

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

JESSICA SALDANHA SOUZA

Correção atmosférica em imagens hiperespectrais: avaliação de diferentes
metodologias em condições tropicais

Maringá
2017

JESSICA SALDANHA SOUZA

Correção atmosférica em imagens hiperespectrais: avaliação de diferentes metodologias em condições tropicais

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia do Departamento de Agronomia, Centro de Ciências Agrárias da Universidade Estadual de Maringá, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Agronomia.

Área de contratação: Solos e Nutrição de Plantas

Orientador: Marcos Rafael Nanni

Maringá
2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Biblioteca Central - UEM, Maringá, PR, Brasil)

S729c Souza, Jessica Saldanha
Correção atmosférica em imagens hiperespectrais:
avaliação de diferentes metodologias em condições
tropicais / Jessica Saldanha Souza. -- Maringá,
2017.
107 f. : il., color., figs., tabs., mapas.
Orientador: Prof. Dr. Marcos Rafael Nanni.
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Maringá, Centro de Ciências Agrárias, Departamento
de Agronomia, Programa de Pós-Graduação em Agronomia
- Área de Concentração: Solos e Nutrição de Plantas,
2017.
1. Sensor AisaFENIX. 2. Imagem hiperespectral. 3.
Atenuação atmosférica. 4. Linho empírica. 5. Lomas
coloridas. I. Nanni, Marcos Rafael, orient. II.
Universidade Estadual de Maringá. Centro de Ciências
Agrárias. Departamento de Agronomia. Programa de
Pós-Graduação em Agronomia - Área de Concentração:
Solos e Nutrição de Plantas. III. Título.

CDD 21.ed. 631.47

AHS

FOLHA DE APROVAÇÃO

JESSICA SALDANHA SOUZA

Correção atmosférica em imagens hiperespectrais: avaliação de diferentes metodologias em condições tropicais

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia do Departamento de Agronomia, Centro de Ciências Agrárias da Universidade Estadual de Maringá, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Agronomia pela Comissão Julgadora composta pelos membros:

COMISSÃO JULGADORA

Prof. Dr. Marcos Rafael Nanni

(Presidente – Orientador)

Universidade Estadual de Maringá (UEM)

Departamento de Agronomia

Prof^ª. Dr^ª. Cláudia Regina Grégio d’Arce Filetti

Universidade Estadual de Maringá (UEM)

Departamento de Engenharia Civil

Dr. Luiz Henrique da Silva Rotta

Universidade Estadual Paulista (UNESP)

Departamento de Cartografia

Aprovada em: 31 de março de 2017.

Local de defesa: Bloco J-57, sala 4, *campus* da Universidade Estadual de Maringá.

DEDICATÓRIA

Com amor aos meus pais Angelita e Arnaldo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela luz nos momentos difíceis e segurança de que nunca estou sozinha.

Aos meus pais Angelita e Arnaldo pelo amor, carinho, respeito e compreensão em todas as decisões que tomo, pelo apoio em qualquer circunstância. Amo vocês!

A minha irmã Camilla pela amizade e carinho, o elo mais bonito que Deus poderia me proporcionar.

Ao Pablo, meu companheiro e amigo, obrigado por tudo, por fazer mais do que precisava e por ter me ajudado tanto, direta e indiretamente neste ciclo da minha vida e em muitos outros.

A minha família, de modo geral, que sempre torcerem por mim, todos estão no meu coração.

Aos amigos: Tai, Arthur, Aline e Leite. Em especial a Tai e Aline, pessoas maravilhosas que tive o prazer de conhecer em Maringá e com certeza tornaram tudo mais fácil.

Ao Gabriel pela amizade tão linda e ser meu exemplo de comprometimento no trabalho e na vida. A Carioca pelo companheirismo que não falha, com certeza sem a ajuda dos dois, o mestrado seria muito mais difícil.

Aos amigos que guardo boas lembranças, desde a infância até a faculdade, que contribuíram com um pouco da minha essência e em tudo que faço.

A professora Daniele Barrocá pela minha inserção a pesquisa, força e dedicação ao seu trabalho.

Ao Professor Nanni pela confiança, orientação e por ter me aceitado na sua família GALES.

