, version 2. *Jet propulsion laboratory*, v. 4800, p. 135, 2002.
- ANDREESCU, T. *Essential Linear Algebra with Applications*. [S.l.]: Springer, 2014.
- BARDUCCI, A.; PIPPI, I. Temperature and emissivity retrieval from remotely sensed images using the “grey body emissivity” method. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 34, n. 3, p. 681–695, 1996.
- BECKER, F.; LI, Z.-L. Temperature-independent spectral indices in thermal infrared bands. *Remote Sensing of Environment*, Elsevier, v. 32, n. 1, p. 17–33, 1990.
- BECKER, F.; LI, Z.-L. Surface temperature and emissivity at various scales: Definition, measurement and related problems. *Remote Sensing Reviews*, Taylor & Francis, v. 12, n. 3-4, p. 225–253, 1995.
- BERK, A. et al. Modtran® 5.2. 2 user’s manual, spectral sciences. *Inc., MA*, p. 5–6, 2011.
- BRUTSAERT, W. *Evaporation into the atmosphere: theory, history and applications*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2013.
- DASH, P. et al. Retrieval of land surface temperature and emissivity from satellite data: Physics, theoretical limitations and current methods. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, Springer, v. 29, n. 1-2, p. 23–30, 2001.
- ELACHI, C.; ZYL, J. J. V. *Introduction to the physics and techniques of remote sensing*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2006.
- FARMER, G. T.; COOK, J. Climate change science as earth science. In: *Climate Change Science: A Modern Synthesis*. [S.l.]: Springer, 2013. p. 159–176.
- FREITAS, S. C. et al. Quantifying the uncertainty of land surface temperature retrievals from sevir/meteosat. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 48, n. 1, p. 523–534, 2010.
- GILAT, A. *MATLAB: an introduction with applications*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2009.
- GILLESPIE, A. et al. A temperature and emissivity separation algorithm for advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (aster) images. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 36, n. 4, p. 1113–1126, 1998.
- GILLESPIE, A. R. et al. Residual errors in aster temperature and emissivity standard products ast08 and ast05. *Remote Sensing of Environment*, Elsevier, v. 115, n. 12, p. 3681–3694, 2011.
- GILLESPIE, A. R.; KAHLE, A. B.; WALKER, R. E. Color enhancement of highly correlated images. i. decorrelation and hsi contrast stretches. *Remote Sensing of Environment*, Elsevier, v. 20, n. 3, p. 209–235, 1986.

- GILLESPIE, A. R. et al. Temperature/emissivity separation algorithm theoretical basis document, version 2.4. *NASA/GSFC, Greenbelt, MD*, 1999.
- GOODMAN, J. A.; SAMUEL, J.; STUART, R. Coral reef remote sensing. *A guide for mapping, monitoring and management*. 436p, Springer, 2013.
- GREEN, A.; CRAIG, M. Analysis of aircraft spectrometer data with logarithmic residuals. In: *JPL Proc. of the Airborne Imaging Spectrometer Data Anal. Workshop p 111-119(SEE N 86-11618 02-43)*. [S.l.: s.n.], 1985.
- GRONDONA, A. E. B. *Estimativa da temperatura-emissividade de alvos com base em regressões de dados de sensoriamento remoto proximal*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, maio 2015.
- HOOK, S. J. et al. A comparison of techniques for extracting emissivity information from thermal infrared data for geologic studies. *Remote Sensing of Environment*, Elsevier, v. 42, n. 2, p. 123–135, 1992.
- HOOK, S. J.; KAHLE, A. B. The micro fourier transform interferometer ( $\mu$ ftir)—a new field spectrometer for acquisition of infrared data of natural surfaces. *Remote Sensing of Environment*, Elsevier, v. 56, n. 3, p. 172–181, 1996.
- JENSEN, J. R. et al. *Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres*. [S.l.]: Parêntese Editora, 2011.
- JIMÉNEZ-MUÑOZ, J.; SOBRINO, J.; GILLESPIE, A. Noise in emissivity images obtained from the aster temperature and emissivity separation (tes) algorithm: A case study of airborne imagery and implications for aster. *Proc. 3rd Adv. Quantitative Remote Sens.*, p. 770–775, 2010.
- JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C. et al. Surface emissivity retrieval from airborne hyperspectral scanner data: Insights on atmospheric correction and noise removal. *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, IEEE, v. 9, n. 2, p. 180–184, 2012.
- KAHLE, A. B.; ALLEY, R. E. Separation of temperature and emittance in remotely sensed radiance measurements. *Remote Sensing of Environment*, Elsevier, v. 42, n. 2, p. 107–111, 1992.
- KEALY, P. S.; HOOK, S. J. Separating temperature and emissivity in thermal infrared multispectral scanner data: Implications for recovering land surface temperatures. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 31, n. 6, p. 1155–1164, 1993.
- KUENZER, C.; DECH, S. *Thermal Infrared Remote Sensing: Sensors, Methods, Applications*. [S.l.]: Springer, 2013.
- LI, Z.-L. Quantitative remote sensing in thermal infrared. Springer Berlin Heidelberg, 2014.
- LI, Z.-L. et al. Evaluation of six methods for extracting relative emissivity spectra from thermal infrared images. *Remote Sensing of Environment*, Elsevier, v. 69, n. 3, p. 197–214, 1999.

- LI, Z.-L. et al. Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives. *Remote Sensing of Environment*, Elsevier, v. 131, p. 14–37, 2013.
- LI, Z.-L. et al. Land surface emissivity retrieval from satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, Taylor & Francis, v. 34, n. 9-10, p. 3084–3127, 2013.
- LINDSEY, J. K. *Applying generalized linear models*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 1997.
- LIU, K.-N. *An introduction to atmospheric radiation*. [S.l.]: Academic press, 2002.
- MARKOSKI, P. R. *ANÁLISE DA QUALIDADE RADIOMÉTRICA DO PRODUTO DE EMISSIVIDADE DAS IMAGENS DO SUBSISTEMA TIR – SENSOR ASTER (PLATAFORMA EOS TERRA)*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, junho 2015.
- MELFI, A. et al. Geological and magmatic aspects of the paraná basin: an introduction. *The Mesozoic Flood Volcanism of the Parana Basin: petrogenetic and geophysical aspects*. São Paulo: USP, p. 1–14, 1988.
- MORETTIN, P. A. *Ondas e ondaletas: da análise de Fourier à análise de ondaletas*. [S.l.]: Edusp, 2014.
- NETZBAND, M.; STEFANOV, W.; REDMAN, C. *Applied Remote Sensing for Urban Planning, Governance and Sustainability*. [S.l.]: Springer, 2007.
- OPPENHEIM, A. V. et al. *Discrete-time signal processing*. 2. ed. [S.l.]: Prentice-hall Englewood Cliffs, 1998.
- PREVIATO, E. *Dictionary of applied math for engineers and scientists*. [S.l.]: CRC press, 2002.
- RAMACHANDRAN, B.; JUSTICE, C. O.; ABRAMS, M. J. *Land Remote Sensing and Global Environmental Change: NASA's Earth Observing System and the Science of ASTER and MODIS*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2010.
- RASHED, T.; JÜRGENS, C. *Remote Sensing of Urban and Suburban Areas*. [S.l.]: Springer, 2010.
- RICHARDS, J. A. *Remote sensing digital image analysis*. [S.l.]: Springer, 2013.
- RICHTER, R.; SCHLÄPFER, D. Atmospheric/topographic correction for satellite imagery. *DLR report DLR-IB*, p. 565–01, 2015.
- SCHOWENGERDT, R. A. *Remote sensing: models and methods for image processing*. 3. ed. [S.l.]: Academic press, 2006.
- SEBER, G. A. *A matrix handbook for statisticians*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2008.
- SOBRINO, J. et al. A simple algorithm to estimate evapotranspiration from dais data: Application to the daisex campaigns. *Journal of hydrology*, Elsevier, v. 315, n. 1, p. 117–125, 2005.
- SOUZA, M. A. F. et al. *Algoritmos e Lógica de Programação*. [S.l.]: THOMSON LEARNING, 2004.

STEELE, J. M. *The Cauchy-Schwarz master class: an introduction to the art of mathematical inequalities*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2004.

TONOOKA, H.; PALLUCONI, F. D. Validation of aster/tir standard atmospheric correction using water surfaces. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 43, n. 12, p. 2769–2777, 2005.

TONOOKA, H.; WATANABE, A.; MINOMO, T. Aster/tir vicarious calibration and band emissivity measurements on frozen lake. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. *Remote Sensing*. [S.l.], 2005. p. 59830X–59830X.

VIDAL, A. Atmospheric and emissivity correction of land surface temperature measured from satellite using ground measurements or satellite data. *REMOTE SENSING*, Taylor & Francis, v. 12, n. 12, p. 2449–2460, 1991.

WATSON, K. Spectral ratio method for measuring emissivity. *Remote sensing of Environment*, Elsevier, v. 42, n. 2, p. 113–116, 1992.