Ao Luis, Monica, Guilherme, Renato, Moreno, Aline, Tai e todos que passaram pelo GALES e que me auxiliaram de alguma forma neste trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (PGA) pela oportunidade em desenvolver este trabalho e pelo aprendizado.

A CAPES pela concessão da bolsa de estudos.

Por fim, a todos que contribuíram para a realização deste trabalho.

EPÍGRAFE

*“O que vai ficar na fotografia
São os laços invisíveis que havia
As cores, figuras, motivos
O sol passando sobre os amigos
Histórias, bebidas, sorrisos
E afeto em frente ao mar”*

Leoni

Correção atmosférica em imagens hiperespectrais: avaliação de diferentes metodologias em condições tropicais

RESUMO

Existem muitos sensores hiperespectrais disponíveis no mercado em nível de campo, aéreo e orbital. Entre os sensores aerotransportados, destaca-se o sensor hiperespectral AisaFENIX, utilizado neste trabalho. Este sensor permite a aquisição de dados de alvos terrestres com alto detalhamento espectral, porém não se têm trabalhos no Brasil avaliando a qualidade dos dados adquiridos através deste sensor, tornando-o essencial, devido às condições climáticas brasileiras, que podem afetar a qualidade das imagens. Para tanto, o objetivo deste trabalho consiste em realizar a correção atmosférica de imagens hiperespectrais adquiridas a partir do sensor AisaFENIX, utilizando algoritmos e métodos empíricos conhecidos, além de lonas coloridas dispostas no campo no momento da tomada das imagens. Desse modo, foram utilizadas neste trabalho lonas nas cores: azul, amarela, vermelha, verde, cinza clara e cinza escura, e uma placa de BaSO_4 . As lonas coloridas apresentam uniformidade e não sofrem alterações em relação ao tempo, servindo como alvos de controle no processo de correção das imagens. Os algoritmos utilizados neste trabalho foram FLAASH, ATCOR-4, QUAC e o método Linha Empírica (utilizando as lonas no processo de calibração e sem utilizar as lonas). Foram selecionadas três imagens localizadas na UEM e coletadas nos dias 30 de abril, 01 e 02 de maio de 2016, para serem corrigidas utilizando os cinco métodos citados anteriormente. Os métodos ATCOR-4 e Linha Empírica geram, a partir da utilização das lonas e da placa de BaSO_4 , arquivos de calibração que foram utilizados no processo de correção de outras imagens. Dessa forma, uma quarta imagem, adquirida no dia 01 de maio de 2016, foi utilizada para avaliar se os arquivos de calibração gerados a partir do ATCOR-4 e Linha Empírica melhorariam a qualidade das correções atmosféricas em imagens que não continham alvos para calibração. As assinaturas espectrais dos alvos extraídas das imagens foram comparadas com as assinaturas espectrais coletadas no campo com o sensor ASD. Na análise das assinaturas espectrais foi utilizado o coeficiente de correlação de Pearson, coeficiente de determinação, teste de correlação, teste de comparação de médias, e índices SAM e ASDs. Os métodos de correção que apresentaram os melhores desempenhos segundo os índices SAM e ASDs foram o ATCOR-4, QUAC e LE com lonas. O FLAASH não gerou correções satisfatórias em nenhuma das imagens. LE sem lonas apresentou superestimação dos valores espectrais em relação aos dados de campo. As lonas amarela, vermelha e verde demonstraram serem alvos adequados para a calibração, já que em todas as imagens suas correlações foram superiores a 0,8 nas regiões do visível e infravermelho. A lona azul não apresentou resultados satisfatórios, principalmente, na região do infravermelho, com correlações inferiores a 0,6. O arquivo de calibração do ATCOR-4, utilizado no processamento da imagem 4 melhorou a qualidade da correção segundo os índices SAM e ASDs. Já o arquivo de calibração do método Linha Empírica, não contribuiu para a correção adequada da imagem, demonstrando não ser a metodologia apropriada para a correção de imagens em diferentes condições atmosféricas.

Palavras-chave: Sensor AisaFENIX, imagem hiperespectral, atenuação atmosférica, Linha Empírica, lonas coloridas.

Atmospheric correction in hyperspectral images: evaluation of different methodologies in tropical conditions

ABSTRACT

There are many hyperspectral sensors available in the field, aerial, and orbital levels. Among the airborne sensors, the AisaFENIX hyperspectral sensor, used in this work, stands out. This sensor allows a data acquisition of terrestrial aircraft with high spectral detail, but it has no works in Brazil evaluating a quality of data acquired through this sensor, making it essential, due to the Brazilian climatic conditions, that can affect the quality of the images. The objective of this work it is consist to perform the atmospheric correction of hyperspectral images acquired from the AisaFENIX sensor, using algorithms and known empirical methods, besides colored tarps arranged in the field at the time of image acquisition. In this work, were used tarps in the colors: blue, yellow, red, green, light gray and dark gray, and a BaSO₄ plaque. The colored tarps demonstrate uniformity and do not suffer changes in relation to time, serving as control targets in the process of image correction. The algorithms used in this work were FLAASH, ATCOR-4, QUAC and the Empirical Line method (using the tarps in the calibration process and without using the tarps). Three images located in the UEM were selected and collected on April 30th, May 1st and 2nd, 2016, for to be corrected using the five methods previously mentioned. The ATCOR-4 and Empirical Line methods generate, from the use of the tarps and the BaSO₄ plaque, calibration files that were used in the process of correcting other images. In this way, a fourth image, acquired on May 1, 2016, was used to evaluate if the calibration files generated from the ATCOR-4 and Empirical Line, improved the quality of the atmospheric corrections in images that did not contain targets for calibration. The spectral curves of the targets extracted from the images were compared with the spectral curves collected in the field with the ASD sensor. The Pearson correlation coefficient, determination coefficient, correlation test, mean comparison test, and SAM and ASDS index were used in the analysis of spectral curves. The correction methods that presented the best performances according to the SAM and ASDS indexes were ATCOR-4, QUAC and LE with tarps. The FLAASH did not generate satisfactory corrections in any of the images. The LE without tarps presented overestimation of the spectral values in relation to the field data. The yellow, red and green tarps proved to be suitable targets for calibration, in all images their correlations were higher than 0,8 in the visible and infrared regions. The blue tarp did not present satisfactory results, mainly in the infrared region, with correlations lower than 0,6. The ATCOR-4 calibration file used in image 4 processing improved the quality of the correction according to the SAM and ASDS indexes. The calibration file of the Empirical Line method did not contribute to the correction of the image, demonstrating not to be a proper methodology in the correction of images in different atmospheric conditions.

Keywords: AisaFENIX sensor, hyperspectral image, atmospheric attenuation, Empirical Line, colored tarps.

LISTA DE SIGLAS

EL	-	<i>Empirical Line Calibration</i>
FFC	-	<i>Flat Field Correction</i>
IARR	-	<i>Internal Average Relative Reflectance</i>
ATREM	-	<i>Atmosphere Removal</i>
ATCOR	-	<i>Atmospheric and Topographic CORrection model</i>
ACORN	-	<i>Atmosphere CORrection Now</i>
FLAASH	-	<i>Line-of-Sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes</i>
MODTRAN	-	<i>Moderate Resolution Atmospheric Radiance and Transmittance Model</i>
HATCH	-	<i>High Accuracy ATmospheric Correction for Hyperspectral data</i>
5S	-	<i>Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum</i>
6S	-	<i>Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum</i>
AVIRIS	-	<i>Airborne Visible / Infrared Imaging Spectrometer</i>
ASTER	-	<i>Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer</i>
IRS	-	<i>Indian Remote Sensing</i>
FOV	-	<i>Field of View / campo de visada</i>
QUAC	-	<i>QUick Atmospheric Correction</i>
MODIS	-	<i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
UEM	-	<i>Universidade Estadual de Maringá</i>
CMOS	-	<i>Complementary Metal-Oxide Semiconductor</i>
SAM	-	<i>Spectral Angle Mapper</i>
ASDS	-	<i>Average Sum of Deviations Squared</i>
JLP	-	<i>Jet Propulsion Laboratory</i>