WATSON, K. Two-temperature method for measuring emissivity. *Remote Sensing of Environment*, Elsevier, v. 42, n. 2, p. 117–121, 1992.

# Apêndices

# APÊNDICE A – Símbolos do Fluxogramas

Neste trabalho, os símbolos dos fluxogramas são agrupados em três categorias: dados, processos e linhas. (SOUZA et al., 2004)

Tabela 16 – Tabela de símbolos

| Símbolo   | Nome     | Utilidade   |
|---|----------|---|
|  | Dados    | Representa os dados, tanto de entrada como de saída.        |
|  | Processo | Representa o processamento de uma função.                   |
|  | seta     | Sentido do fluxo.   |
|  | Etapa    | Neste trabalho, representa o número da etapa do fluxograma. |

## APÊNDICE B – Função Resposta: Subsistema TIR/ASTER

Abaixo estão representadas as funções resposta referentes as bandas do subsistema TIR/ASTER utilizadas para realizar a reamostragem dos dados de laboratório.

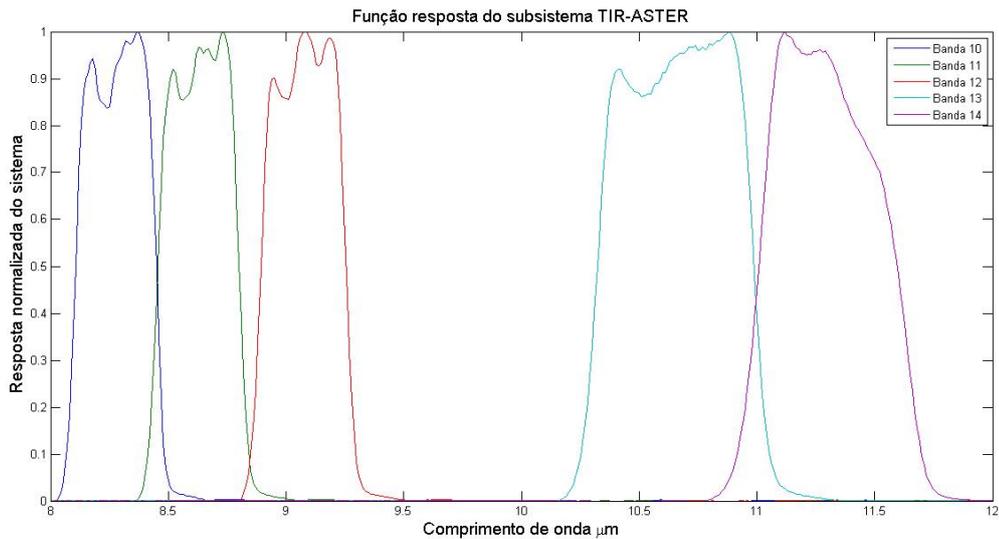


Figura 32 – Função Resposta do subsistema TIR/ASTER. Os dados utilizados para desenhar estas funções podem ser encontrados no site: <[https://asterweb.jpl.nasa.gov/content/01\\_mission/03\\_instrument/archive/tir.txt](https://asterweb.jpl.nasa.gov/content/01_mission/03_instrument/archive/tir.txt)>

# APÊNDICE C – Método dos mínimos quadrados

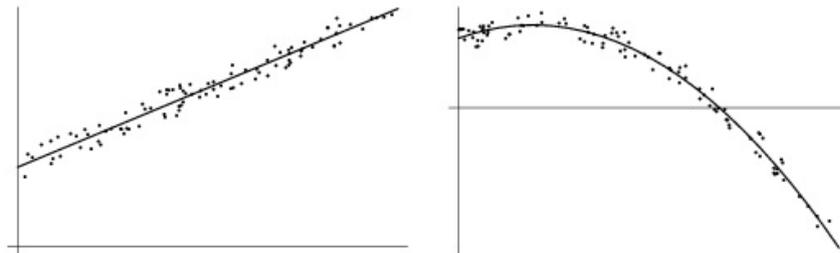


Figura 33 – a) Ajuste linear. b) Ajuste quadrático.

Um procedimento formal para encontrar a curva de melhor ajuste para um determinado conjunto de pontos é minimizando a soma dos quadrados dos resíduos (diferenças entre os valores observados e estimados) dos pontos da curva (LINDSEY, 1997).

Este procedimento fornece uma função de ajuste para a variável independente  $x$  que estima outra variável dependente  $y$ . Além disto, a técnica permite generalizar a reta de melhor ajuste para o polinômio de ordem  $k$  que minimiza os erros.

A técnica de regressão linear de mínimos quadrados oferece uma solução para o problema de encontrar a função que melhor representa um conjunto de pontos. A linearidade está relacionada com os parâmetros do modelo.

## C.1 Polinômio de primeiro grau

Dado um conjunto de dados  $(x_i, y_i)$  com  $n$  elementos. O procedimento para encontrar a função de primeiro grau que minimiza os resíduos inicia por encontrar as derivadas de  $R^2$  do conjunto de  $n$  pontos.

$$R^2 = \sum [y_i - f(x_i, a_1, a_2, \dots, a_n)]^2 \quad (\text{C.1})$$

a partir de uma função  $f$  em que  $a_1, a_2, \dots, a_n$  são os coeficientes da função.

A condição para  $R^2$  ser mínimo é

$$\frac{\partial(R^2)}{\partial a_i} = 0 \quad (\text{C.2})$$

para  $i = 1, \dots, n$ . Para um ajuste linear, pode-se escrever a função da seguinte forma

$$f(a, b) = a + bx, \quad (\text{C.3})$$

então

$$R^2(a, b) = \sum_{i=1}^n [y_i - (a + bx_i)]^2 \quad (\text{C.4})$$

$$\frac{\partial(R^2)}{\partial a} = -2 \sum_{i=1}^n [y_i - (a + bx_i)] = 0 \quad (\text{C.5})$$

$$\frac{\partial(R^2)}{\partial b} = -2 \sum_{i=1}^n [y_i - (a + bx_i)]x_i = 0. \quad (\text{C.6})$$

Estes levam às equações

$$na + b \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n y_i \quad (\text{C.7})$$

$$a \sum_{i=1}^n x_i + b \sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^n x_i y_i. \quad (\text{C.8})$$

Na forma matricial, tem-se

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i \end{bmatrix} \quad (\text{C.9})$$

então

$$\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i \end{bmatrix} \quad (\text{C.10})$$

A matriz inversa  $2 \times 2$  é

$$\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ \frac{1}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i y_i \\ n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i \end{bmatrix}. \quad (\text{C.11})$$

Desta forma

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (\text{C.12})$$

$$= \frac{\bar{y}(\sum_{i=1}^n x_i^2) - \bar{x} \sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2} \quad (\text{C.13})$$

$$b = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (\text{C.14})$$

$$= \frac{(\sum_{i=1}^n x_i y_i) - n\bar{x}\bar{y}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2} \quad (\text{C.15})$$

Pode-se reescrever  $a$  e  $b$  de forma mais simples, definindo a soma dos quadrados

$$ss_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (\text{C.16})$$

$$= \left( \sum_{i=1}^n x_i^2 \right) - n\bar{x}^2 \quad (\text{C.17})$$

$$ss_{yy} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (\text{C.18})$$

$$= \left( \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) - n\bar{y}^2 \quad (\text{C.19})$$

$$ss_{xy} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \quad (\text{C.20})$$

$$= \left( \sum_{i=1}^n x_i y_i \right) - n\bar{x}\bar{y}, \quad (\text{C.21})$$

no qual pode ser escrita como

$$\sigma_x^2 = \frac{ss_{xx}}{n} \quad (\text{C.22})$$

$$\sigma_y^2 = \frac{ss_{yy}}{n} \quad (\text{C.23})$$

$$cov(x, y) = \frac{ss_{xy}}{n} \quad (\text{C.24})$$

Aqui,  $cov(x, y)$  é a covariância e  $\sigma_x^2$  e  $\sigma_y^2$  são variâncias. Note que as quantidades  $\sum_{i=1}^n x_i y_i$  e  $\sum_{i=1}^n x_i^2$  também podem ser interpretadas como produtos internos

$$\sum_{i=1}^n x_i^2 = \mathbf{x} \cdot \mathbf{x} \quad (\text{C.25})$$

$$\sum_{i=1}^n x_i y_i = \mathbf{x} \cdot \mathbf{y}. \quad (\text{C.26})$$

Em termos de somas de quadrados, o coeficiente de regressão  $b$  é dado por

$$b = \frac{\text{cov}(x, y)}{\sigma_x^2} = \frac{SS_{xy}}{SS_{xx}}, \quad (\text{C.27})$$

e  $a$  é dado em termos de  $b$  usando a Equação (C.7) como

$$a = \bar{y} - b\bar{x}. \quad (\text{C.28})$$

A qualidade do ajuste é então parametrizada em termos do coeficiente de determinação ( $r^2$ ), definido por

$$r^2 = \frac{SS_{xy}^2}{SS_{xx}SS_{yy}}. \quad (\text{C.29})$$

## C.2 Polinômio de segundo grau

No caso em que deseja-se utilizar um polinômio de segundo grau para ajustar os dados  $(x_i, y_i)$ , tem-se