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Principais regiões de absorção molecular na atmosfera terrestre	8
Tabela 2	Valores recomendados para Vapor D'água.....	14
Tabela 3	Recomendação de perfil do MODTRAN em relação a faixa de latitude e época do ano.....	14
Tabela 4	Estimativa do vapor de água em diferentes condições	16
Tabela 5	Configurações para a correção atmosférica utilizando o ATCOR4	36
Tabela 6	Configurações para a correção atmosférica utilizando o FLAASH	40
Tabela 7	Configurações para a correção atmosférica utilizando o ATCOR4 na imagem 4	43
Tabela 8	Resultados do coeficiente de correlação de Pearson, coeficiente de determinação e teste de hipótese das imagens 1, 2 e 3.	53
Tabela 9	Resultados do coeficiente de correlação de Pearson, coeficiente de determinação e teste de hipótese das imagens 1, 2 e 3.	59
Tabela 10	Resultados do coeficiente de correlação de Pearson, coeficiente de determinação e teste de hipótese das imagens 1, 2 e 3.	65
Tabela 11	Resultados do coeficiente de correlação de Pearson, coeficiente de determinação e teste de hipótese das imagens 1, 2 e 3, corrigidas pelo método LE com lonas.	72
Tabela 12	Resultados do coeficiente de correlação de Pearson, coeficiente de determinação e teste de hipótese das imagens 1, 2 e 3, corrigidas pelo método LE sem lonas.	74
Tabela 13	Teste de comparação de médias Scott-Knott, para as imagens 1, 2 e 3, e métodos ATCOR-4, QUAC, LE com lonas e LE sem lonas.	85
Tabela 14	Resultados do coeficiente de correlação de Pearson, coeficiente de determinação e teste de hipótese para o Ipê Roxo.	94
Tabela 15	Resultados do coeficiente de correlação de Pearson, coeficiente de determinação e teste de hipótese para a Mangueira.	94

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Distribuição dos constituintes atmosféricos.	6
Figura 2	Principais moléculas que influenciam cada tipo de espalhamento.	7
Figura 3	Simulação dos espectros de transmitância do vapor de água atmosférico, dióxido de carbono, ozônio, óxido nitroso, monóxido de carbono, metano, oxigênio e dióxido de nitrogênio.	9
Figura 4	Janelas de transmissão e bandas de absorção.	10
Figura 5	Espectro Solar.....	10
Figura 6	Esquema de processamentos realizado pelo QUAC.	18
Figura 7	Desenvolvimento da equação LE utilizando dois alvos.	19
Figura 8	Localização da área de estudo.....	21
Figura 9	Sensor aerotransportado AisaFENIX.....	23
Figura 10	Região onde está situada a pista de Atletismo da UEM.	24
Figura 11	Imagem 1 coletada no dia 30/04/2016.	25
Figura 12	Imagem 2 coletada no dia 01/05/2016.	26
Figura 13	Imagem 3 coletada no dia 02/05/2016.	26
Figura 14	Imagem 4 de Diamante do Norte-PR.....	27
Figura 15	Lonas estendidas no campo de futebol da UEM no momento do voo.....	28
Figura 16	Assinaturas espectrais das lonas e da placa de BaSO ₄ adquiridas no campo, utilizando o espectrorradiômetro FieldSpec-3.	29
Figura 17	Localização das espécies arbóreas Ipê Roxo (<i>Handroanthus impetiginosus</i>) e a Mangueira (<i>Mangifera indica</i>).	30
Figura 18	Esquema metodológico para correção das imagens 1, 2 e 3.....	31
Figura 19	Esquema metodológico para a correção da imagem 4.	32
Figura 20	Imagem antes e após a correção geométrica e radiométrica.	33

Figura 21	Transformação de unidades após a correção no CaliGeoPRO (ND para radiância).	34
Figura 22	Fator de Reflectância Bidirecional da grama utilizando a placa de BaSO ₄	35
Figura 23	Distribuição Gaussiana para a correção de ruídos e distorção das imagens.	36
Figura 24	Calibração Radiométrica do voo no ATCOR-4.....	37
Figura 25	Regiões espectrais de estimativa de vapor de água.	38
Figura 26	Definição do modelo atmosférico através da estimativa de vapor de água.	39
Figura 27	Esquema das etapas de correção da imagem 4.	42
Figura 28	Seleção de pixels para geração da média espectral de cada alvo.	44
Figura 29	Espectro de referência e Espectro teste para uma imagem de duas bandas. Os vetores conectam a origem (sem iluminação) aos pontos que representam os espectros reais.	46
Figura 30	Comparação entre as assinaturas espectrais geradas a partir da imagem 1 corrigida pelo ATCOR-4 e as geradas pelo espectrorradiômetro FieldSpec-3.	48
Figura 31	Comparação entre as assinaturas espectrais geradas a partir da imagem 2 corrigida pelo ATCOR-4 e as geradas pelo espectrorradiômetro FieldSpec-3.	50
Figura 32	Comparação entre as assinaturas espectrais geradas a partir da imagem 3 corrigida pelo ATCOR-4 e as geradas pelo espectrorradiômetro FieldSpec-3.	51
Figura 33	Comparação entre as assinaturas espectrais geradas a partir da imagem 1 corrigida pelo FLAASH e as geradas pelo espectrorradiômetro FieldSpec-3.	56
Figura 34	Comparação entre as assinaturas espectrais geradas a partir da imagem 2 corrigida pelo FLAASH e as geradas pelo espectrorradiômetro FieldSpec-3.	57
Figura 35	Comparação entre as assinaturas espectrais geradas a partir da imagem 3 corrigida pelo FLAASH e as geradas pelo espectrorradiômetro FieldSpec-3.	58
Figura 36	Comparação entre as assinaturas espectrais geradas a partir da imagem 1 corrigida pelo QUAC e as geradas pelo espectrorradiômetro FieldSpec-3.	61
Figura 37	Comparação entre as assinaturas espectrais geradas a partir da imagem 2 corrigida pelo QUAC e as geradas pelo espectrorradiômetro FieldSpec-3.	62

Figura 38	Comparação entre as assinaturas espectrais geradas a partir da imagem 3 corrigida pelo QUAC e as geradas pelo espectrorradiômetro FieldSpec-3.....	64
Figura 39	Comparação entre as assinaturas espectrais geradas a partir da imagem 1 corrigida pelo método Linha Empírica (com lonas e sem lonas no processamento) e as geradas pelo espectrorradiômetro FieldSpec-3.....	68
Figura 40	Comparação entre as assinaturas espectrais geradas a partir da imagem 2 corrigida pelo método Linha Empírica (com lonas e sem lonas no processamento) e as geradas pelo espectrorradiômetro FieldSpec-3.....	69
Figura 41	Comparação entre as assinaturas espectrais geradas a partir da imagem 2 corrigida pelo método Linha Empírica (com lonas e sem lonas no processamento) e as geradas pelo espectrorradiômetro FieldSpec-3.....	71
Figura 42	Gráficos da correlação do coeficiente de Pearson entre as imagens 1, 2 e 3 corrigidas pelo método LE com lonas, e os dados de campo, coletados com o sensor ASD.....	73
Figura 43	Gráficos da correlação do coeficiente de Pearson entre as imagens 1, 2 e 3 corrigidas pelo método LE sem lonas, e os dados de campo, coletados com o sensor ASD.....	76
Figura 44	Assinaturas espectrais da lona azul, das imagens 1, 2 e 3 corrigidas pelo ATCOR-4, QUAC, LE com lonas e LE sem lonas, e a assinatura espectral coletada no campo com o sensor ASD.....	78
Figura 45	Assinaturas espectrais da lona verde, das imagens 1, 2 e 3 corrigidas pelo ATCOR-4, QUAC, LE com lonas e LE sem lonas, e a assinatura espectral coletada no campo com o sensor ASD.....	79
Figura 46	Assinaturas espectrais da lona vermelha, das imagens 1, 2 e 3 corrigidas pelo ATCOR-4, QUAC, LE com lonas e LE sem lonas, e a assinatura espectral coletada no campo com o sensor ASD.....	80
Figura 47	Assinaturas espectrais da lona cinza claro, das imagens 1, 2 e 3 corrigidas pelo ATCOR-4, QUAC, LE com lonas e LE sem lonas, e a assinatura espectral coletada no campo com o sensor ASD.....	81