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2, \quad (\text{C.30})$$

assim, o resíduo é dado por

$$R^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - (a_0 + a_1x_i + a_2x_i^2)]^2. \quad (\text{C.31})$$

as derivadas parciais são

$$\frac{\partial(R^2)}{\partial a_0} = -2 \sum_{i=1}^n [y - (a_0 + a_1x + a_2x_i^2)] = 0 \quad (\text{C.32})$$

$$\frac{\partial(R^2)}{\partial a_1} = -2 \sum_{i=1}^n [y - (a_0 + a_1x + a_2x_i^2)]x = 0 \quad (\text{C.33})$$

$$\frac{\partial(R^2)}{\partial a_2} = -2 \sum_{i=1}^n [y - (a_0 + a_1x + a_2x_i^2)]x^2 = 0 \quad (\text{C.34})$$

estas equações levam a

$$a_0 n + a_1 \sum_{i=1}^n x_i + a_2 \sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^n y_i \quad (\text{C.35})$$

$$a_0 \sum_{i=1}^n x_i + a_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 + a_2 \sum_{i=1}^n x_i^3 = \sum_{i=1}^n x_i y_i \quad (\text{C.36})$$

$$a_0 \sum_{i=1}^n x_i^2 + a_1 \sum_{i=1}^n x_i^3 + a_2 \sum_{i=1}^n x_i^4 = \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i \quad (\text{C.37})$$

ou na forma matricial

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i^3 \\ \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i^3 & \sum_{i=1}^n x_i^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i \end{bmatrix}, \quad (\text{C.38})$$

esta é uma matriz de Vandermonde (SEBER, 2008). Também pode-se obter a matriz de ajuste por mínimos quadrados da seguinte forma

$$\begin{bmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 \\ 1 & x_2 & x_2^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n & x_n^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}. \quad (\text{C.39})$$

Se multiplicar ambos os lados pela transposta da primeira matriz, tem-se

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ x_1 & x_2 & \cdots & x_n \\ x_1^2 & x_2^2 & \cdots & x_n^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 \\ 1 & x_2 & x_2^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n & x_n^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ x_1 & x_2 & \cdots & x_n \\ x_1^2 & x_2^2 & \cdots & x_n^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}. \quad (\text{C.40})$$

o que resulta na expressão C.38

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i^3 \\ \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i^3 & \sum_{i=1}^n x_i^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i \end{bmatrix}. \quad (\text{C.41})$$

em notação matricial, pode-se reescrever a Equação (C.40) da seguinte forma

$$\mathbf{x}^T \mathbf{y} = \mathbf{X}^T \mathbf{X} \mathbf{a}. \quad (\text{C.42})$$

Esta equação matricial pode ser resolvida numericamente, ou pode ser invertida diretamente, se possível, para se obter o vector solução

$$\mathbf{a} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y}. \quad (\text{C.43})$$

# APÊNDICE D – Códigos-Fonte (MATLAB)

Seguem os três principais códigos-fonte deste trabalho.

## Código-Fonte referente ao Experimento A

```

1 %% Experimento A
2 clc
3 clear all
4 load('dados.mat')
5 num_bandas = 5;
6 %% Temp min e max
7 temp_min = 16;
8 temp_max = 36;
9
10 %% resolucao da temperatura
11 resol_temp_BD = 1;
12 resol_temp_ASTER = 0.01;
13
14 %% Parametros da regressao
15 rad_alpha = [0.1421 0.1695 0.1824 0.1179 0.1195];
16 rad_beta = [-0.5373 -1.5999 -2.7845 5.2761 5.3502];
17
18 emiss_alpha = [0.0087 0.0121 0.0149 -0.0009 -0.0003];
19 emiss_beta = [0.1017 -0.0352 -0.2033 0.8892 0.9130];
20
21 %% Gera o sinal
22 num_temps_BD = (((temp_max - temp_min)/resol_temp_BD) + 1);
23 num_temps_ASTER = (((temp_max - temp_min)/resol_temp_ASTER) + 1);
24
25 % temperatura C
26 sinal_temp_BD = [temp_min:resol_temp_BD:temp_max];
27 sinal_temp_ASTER = [temp_min:resol_temp_ASTER:temp_max];
28
29 % Radiancia para cada banda
30 sinal_rad_BD = zeros(num_bandas, num_temps_BD);
31 sinal_rad_ASTER = zeros(num_bandas, num_temps_ASTER);
32
33 for i=1:num_bandas
34     for j=1:num_temps_BD
35         sinal_rad_BD(i,j) = ...
36             Gera_Sinal_Reg(rad_alpha(i), rad_beta(i), sinal_temp_BD(j));
37     end
38 end

```

```
38
39 for i=1:num_bandas
40     for j=1:num_temps_ASTER
41         sinal_rad_ASTER(i,j) = ...
            Gera_Sinal_Reg(rad_alpha(i),rad_beta(i),sinal_temp_ASTER(j));
42     end
43 end
44
45 % Emissividade para cada banda
46 sinal_emiss_BD = zeros(num_bandas, num_temps_BD);
47 sinal_emiss_ASTER = zeros(num_bandas, num_temps_ASTER);
48
49 for i=1:num_bandas
50     for j=1:num_temps_BD
51         sinal_emiss_BD(i,j) = ...
            Gera_Sinal_Reg(emiss_alpha(i),emiss_beta(i),sinal_temp_BD(j));
52     end
53 end
54
55 for i=1:num_bandas
56     for j=1:num_temps_ASTER
57         sinal_emiss_ASTER(i,j) = ...
            Gera_Sinal_Reg(emiss_alpha(i),emiss_beta(i),sinal_temp_ASTER(j));
58     end
59 end
60 %% Reamostrar
61 % Funcao resposta
62 xlRange = 'C1:D401';
63
64 b10 = xlsread('Funcao_Resposta_ASTER.xlsx','b10',xlRange);
65 b10 = b10/10000;
66 x_10 = b10(:,1);
67 y_10 = b10(:,2);
68
69 b11 = xlsread('Funcao_Resposta_ASTER.xlsx','b11',xlRange);
70 b11 = b11/10000;
71 x_11 = b11(:,1);
72 y_11 = b11(:,2);
73
74 b12 = xlsread('Funcao_Resposta_ASTER.xlsx','b12',xlRange);
75 b12 = b12/10000;
76 x_12 = b12(:,1);
77 y_12 = b12(:,2);
78
79 b13 = xlsread('Funcao_Resposta_ASTER.xlsx','b13',xlRange);
80 b13 = b13/10000;
81 x_13 = b13(:,1);
```

```
82 y_13 = b13(:,2);
83
84 b14 = xlsread('Funcao_Resposta_ASTER.xlsx', 'b14', xlRange);
85 b14 = b14/10000;
86 x_14 = b14(:,1);
87 y_14 = b14(:,2);
88
89 banda_10 = [x_10 y_10];
90 banda_11 = [x_11 y_11];
91 banda_12 = [x_12 y_12];
92 banda_13 = [x_13 y_13];
93 banda_14 = [x_14 y_14];
94
95 %% Comprimento de onda central das bandas do ASTER
96 lambda_central = [8.3; 8.6; 9.1; 10.6; 11.2];
97
98 %% Radiancia reamostrada para cada temperatura
99 lamb_Rad_BD = [lambda_central sinal_rad_BD];
100 lamb_Rad_ASTER = [lambda_central sinal_rad_ASTER];
101
102 sinal_rad_10_Ream_BD = zeros(1, num_temps_BD);
103 sinal_rad_11_Ream_BD = zeros(1, num_temps_BD);
104 sinal_rad_12_Ream_BD = zeros(1, num_temps_BD);
105 sinal_rad_13_Ream_BD = zeros(1, num_temps_BD);
106 sinal_rad_14_Ream_BD = zeros(1, num_temps_BD);
107
108 sinal_rad_10_Ream_ASTER = zeros(1, num_temps_ASTER);
109 sinal_rad_11_Ream_ASTER = zeros(1, num_temps_ASTER);
110 sinal_rad_12_Ream_ASTER = zeros(1, num_temps_ASTER);
111 sinal_rad_13_Ream_ASTER = zeros(1, num_temps_ASTER);
112 sinal_rad_14_Ream_ASTER = zeros(1, num_temps_ASTER);
113
114 for i = 1:num_temps_BD
115     sinal_rad_10_Ream_BD(i) = reamostragem(banda_10, lamb_Rad_BD, i);
116     sinal_rad_11_Ream_BD(i) = reamostragem(banda_11, lamb_Rad_BD, i);
117     sinal_rad_12_Ream_BD(i) = reamostragem(banda_12, lamb_Rad_BD, i);
118     sinal_rad_13_Ream_BD(i) = reamostragem(banda_13, lamb_Rad_BD, i);
119     sinal_rad_14_Ream_BD(i) = reamostragem(banda_14, lamb_Rad_BD, i);
120 end
121
122 for i = 1:num_temps_ASTER
123     sinal_rad_10_Ream_ASTER(i) = reamostragem(banda_10, lamb_Rad_ASTER, i);
124     sinal_rad_11_Ream_ASTER(i) = reamostragem(banda_11, lamb_Rad_ASTER, i);
125     sinal_rad_12_Ream_ASTER(i) = reamostragem(banda_12, lamb_Rad_ASTER, i);
126     sinal_rad_13_Ream_ASTER(i) = reamostragem(banda_13, lamb_Rad_ASTER, i);
127     sinal_rad_14_Ream_ASTER(i) = reamostragem(banda_14, lamb_Rad_ASTER, i);
128 end
```

```
129
130 sinal_rad_Ream_BD = [sinal_rad_10_Ream_BD;sinal_rad_11_Ream_BD;...
131 sinal_rad_12_Ream_BD;sinal_rad_13_Ream_BD;sinal_rad_14_Ream_BD];
132 sinal_rad_Ream_ASTER = ...
    [sinal_rad_10_Ream_ASTER;sinal_rad_11_Ream_ASTER;...
133 sinal_rad_12_Ream_ASTER;sinal_rad_13_Ream_ASTER;sinal_rad_14_Ream_ASTER];
134
135 %% Emissividade reamostrada para cada temperatura
136
137 lamb_Emiss_BD = [lambda_central sinal_emiss_BD];
138 lamb_Emiss_ASTER = [lambda_central sinal_emiss_ASTER];
139
140 sinal_emiss_10_Ream_BD = zeros(1, num_temps_BD);
141 sinal_emiss_11_Ream_BD = zeros(1, num_temps_BD);
142 sinal_emiss_12_Ream_BD = zeros(1, num_temps_BD);
143 sinal_emiss_13_Ream_BD = zeros(1, num_temps_BD);
144 sinal_emiss_14_Ream_BD = zeros(1, num_temps_BD);
145
146 sinal_emiss_10_Ream_ASTER = zeros(1, num_temps_ASTER);
147 sinal_emiss_11_Ream_ASTER = zeros(1, num_temps_ASTER);
148 sinal_emiss_12_Ream_ASTER = zeros(1, num_temps_ASTER);
149 sinal_emiss_13_Ream_ASTER = zeros(1, num_temps_ASTER);
150 sinal_emiss_14_Ream_ASTER = zeros(1, num_temps_ASTER);
151
152 for i = 1:num_temps_BD
153 sinal_emiss_10_Ream_BD(i) = reamostragem(banda_10, lamb_Emiss_BD, i);
154 sinal_emiss_11_Ream_BD(i) = reamostragem(banda_11, lamb_Emiss_BD, i);
155 sinal_emiss_12_Ream_BD(i) = reamostragem(banda_12, lamb_Emiss_BD, i);
156 sinal_emiss_13_Ream_BD(i) = reamostragem(banda_13, lamb_Emiss_BD, i);
157 sinal_emiss_14_Ream_BD(i) = reamostragem(banda_14, lamb_Emiss_BD, i);
158 end
159
160 for i = 1:num_temps_ASTER
161 sinal_emiss_10_Ream_ASTER(i) = reamostragem(banda_10, ...
    lamb_Emiss_ASTER, i);
162 sinal_emiss_11_Ream_ASTER(i) = reamostragem(banda_11, ...
    lamb_Emiss_ASTER, i);
163 sinal_emiss_12_Ream_ASTER(i) = reamostragem(banda_12, ...
    lamb_Emiss_ASTER, i);
164 sinal_emiss_13_Ream_ASTER(i) = reamostragem(banda_13, ...
    lamb_Emiss_ASTER, i);
165 sinal_emiss_14_Ream_ASTER(i) = reamostragem(banda_14, ...
    lamb_Emiss_ASTER, i);
166 end
167
168 sinal_emiss_Ream_BD = [sinal_emiss_10_Ream_BD;sinal_emiss_11_Ream_BD;...
169 sinal_emiss_12_Ream_BD;sinal_emiss_13_Ream_BD;sinal_emiss_14_Ream_BD];
```

```
170 sinal_emiss_Ream_ASTER = ...
    [sinal_emiss_10_Ream_ASTER;sinal_emiss_11_Ream_ASTER;...
171 sinal_emiss_12_Ream_ASTER;sinal_emiss_13_Ream_ASTER;sinal_emiss_14_Ream_ASTER];
172
173 figure
174 plot(sinal_temp_BD, sinal_rad_BD, '*')
175 xlim([(temp_min-1) (temp_max+1)])
176 ylim([0 10])
177 title('\fontsize{14} Banco de dados de radiia simulada (intervalos ...
    de 10 C)')
178 xlabel('\fontsize{14} Temperatura (C)')
179 ylabel('\fontsize{14} Radiia (W m ^{-2} sr ^{-1} \mum ^{-1})')
180 legend('Banda 10', 'Banda 11', 'Banda 12', 'Banda 13', 'Banda 14', ...
    'Location','southoutside', 'Orientation', 'horizontal')
181
182 figure
183 plot(sinal_temp_ASTER, sinal_rad_ASTER, '*')
184 xlim([(temp_min-1) (temp_max+1)])
185 ylim([0 10])
186 title('\fontsize{14} Radiia captada pelo ASTER simulada (intervalos ...
    de 0,01 C)')
187 xlabel('\fontsize{14} Temperatura (C)')
188 ylabel('\fontsize{14} Radiia (W m ^{-2} sr ^{-1} \mum ^{-1})')
189 legend('Banda 10', 'Banda 11', 'Banda 12', ...
    'Location','southoutside', 'Orientation', 'horizontal')
190
191 figure
192 plot(lambda_central, sinal_rad_Ream_BD, '*')
193 ylim([0 10])
194 title('\fontsize{13} Banco de dados com espaento de 10C entre as ...
    temperaturas')
195 xlabel('\fontsize{14} Comprimento de onda (\mum)')
196 ylabel('\fontsize{14} Radiia (W m ^{-2} sr ^{-1} \mum ^{-1})')
197 legend('16 C', '26 C', '36 C', 'Location','southoutside', ...
    'Orientation', 'horizontal')
198
199 figure
200 plot(lambda_central, sinal_rad_ASTER, '*')
201 ylim([0 10])
202 title('\fontsize{13} Simula da Radiia do ASTER')
203 xlabel('\fontsize{14} Comprimento de onda (\mum)')
204 ylabel('\fontsize{14} Radiia (W m ^{-2} sr ^{-1} \mum ^{-1})')
205
206 figure
207 plot(Lamb, Rad(:,1), lambda_central, sinal_rad_BD(:,1), '*')
208 h = legend('Radiia medida em laborat para temperatura de 16,3 ...
    C','Radiia remoastrada para as bandas do ASTER');
```

```
209 set(h,'FontSize',12);
210 xlim([8 11.5])
211 ylim([0 10])
212 xlabel('\fontsize{14} Comprimento de onda (\mum)')
213 ylabel('\fontsize{14} Radiia (W m ^{-2} sr ^{-1} \mum ^{-1})')
214
215 num_temps_BD = size(sinal_temp_BD, 2);
216 num_temps_ASTER = size(sinal_temp_ASTER, 2);
217