Figura 48	Assinaturas espectrais da lona amarela, das imagens 1, 2 e 3 corrigidas pelo ATCOR-4, QUAC, LE com lonas e LE sem lonas, e a assinatura espectral coletada no campo com o sensor ASD.....	82
Figura 49	Assinaturas espectrais da lona cinza escuro, das imagens 1, 2 e 3 corrigidas pelo ATCOR-4, QUAC, LE com lonas e LE sem lonas, e a assinatura espectral coletada no campo com o sensor ASD.....	83
Figura 50	Assinaturas espectrais da placa de BaSO ₄ , das imagens 1, 2 e 3 corrigidas pelo ATCOR-4, QUAC, LE com lonas e LE sem lonas, e a assinatura espectral coletada no campo com o sensor ASD.....	84
Figura 51	Índice SAM para a Imagem 1.	87
Figura 52	Índice SAM para análise da imagem 2.	88
Figura 53	Índice SAM para análise da imagem 3.	89
Figura 54	Índice ASDS para a Imagem 1.	89
Figura 55	Índice ASDS para análise da correção atmosférica da imagem 2.	90
Figura 56	Índice ASDS para análise da correção atmosférica da imagem 3.	91
Figura 57	Comparação entre as assinaturas espectrais do Ipê Roxo geradas a partir da imagem 4 corrigida pelos métodos ATCOR-4, Linha Empírica e QUAC e as geradas pelo espectrorradiômetro FieldSpec-3.	93
Figura 58	Comparação entre as assinaturas espectrais da Mangueira geradas a partir da imagem 4 corrigida pelos métodos ATCOR-4, Linha Empírica e QUAC e as geradas pelo espectrorradiômetro FieldSpec-3.	93
Figura 59	Índice SAM para análise da correção atmosférica da imagem 4.	95
Figura 60	Índice ASDS para análise da correção atmosférica da imagem 4.	96
Figura 61	Correlação de Pearson entre as assinaturas espectrais do Ipê Roxo e da Mangueira coletadas na imagem corrigida pelo ATCOR-4 calibrado e as assinaturas espectrais coletadas no campo com o sensor ASD, nas regiões do VIS, NIR e SWIR.....	105
Figura 62	Correlação de Pearson entre as assinaturas espectrais do Ipê Roxo e da Mangueira coletadas na imagem corrigida pelo ATCOR-4 não calibrado e as	

	assinaturas espectrais coletadas no campo com o sensor ASD, nas regiões do VIS, NIR e SWIR.....	106
Figura 63	Correlação de Pearson entre as assinaturas espectrais do Ipê Roxo e da Mangueira coletadas na imagem corrigida pelo LE calibrado e as assinaturas espectrais coletadas no campo com o sensor ASD, nas regiões do VIS, NIR e SWIR.	106
Figura 64	Correlação de Pearson entre as assinaturas espectrais do Ipê Roxo e da Mangueira coletadas na imagem corrigida pelo QUAC e as assinaturas espectrais coletadas no campo com o sensor ASD, nas regiões do VIS, NIR e SWIR.	107

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1	DADOS HIPERESPECTRAIS	4
2.2	ATENUAÇÃO ATMOSFÉRICA	5
2.3	CORREÇÃO ATMOSFÉRICA	11
2.3.1	Algoritmo FLAASH.....	12
2.3.2	Algoritmo ATCOR	15
2.3.3	Algoritmo QUAC	16
2.2.4	Correção Linear Empírica	18
3	MATERIAL E MÉTODOS	21
3.1	ÁREA DE ESTUDO	21
3.2	MATERIAL	22
3.2.1	Sensor Hiperespectral AisaFENIX	22
3.2.2	Aquisição de imagens hiperespectrais	24
3.2.3	Coleta de dados no campo	27
3.3	MÉTODOS	30
3.3.1	Correção radiométrica e geométrica	33
3.3.2	Reflectância Bidirecional	34
3.3.3	Correção atmosférica utilizando o método ATCOR	35
3.3.3	Correção atmosférica utilizando o método FLAASH.....	39
3.3.5	Correção atmosférica utilizando o método de Linha Empírica	40
3.3.6	Correção atmosférica utilizando o método QUAC	41
3.3.7	Área teste	41

3.3.8	Avaliação dos resultados.....	43
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
4.1	CORREÇÃO ATMOSFÉRICA UTILIZANDO O ATCOR-4.....	48
4.2	CORREÇÃO ATMOSFÉRICA UTILIZANDO O FLAASH	55
4.3	CORREÇÃO ATMOSFÉRICA UTILIZANDO O QUAC	61
4.4	CORREÇÃO ATMOSFÉRICA UTILIZANDO O MÉTODO LINHA EMPÍRICA	67
4.5	TESTE DE COMPARAÇÃO DE MÉDIAS DAS IMAGENS HIPERESPECTRAIS	77
4.6	ANÁLISES DOS MÉTODOS DE CORREÇÃO ATRAVÉS DOS ÍNDICES SAM E ASDS	86
4.7	TESTE DA CORREÇÃO ATMOSFÉRICA NA IMAGEM 4.....	92
5	CONCLUSÃO	97
	REFERÊNCIAS	99
	APÊNDICES	105
	APÊNDICE A	105