218 num_bandas = size(sinal_rad_BD, 1);
219
220 lambda = [8.3 8.6 9.1 10.6 11.2];
221 banda = [1 2 3 4 5];
222
223 normas_BD = zeros(1, num_temps_BD);
224 normas_ATM_ASTER = zeros(1, num_temps_ASTER);
225
226 for i = 1:num_temps_BD
227     normas_BD(i) = norm(sinal_rad_BD(:,i));
228 end
229
230 for i = 1:num_temps_ASTER
231     normas_ASTER(i) = norm(sinal_rad_Ream_ASTER(:,i));
232 end
233
234 % Vetores unitos
235 % dim 1 X nmero de de temperaturas
236 sinal_rad_unit_BD = zeros(num_bandas, num_temps_BD);
237 sinal_rad_Ream_unit_ASTER = zeros(num_bandas, num_temps_ASTER);
238
239 for i = 1: num_bandas
240     for j = 1: num_temps_BD
241         sinal_rad_unit_BD(i,j) = sinal_rad_BD(i,j) / normas_BD(j);
242     end
243 end
244
245 for i = 1: num_bandas
246     for j = 1: num_temps_ASTER
247         sinal_rad_Ream_unit_ASTER(i,j) = sinal_rad_Ream_ASTER(i,j) / ...
                normas_ASTER(j);
248     end
249 end
250
251 % Verifica as normas unitas
252 sinal_rad_unit_normas_BD = zeros(1, num_temps_BD);
253 sinal_rad_Ream_unit_normas_ASTER = zeros(1, num_temps_ASTER);
254
```

```
255 for j = 1: num_temps_BD
256     sinal_rad_unit_normas_BD(j) = norm(sinal_rad_unit_BD(:,j));
257 end
258
259 for j = 1: num_temps_ASTER
260     sinal_rad_Ream_unit_normas_ASTER(j) = ...
261         norm(sinal_rad_Ream_unit_ASTER(:,j));
262 end
263 %% CS
264
265 %% Esto 1: CS
266
267 prod_internos = zeros(num_temps_ASTER, num_temps_BD);
268 prod_internos_unit = zeros(num_temps_ASTER, num_temps_BD);
269
270 for i = 1: num_temps_ASTER
271     for j = 1: num_temps_BD
272         prod_internos(i,j) = abs(sinal_rad_BD(:,j))' * ...
273             sinal_rad_Ream_ASTER(:,i);
274         prod_internos_unit(i,j) = abs(sinal_rad_unit_BD(:,j))' * ...
275             sinal_rad_Ream_unit_ASTER(:,i);
276     end
277 end
278 %% Esto 2: Escolhe o sinal que obteve o maior produto interno para ...
279     cada possl
280 % sinal do ASTER.
281 % prod_internos_unit_max: 1 col = maior prod interno e 2 col o ...
282     indice da
283 % temperatura
284 prod_internos_unit_max = zeros(num_temps_ASTER, 2);
285
286 for i = 1: num_temps_ASTER
287     [prod_internos_unit_max(i,1), prod_internos_unit_max(i,2)] = ...
288         max(prod_internos_unit(i,:));
289 end
290
291 %% Esto 3: Calcula a diferenca entre a temp real e a estimada
292
293 temp_estimada_CS = sinal_temp_BD(prod_internos_unit_max(:,2));
294 temp_estimada_CS_menos_real = sinal_temp_ASTER - temp_estimada_CS;
295
296 figure
297 plot(sinal_temp_ASTER, temp_estimada_CS, 'r', sinal_temp_ASTER, ...
298     sinal_temp_ASTER, 'LineWidth', 2)
```

```
295 xlim([16 36])
296 ylim([16 36])
297 xlabel('\fontsize{15} Temperatura (C)')
298 ylabel('\fontsize{15} Temperatura (C)')
299 h = legend('Temperatura estimada', 'Temperatura real', ...
           'Location','southoutside', 'Orientation', 'horizontal');
300 set(h, 'FontSize',16);
301 set(gca, 'fontsize',15)
302
303 figure
304 bar(sinal_temp_ASTER, temp_estimada_CS_menos_real)
305 xlim([16 36])
306 xlabel('\fontsize{15} Temperatura (C)')
307 ylabel('\fontsize{15} Erro na temperatura (C)')
308 set(gca, 'fontsize',15)
309
310 %% Experimento A
311 % Programa 3
312
313 temp_estimada_CS_Reg = zeros(1, num_temps_ASTER);
314 indice_reg = 1;
315
316 for temp_index_ASTER = 1:num_temps_ASTER
317
318     aux = prod_internos_unit_max(temp_index_ASTER, 2);
319     if (aux == 1)
320         temp_index_BD = aux;
321         vet_temp = [sinal_temp_BD(temp_index_BD) ...
                    sinal_temp_BD(temp_index_BD + 1) sinal_temp_BD(temp_index_BD ...
                    + 2)];
322         vet_prod_interno = [prod_internos_unit(temp_index_ASTER, 1) ...
                             prod_internos_unit(temp_index_ASTER, 1 + 1) ...
                             prod_internos_unit(temp_index_ASTER, 1 + 2)];
323
324         coef = polyfit(vet_temp,vet_prod_interno,2);
325         vertice_x = (-coef(2)/(2*coef(1)));
326         % Verifica o limite inferior
327         if (vertice_x <= sinal_temp_BD(temp_index_BD))
328             temp_estimada_CS_Reg(indice_reg) = sinal_temp_BD(temp_index_BD);
329         end
330
331         if (vertice_x > sinal_temp_BD(temp_index_BD))
332             temp_estimada_CS_Reg(indice_reg) = vertice_x;
333         end
334     end
335
336 if ((aux > 1) & (aux < num_temps_BD))
```

```
337     temp_index_BD = aux;
338     vet_temp = [sinal_temp_BD(temp_index_BD - 1) ...
                 sinal_temp_BD(temp_index_BD) sinal_temp_BD(temp_index_BD + 1)];
339     vet_prod_interno = [prod_internos_unit(temp_index_ASTER, ...
                 temp_index_BD - 1) prod_internos_unit(temp_index_ASTER, ...
                 temp_index_BD) prod_internos_unit(temp_index_ASTER, ...
                 temp_index_BD + 1)];
340
341     coef = polyfit(vet_temp,vet_prod_interno,2);
342     vertice_x = (-coef(2)/(2*coef(1)));
343     temp_estimada_CS_Reg(indice_reg) = vertice_x;
344 end
345
346 if (aux == num_temps_BD)
347     temp_index_BD = aux;
348     vet_temp = [sinal_temp_BD(temp_index_BD - 2) ...
                 sinal_temp_BD(temp_index_BD - 1) sinal_temp_BD(temp_index_BD)];
349     vet_prod_interno = [prod_internos_unit(temp_index_ASTER, ...
                 temp_index_BD - 2) prod_internos_unit(temp_index_ASTER, ...
                 temp_index_BD - 1) prod_internos_unit(temp_index_ASTER, ...
                 temp_index_BD)];
350
351     coef = polyfit(vet_temp,vet_prod_interno,2);
352     vertice_x = (-coef(2)/(2*coef(1)));
353     temp_estimada_CS_Reg(indice_reg) = vertice_x;
354
355     % Verifica o limite superior
356     if (vertice_x >= sinal_temp_BD(temp_index_BD))
357         temp_estimada_CS_Reg(indice_reg) = sinal_temp_BD(temp_index_BD);
358     end
359
360     if (vertice_x < sinal_temp_BD(temp_index_BD))
361         temp_estimada_CS_Reg(indice_reg) = vertice_x;
362     end
363 end
364
365 indice_reg = indice_reg + 1;
366
367 end
368
369 temp_estimada_CS_Reg_menos_real = sinal_temp_ASTER - ...
    temp_estimada_CS_Reg;
370
371 figure
372 plot(sinal_temp_ASTER, temp_estimada_CS,sinal_temp_ASTER, ...
    temp_estimada_CS_Reg, sinal_temp_ASTER, sinal_temp_ASTER)
373 xlim([16 36])
```

```
374 ylim([16 36])
375 legend('Temperatura estimada', 'Temperatura estimada com Regress, ...
        'Temperatura real', 'Location', 'southoutside', 'Orientation', ...
        'horizontal')
376 title('\fontsize{12} Rela entre Temperatura estima e temperatura real')
377 xlabel('\fontsize{14} Temperatura (C)')
378 ylabel('\fontsize{14} Temperatura (C)')
379
380 figure
381 bar(sinal_temp_ASTER, temp_estimada_CS_Reg_menos_real)
382 xlim([16 36])
383 xlabel('\fontsize{14} Temperatura (C)')
384 ylabel('\fontsize{14} Erro na temperatura (C)')
385
386 ERRO_min_CS = min(temp_estimada_CS_menos_real)
387 ERRO_max_CS = max(temp_estimada_CS_menos_real)
388 ERRO_Amplitude_CS = ERRO_max_CS - ERRO_min_CS
389 ERRO_medio_ABS_CS = mean(temp_estimada_CS_menos_real)
390
391 ERRO_min_CS_Reg = min(temp_estimada_CS_Reg_menos_real)
392 ERRO_max_CS_Reg = max(temp_estimada_CS_Reg_menos_real)
393 ERRO_Amplitude_CS_Reg = ERRO_max_CS_Reg - ERRO_min_CS_Reg
394 ERRO_medio_ABS_CS_Reg = mean(temp_estimada_CS_Reg_menos_real)
395
396  $\Delta$  = resol_temp_BD;
397
398 var_erro_teorico = ( $\Delta^2$ )/12
399 var_erro_calc_cs = var(temp_estimada_CS_menos_real)
400 var_erro_calc_cs_reg = var(temp_estimada_CS_Reg_menos_real)
401
402 dp_erro_teorico = (( $\Delta^2$ )/12)^(0.5)
403 dp_erro_calc_cs = (var(temp_estimada_CS_menos_real))^(0.5)
404 dp_erro_calc_cs_reg = (var(temp_estimada_CS_Reg_menos_real))^(0.5)
```

### Código-Fonte referente ao Experimento B

```
1 %% Experimento B
2 clear all
3
4 load('dados.mat')
5 load('atm_wet.mat')
6 load('ground_truth.mat')
7
8 num_pixeis = 13;
9 num_bandas = 5;
10 lambda_central = [8.3 8.6 9.1 10.6 11.2];
11
12 %% Corre dos dados brutos
13 ground_truth_temp = [21.05 22.55 23.05 24.45 24.55 25.75 25.85 26.05 ...
    26.45 27.55 27.95 29.45 29.75];
14 ground_truth_calibrado = zeros(num_bandas, num_pixeis);
15 ground_truth_calibrado_crescente = zeros(num_bandas, num_pixeis);
16 ground_truth = ground_truth';
17
18 ground_truth_calibrado(1,:) = 0.1 * (ground_truth(3,:));
19 ground_truth_calibrado(2,:) = 0.1 * (ground_truth(4,:));
20 ground_truth_calibrado(3,:) = 0.1 * (ground_truth(5,:));
21 ground_truth_calibrado(4,:) = 0.1 * (ground_truth(6,:));
22 ground_truth_calibrado(5,:) = 0.1 * (ground_truth(7,:));
23
24 temps_ordem_crescente_Index = [3 2 1 4 13 5 10 7 9 6 12 11 8];
25 ground_truth_calibrado_crescente = ...
    ground_truth_calibrado(:,temps_ordem_crescente_Index');
26 %% Reamostragem
27 temp_index_dados = [1 2 3 4];
28 temp_selec = T(temp_index_dados);
29
30 %% Lambda
31 % Indice
32 lamb_ASTER_index_Medio = [79 93 115 170 187];
33 lamb_selec = Lamb(lamb_ASTER_index_Medio);
34
35 %% Imagem de Emissividade reamostrados para o ASTER
36 Lamb_Emi = [Lamb Emi]; % primeira coluna com de onda e restante adiaa
37
38 %% Emissividade selecionadas (linha = lambda) e (coluna = temp)
39 emiss_selec = Emi(lamb_ASTER_index_Medio,temp_index_dados);
40
41 %% Fun resposta
42 xlRange = 'C1:D401';
```

```
43
44 b10 = xlsread('Funcao_Resposta_ASTER.xlsx', 'b10', xlRange);
45 b10 = b10/10000;
46 x_10 = b10(:,1);
47 y_10 = b10(:,2);
48
49 b11 = xlsread('Funcao_Resposta_ASTER.xlsx', 'b11', xlRange);
50 b11 = b11/10000;
51 x_11 = b11(:,1);
52 y_11 = b11(:,2);
53
54 b12 = xlsread('Funcao_Resposta_ASTER.xlsx', 'b12', xlRange);
55 b12 = b12/10000;
56 x_12 = b12(:,1);
57 y_12 = b12(:,2);
58
59 b13 = xlsread('Funcao_Resposta_ASTER.xlsx', 'b13', xlRange);
60 b13 = b13/10000;
61 x_13 = b13(:,1);
62 y_13 = b13(:,2);
63
64 b14 = xlsread('Funcao_Resposta_ASTER.xlsx', 'b14', xlRange);
65 b14 = b14/10000;
66 x_14 = b14(:,1);
67 y_14 = b14(:,2);
68
69 banda_10 = [x_10 y_10];
70 banda_11 = [x_11 y_11];
71 banda_12 = [x_12 y_12];
72 banda_13 = [x_13 y_13];
73 banda_14 = [x_14 y_14];
74
75 %% Reamostra Emissividade
76 emiss_10_Ream = zeros(1, size(temp_index_dados, 2));
77 emiss_11_Ream = zeros(1, size(temp_index_dados, 2));
78 emiss_12_Ream = zeros(1, size(temp_index_dados, 2));
79 emiss_13_Ream = zeros(1, size(temp_index_dados, 2));
80 emiss_14_Ream = zeros(1, size(temp_index_dados, 2));
81
82 for i = 1: size(temp_index_dados, 2)
83     emiss_10_Ream(i) = reamostragem(banda_10, Lamb_Emi, ...
84         temp_index_dados(i));
85     emiss_11_Ream(i) = reamostragem(banda_11, Lamb_Emi, ...
86         temp_index_dados(i));
87     emiss_12_Ream(i) = reamostragem(banda_12, Lamb_Emi, ...
88         temp_index_dados(i));
```

```

86     emiss_13_Ream(i) = reamostragem(banda_13, Lamb_Emi, ...
        temp_index_dados(i));
87     emiss_14_Ream(i) = reamostragem(banda_14, Lamb_Emi, ...
        temp_index_dados(i));
88 end
89
90 emiss_Ream = [emiss_10_Ream; emiss_11_Ream; emiss_12_Ream; ...
        emiss_13_Ream; emiss_14_Ream];
91
92 %% Corre ATM da Radiia
93 ground_truth_calibrado_Corr_ATM = zeros(num_bandas, num_pixeis);
94
95 for j = 1: num_pixeis
96     ground_truth_calibrado_Corr_ATM(1,j) = ...
        atm_img_corr(ground_truth_calibrado_crescente(1,j), ...
        min(emiss_Ream(1,:)), trans, up, down, banda_10);
97     ground_truth_calibrado_Corr_ATM(2,j) = ...
        atm_img_corr(ground_truth_calibrado_crescente(2,j), ...
        min(emiss_Ream(2,:)), trans, up, down, banda_11);
98     ground_truth_calibrado_Corr_ATM(3,j) = ...
        atm_img_corr(ground_truth_calibrado_crescente(3,j), ...
        min(emiss_Ream(3,:)), trans, up, down, banda_12);
99     ground_truth_calibrado_Corr_ATM(4,j) = ...
        atm_img_corr(ground_truth_calibrado_crescente(4,j), ...
        min(emiss_Ream(4,:)), trans, up, down, banda_13);
100    ground_truth_calibrado_Corr_ATM(5,j) = ...
        atm_img_corr(ground_truth_calibrado_crescente(5,j), ...
        min(emiss_Ream(5,:)), trans, up, down, banda_14);
101 end
102
103 figure
104 plot(lambda_central, ground_truth_calibrado_crescente', '*')
105 ylim([0 10])
106 title('\fontsize{14} Radiias das verdades de campo sem corre atmosfca')
107 xlabel('\fontsize{14} Comprimento de onda (\mum)')
108 ylabel('\fontsize{14} Radiia (W m ^{-2} sr ^{-1} \mum ^{-1})')
109 legend('21,05 C', '22,55 C', '23,05 C', '24,45 C', '24,55 C', '25,75 ...
        C', '25,85 C', '26,05 C', '26,45 C', '27,55 C', '27,95 C', '29,45 ...
        C', '29,75 C', 'Location', 'northeastoutside', 'Orientation', ...
        'vertical')
110
111 figure
112 plot(lambda_central, ground_truth_calibrado_Corr_ATM', '*')
113 ylim([0 10])
114 title('\fontsize{14} Radiias das verdades de campo com corre atmosfca')
115 xlabel('\fontsize{14} Comprimento de onda (\mum)')
116 ylabel('\fontsize{14} Radiia (W m ^{-2} sr ^{-1} \mum ^{-1})')

```

```
117 legend('21,05 C', '22,55 C', '23,05 C', '24,45 C', '24,55 C', '25,75 ...
        C', '25,85 C', '26,05 C', '26,45 C', '27,55 C', '27,95 C', '29,45 ...
        C', '29,75 C', 'Location', 'northeastoutside', 'Orientation', ...
        'vertical')
118
119 % Comp de onda de 7.48814 - 11.99
120 intervalo_lambda = [1:208];
121 lamb = Lamb(intervalo_lambda);
122 lamb_ASTER_index = [69, 79, 87, 93, 104, 108, 115, 123, 159, 170, ...
        180, 187, 199 ];
123 lamb_ASTER = lamb(lamb_ASTER_index);
124
125 lamb_ASTER_index_Medio = [79, 93, 115, 170, 187];
126 lamb_ASTER_Medio = lamb(lamb_ASTER_index_Medio);
127 temperatura = [1 2 3 4];
128 temp_BD = T(temperatura);
129
130 %% Radiaa
131 rad = Rad(intervalo_lambda, temperatura);
132 rad_Medio_BD = Rad(lamb_ASTER_index_Medio, temperatura);
133
134 %% Emissividade
135 emiss = Emi(intervalo_lambda, temperatura);
136 emiss_Medio_BD = Emi(lamb_ASTER_index_Medio, temperatura);
137 num_temps_BD = size(temp_BD, 2);
138
139 % RADICIA
140 rad_10_Ream_BD = zeros(1, num_temps_BD);
141 rad_11_Ream_BD = zeros(1, num_temps_BD);
142 rad_12_Ream_BD = zeros(1, num_temps_BD);
143 rad_13_Ream_BD = zeros(1, num_temps_BD);
144 rad_14_Ream_BD = zeros(1, num_temps_BD);
145
146 rad_lamb = [lamb rad];
147
148 for i = 1:num_temps_BD
149 rad_10_Ream_BD(i) = reamostragem(banda_10, rad_lamb, i);
150 rad_11_Ream_BD(i) = reamostragem(banda_11, rad_lamb, i);
151 rad_12_Ream_BD(i) = reamostragem(banda_12, rad_lamb, i);
152 rad_13_Ream_BD(i) = reamostragem(banda_13, rad_lamb, i);
153 rad_14_Ream_BD(i) = reamostragem(banda_14, rad_lamb, i);
154
155 end
156
157 rad_Ream_BD = [rad_10_Ream_BD; rad_11_Ream_BD; rad_12_Ream_BD; ...
        rad_13_Ream_BD; rad_14_Ream_BD];
158
```

```
159 % EMISSIVIDADE
160 emiss_10_Ream_BD = zeros(1, num_temps_BD);
161 emiss_11_Ream_BD = zeros(1, num_temps_BD);
162 emiss_12_Ream_BD = zeros(1, num_temps_BD);
163 emiss_13_Ream_BD = zeros(1, num_temps_BD);
164 emiss_14_Ream_BD = zeros(1, num_temps_BD);
165
166 emiss_lamb = [lamb emiss];
167
168 for i = 1:num_temps_BD
169 emiss_10_Ream_BD(i) = reamostragem(banda_10, emiss_lamb, i);
170 emiss_11_Ream_BD(i) = reamostragem(banda_11, emiss_lamb, i);
171 emiss_12_Ream_BD(i) = reamostragem(banda_12, emiss_lamb, i);
172 emiss_13_Ream_BD(i) = reamostragem(banda_13, emiss_lamb, i);
173 emiss_14_Ream_BD(i) = reamostragem(banda_14, emiss_lamb, i);
174
175 end
176
177 emiss_Ream_BD = [emiss_10_Ream_BD; emiss_11_Ream_BD; ...
    emiss_12_Ream_BD; emiss_13_Ream_BD; emiss_14_Ream_BD];
178
179 figure
180 plot(lamb_ASTER_Medio, rad_Medio_BD, '*')
181 legend('16.3 C', '29.3 C', '35 C', '35.5 C', 'Location', 'southoutside', ...
    'Orientation', 'horizontal')
182 xlabel('\fontsize{14} Comprimento de onda \mum')
183 ylabel('\fontsize{14} Radiia (W m ^{-2} sr ^{-1} \mum ^{-1})')
184 title('\fontsize{14} Assinatura espectral do quartzo centralizada ...
    para as bandas do TIR/ASTER')
185 xlim([8 11.5])
186 ylim([0 10])
187
188 figure
189 plot(lamb_ASTER_Medio, rad_Ream_BD, '*')
190 legend('16.3 C', '29.3 C', '35 C', '35.5 C', 'Location', 'southoutside', ...
    'Orientation', 'horizontal')
191 xlabel('\fontsize{14} Comprimento de onda \mum')
192 ylabel('\fontsize{14} Radiia (W m ^{-2} sr ^{-1} \mum ^{-1})')
193 title('\fontsize{14} Assinatura espectral do quartzo reamostrada ...
    para as bandas do TIR/ASTER')
194 xlim([8 11.5])
195 ylim([0 10])
196
197 figure
198 plot(lamb, rad)
199 legend('16.3 C', '29.3 C', '35 C', '35.5 C', 'Location', 'southoutside', ...
    'Orientation', 'horizontal')
```

```
200 xlim([8 11.5])
201 ylim([0 10])
202 xlabel('\fontsize{14} Comprimento de onda \mum')
203 ylabel('\fontsize{14} Radiia (W m ^{-2} sr ^{-1} \mum ^{-1})')
204 title('\fontsize{14} Assinatura espectral do quartzo')
205
206 figure
207 plot(lamb,rad, lamb_ASTER_Medio, rad_Medio_BD, '*')
208 legend('16.3 C', '29.3 C', '35 C', '35.5 C', 'Location', 'southoutside', ...
        'Orientation', 'horizontal')
209 xlim([8 11.5])
210 ylim([0 10])
211 xlabel('\fontsize{14} Comprimento de onda \mum')
212 ylabel('\fontsize{14} Radiia (W m ^{-2} sr ^{-1} \mum ^{-1})')
213 title('\fontsize{14} Assinatura espectral do quartzo')
214
215 figure
216 plot(lamb,rad(:,1), lamb_ASTER_Medio, rad_Medio_BD(:,1), '*')
217 xlim([8 11.5])
218 ylim([0 10])
219 xlabel('Comprimento de onda \mum', 'FontSize', 14)
220 ylabel('Radiia', 'FontSize', 14)
221 title('Assinatura espectral do quartzo', 'FontSize', 14)
222
223 num_temps_BD = size(temp_BD, 2);
224 num_temps_ASTER = 13;
225 num_bandas = size(rad_Medio_BD, 1);
226 lambda = [8.3 8.6 9.1 10.6 11.2];
227 banda = [1 2 3 4 5];
228
229 %% Normas das Assinaturas sinal
230 % dim 1 X nmero de de temperaturas
231 normas_BD = zeros(1, num_temps_BD);
232 normas_ATM_ASTER = zeros(1, num_temps_ASTER);
233
234 for i = 1:num_temps_BD
235     normas_BD(i) = norm(rad_Medio_BD(:,i));
236 end
237
238 for i = 1:num_temps_ASTER
239     normas_ATM_ASTER(i) = norm(ground_truth_calibrado_Corr_ATM(:,i));
240 end
241
242 %% Vetores unitos
243 % dim 1 X nmero de de temperaturas
244 rad_Medio_BD_unit = zeros(num_bandas, num_temps_BD);
```

```
245 ground_truth_calibrado_Corr_ATM_unit = zeros(num_bandas, ...
        num_temps_ASTER);
246
247 for i = 1: num_bandas
248     for j = 1: num_temps_BD
249         rad_Medio_BD_unit(i,j) = rad_Medio_BD(i,j) / normas_BD(j);
250     end
251 end
252
253 for i = 1: num_bandas
254     for j = 1: num_temps_ASTER
255         ground_truth_calibrado_Corr_ATM_unit(i,j) = ...
            ground_truth_calibrado_Corr_ATM(i,j) / normas_ATM_ASTER(j);
256     end
257 end
258
259 %% Verifica as normas unitas
260 rad_Medio_BD_unit_normas = zeros(1, num_temps_BD);
261 ground_truth_calibrado_Corr_ATM_unit_normas = zeros(1, num_temps_ASTER);
262
263 for j = 1: num_temps_BD
264     rad_Medio_BD_unit_normas(j) = norm(rad_Medio_BD_unit(:,j));
265 end
266
267 for j = 1: num_temps_ASTER
268     ground_truth_calibrado_Corr_ATM_unit_normas(j) = ...
        norm(ground_truth_calibrado_Corr_ATM_unit(:,j));
269 end
270
271 %% Esto 1: CS
272 prod_internos = zeros(num_temps_ASTER, num_temps_BD);
273 prod_internos_unit = zeros(num_temps_ASTER, num_temps_BD);
274
275 for i = 1: num_temps_ASTER
276     for j = 1: num_temps_BD
277         prod_internos(i,j) = abs(rad_Medio_BD(:,j))' * ...
            ground_truth_calibrado_Corr_ATM(:,i));
278         prod_internos_unit(i,j) = abs(rad_Medio_BD_unit(:,j))' * ...
            ground_truth_calibrado_Corr_ATM_unit(:,i));
279     end
280 end
281
282 %% Esto 2: Escolhe o sinal que obteve o maior produto interno para ...
        cada possl
283 % sinal do ASTER.
284 % prod_internos_unit_max: 1 col = maior prod interno e 2 col o ...
        indice da
```

```
285 % temperatura
286
287 prod_internos_unit_max = zeros(num_temps_ASTER, 2);
288
289 for i = 1: num_temps_ASTER
290     [prod_internos_unit_max(i,1),prod_internos_unit_max(i,2)] = ...
        max(prod_internos_unit(i,:));
291 end
292
293 %% Esto 3: Calcula a diferenentre a temp aproximada e a real
294 temp_estimada_CS = temp_BD(prod_internos_unit_max(:,2));
295 temp_estimada_CS_menos_real = ground_truth_temp - temp_estimada_CS;
296
297 figure
298 plot(ground_truth_temp, temp_estimada_CS, ground_truth_temp, ...
        ground_truth_temp)
299 %title('\fontsize{12} Rela entre Temperatura estima e temperatura real')
300 xlabel('\fontsize{14} Temperatura (C)')
301 ylabel('\fontsize{14} Temperatura (C)')
302 legend('Temperatura estimada', 'Temperatura real', ...
        'Location','southoutside', 'Orientation', 'horizontal')
303
304 figure
305 bar(ground_truth_temp, temp_estimada_CS_menos_real)
306 xlabel('\fontsize{14} Temperatura (C)')
307 ylabel('\fontsize{14} Erro na temperatura (C)')
308
309 %% Teste 3: Melhora os dados de CS por uma regresslinear
310
311 temp_estimada_CS_Reg = zeros(1, num_temps_ASTER);
312 indice_reg = 1;
313
314 for temp_index_ASTER = 1:num_temps_ASTER
315
316     aux = prod_internos_unit_max(temp_index_ASTER, 2);
317     if (aux == 1)
318         temp_index_BD = aux;
319         vet_temp = [temp_BD(temp_index_BD) temp_BD(temp_index_BD + 1) ...
            temp_BD(temp_index_BD + 2)];
320         vet_prod_interno = [prod_internos_unit(temp_index_ASTER, 1) ...
            prod_internos_unit(temp_index_ASTER, 1 + 1) ...
            prod_internos_unit(temp_index_ASTER, 1 + 2)];
321
322         coef = polyfit(vet_temp,vet_prod_interno,2);
323         vertice_x = (-coef(2)/(2*coef(1)));
324         % Verifica o limite inferior
325         if (vertice_x ≤ temp_BD(temp_index_BD))
```

```
326         temp_estimada_CS_Reg(indice_reg) = temp_BD(temp_index_BD);
327     end
328
329     if (vertice_x > temp_BD(temp_index_BD))
330         temp_estimada_CS_Reg(indice_reg) = vertice_x;
331     end
332 end
333
334 if ((aux > 1) & (aux < num_temps_BD))
335     temp_index_BD = aux;
336     vet_temp = [temp_BD(temp_index_BD - 1) temp_BD(temp_index_BD) ...
337               temp_BD(temp_index_BD + 1)];
338     vet_prod_interno = [prod_internos_unit(temp_index_ASTER, ...
339               temp_index_BD - 1) prod_internos_unit(temp_index_ASTER, ...
340               temp_index_BD) prod_internos_unit(temp_index_ASTER, ...
341               temp_index_BD + 1)];
342
343     coef = polyfit(vet_temp, vet_prod_interno, 2);
344     vertice_x = (-coef(2)/(2*coef(1)));
345     temp_estimada_CS_Reg(indice_reg) = vertice_x;
346 end
347
348 if (aux == num_temps_BD)
349     temp_index_BD = aux;
350     vet_temp = [temp_BD(temp_index_BD - 2) temp_BD(temp_index_BD - ...
351               1) temp_BD(temp_index_BD)];
352     vet_prod_interno = [prod_internos_unit(temp_index_ASTER, ...
353               temp_index_BD - 2) prod_internos_unit(temp_index_ASTER, ...
354               temp_index_BD - 1) prod_internos_unit(temp_index_ASTER, ...
355               temp_index_BD)];
356
357     coef = polyfit(vet_temp, vet_prod_interno, 2);
358     vertice_x = (-coef(2)/(2*coef(1)));
359     temp_estimada_CS_Reg(indice_reg) = vertice_x;
360
361     % Verifica o limite superior
362     if (vertice_x ≥ temp_BD(temp_index_BD))
363         temp_estimada_CS_Reg(indice_reg) = temp_BD(temp_index_BD);
364     end
365
366     if (vertice_x < temp_BD(temp_index_BD))
367         temp_estimada_CS_Reg(indice_reg) = vertice_x;
368     end
369 end
370
371 indice_reg = indice_reg + 1;
372
```

```
365 end
366
367 temp_estimada_CS_Reg_menos_real = ground_truth_temp - ...
    temp_estimada_CS_Reg;
368
369 figure
370 plot(ground_truth_temp, temp_estimada_CS, '*',ground_truth_temp, ...
    temp_estimada_CS_Reg, '*', ground_truth_temp, ground_truth_temp, '*')
371 ylim([16 36])
372 legend('Temperatura estimada', 'Temperatura estimada com Regress, ...
    'Temperatura real', 'Location','southoutside', 'Orientation', ...
    'horizontal')
373 title('\fontsize{12} Rela entre Temperatura estima e temperatura real')
374 xlabel('\fontsize{14} Temperatura (C)')
375 ylabel('\fontsize{14} Temperatura (C)')
376
377 figure
378 bar(temp_estimada_CS_Reg_menos_real)
379 title('\fontsize{12} Diferenentre Temperatura estima com Reg e ...
    temperatura real')
380 xlabel('\fontsize{14} Temperatura (C)')
381 ylabel('\fontsize{14} Erro na temperatura (C)')
382
383 figure
384 bar(ground_truth_temp,temp_estimada_CS_Reg_menos_real)
385 xlabel('\fontsize{14} Temperatura (C)')
386 ylabel('\fontsize{14} Erro na temperatura (C)')
387 text(ground_truth_temp,temp_estimada_CS_Reg_menos_real',...
388 num2str(temp_estimada_CS_Reg_menos_real', '%0.2f'),...
389 'HorizontalAlignment', 'center',...
390 'VerticalAlignment', 'top', 'Color', 'black', 'FontSize', 14)
391
392 ERRO_min_CS = min(temp_estimada_CS_menos_real)
393 ERRO_max_CS = max(temp_estimada_CS_menos_real)
394 ERRO_Amplitude_CS = ERRO_max_CS - ERRO_min_CS
395 ERRO_media_CS = mean(abs(temp_estimada_CS_menos_real))
396
397 ERRO_min_CS_Reg = min(temp_estimada_CS_Reg_menos_real)
398 ERRO_max_CS_Reg = max(temp_estimada_CS_Reg_menos_real)
399 ERRO_Amplitude_CS_Reg = ERRO_max_CS_Reg - ERRO_min_CS_Reg
400 ERRO_media_CS_Reg = mean(abs(temp_estimada_CS_Reg_menos_real))
```

**Função: Gera Sinal Reg**

```
1 % Adaptado de Grondona (2015)
2 function [S] = reamostragem (aster_func, lab_func, T)
3
4     pos = [];
5     T = T + 1; %pois a primeira coluna de lab_func omprimento de onda
6
7     for i = 1 : size(aster_func,1)
8         [m,mpos] = min(abs(aster_func(i,1) - lab_func(:,1)));
9         clear m
10        pos = [pos;mpos];
11    end;
12
13    lab_func = lab_func(pos,:);
14
15    w = sum(aster_func(:,2).*lab_func(:,T));
16
17    u = sum(aster_func(:,2));
18    S = w/u;
19 end
```

**Função: Reamostragem** - Adaptado de Grondona (2015)

```
1 % Adaptado de Grondona (2015)
2 function [S] = reamostragem (aster_func, lab_func, T)
3
4     pos = [];
5     T = T + 1; %pois a primeira coluna de lab_func omprimento de onda
6
7     for i = 1 : size(aster_func,1)
8         [m,mpos] = min(abs(aster_func(i,1) - lab_func(:,1)));
9         clear m
10        pos = [pos;mpos];
11    end;
12
13    lab_func = lab_func(pos,:);
14
15    w = sum(aster_func(:,2).*lab_func(:,T));
16
17    u = sum(aster_func(:,2));
18    S = w/u;
19 end
```

**Função: Reamostragem** - Adaptado de Grondona (2015)

```
1 % Adaptado de Grondona (2015)
2 function [S] = reamostragem (aster_func, lab_func, T)
3
4     pos = [];
5     T = T + 1; %pois a primeira coluna de lab_func omprimento de onda
6
7     for i = 1 : size(aster_func,1)
8         [m,mpos] = min(abs(aster_func(i,1) - lab_func(:,1)));
9         clear m
10        pos = [pos;mpos];
11    end;
12
13    lab_func = lab_func(pos,:);
14
15    w = sum(aster_func(:,2).*lab_func(:,T));
16
17    u = sum(aster_func(:,2));
18    S = w/u;
19 end
```

**Função: atm img corr** - Adaptado de Grondona (2015)

```
1 %% Adaptado de Grondona (2015)
2 function [rad_corr] = atm_img_corr(rad_atm, emi, trans, upw, dww, RF)
3     rad_atm = double(rad_atm);
4     emi = double(emi);
5     trans = double(trans);
6     upw = double(upw);
7     dww = double(dww);
8
9     pos_T = [];
10    pos_U = [];
11    pos_D = [];
12
13    pos_FWHM = find(RF(:,2) ≥ 0.5);
14    RF = RF(pos_FWHM,:);
15
16    for i = 1 : size(RF,1)
17        [m,mpost] = min(abs(RF(i,1) - trans(:,1)));
18        [m,mposu] = min(abs(RF(i,1) - upw(:,1)));
19        [m,mposd] = min(abs(RF(i,1) - dww(:,1)));
20        clear m;
21        pos_T = [pos_T; mpost];
22        pos_U = [pos_U; mposu];
23        pos_D = [pos_D; mposd];
24    end;
25
26    trans = trans(pos_T,:);
27    upw = upw(pos_U,:);
28    dww = dww(pos_D,:);
29
30    Tr = mean(trans(:,2));
31    Up = mean(upw(:,2));
32    Dw = mean(dww(:,2));
33    Em = mean(emi,2);
34
35    rad_corr = ((rad_atm - Up)/Tr) + (Em - 1)*Dw;
36 end
```