1. INTRODUÇÃO

O uso de imagens hiperespectrais para aquisição de dados de vários alvos terrestres tem aumentado nos últimos anos. Ao contrário do fim do século passado, onde sensores multiespectrais acoplados em plataformas orbitais eram as principais fontes de imageamento terrestre, atualmente, sensores hiperespectrais têm sido utilizados em diversas aplicações como mapeamento da vegetação, caracterização de poluição urbana, avaliação de áreas degradadas, agricultura de precisão, mapeamento geológico e pedológico e exploração mineral (NOVO, 2010; SOUZA FILHO, 2004).

Imagens hiperespectrais tem alto potencial de detalhamento e de discriminação das propriedades físico-químicas de alvos terrestres, devido à maior quantidade de bandas contínuas e estreitas, ao contrário, dos sensores multiespectrais, onde o numero reduzido de bandas, existentes apenas nas chamadas janelas atmosféricas, proporcionam a diminuição na capacidade espectral das imagens (SOUZA FILHO, 2004).

O primeiro sensor hiperespectral aerotransportado existente foi o *Airborne Imaging Spectrometer* (AIS), projetado pela *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) em 1982, apresentando 128 bandas, compreendidas entre 900nm e 2400nm. Em seguida, veio o surgimento do sensor AVIRIS, ainda em operação, projetado pela NASA/JPL, com 224 bandas, compreendidas entre 400nm e 2500nm. O sensor AVIRIS foi utilizado no Brasil, durante a missão SCAR-B, entre o período de agosto a setembro de 1995. Os objetivos da missão SCAR-B visavam o estudo das partículas suspensas no ar, os chamados aerossóis (CRÓSTA e SOUZA FILHO et. al., 1997; 2000; GREEN, 1998).

Recentemente, foi adquirido pela Universidade Estadual de Maringá, o sensor hiperespectral aerotransportado AisaFENIX. Em 2015 foi realizado voos com o sensor AisaFENIX para imageamento da região de Maringá-PR.

Este sensor abre novas oportunidades para a coleta de dados de alvos terrestres, não disponíveis a partir de plataformas orbitais. Não há trabalhos no Brasil avaliando os dados adquiridos através desde sensor, o que torna-se essencial, devido às condições climáticas brasileiras, quente e úmida, em relação aos estudos realizados em regiões de clima mais ameno.

A influência atmosférica nos dados hiperespectrais, denominada de atenuação atmosférica pode provocar alterações nos valores de radiância registradas pelo sensor, acarretando em erros significativos na assinatura espectral de alvos presentes na imagem, e inviabilizando possíveis estudos com os dados coletados (KAUFMAN, 1989; SOARES, 2014).

Os principais constituintes da atmosfera responsáveis pela atenuação são os aerossóis e o vapor d'água (NOVO, 2010; LILLESAND et. al., 2007; SOARES, 2014). A quantidade de vapor de água e de aerossóis presentes na atmosfera podem sofrer variações significativas devido às condições climáticas de cada região, e consequentemente, afetar a qualidade espectral das imagens de maneira diferentes.

Muitos algoritmos foram desenvolvidos com o intuito de eliminar ou diminuir os efeitos dos aerossóis e vapor de água presentes na imagem, sendo, os mais comuns o *Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes* (FLAASH), *QUick Atmospheric Correction* (QUAC), *Atmospheric and Topographic CORrection model* (ATCOR) e o métodos empíricos, como o Método de linha Empírica.

Técnicas para a calibração de algoritmos já implementados também são metodologias adotadas atualmente para a melhoria das correções atmosféricas, como foi apresentado por Brook e Ben Dor et. al. (2011), que utilizaram alvos dispostos no campo no momento da tomada das imagens, para melhorar a qualidade dos dados a partir de uma nova calibração do sensor Aisa-DUAL.

A partir da necessidade de estudos sobre a correção atmosférica de imagens hiperespectrais em condições climáticas tropicais definiu-se o objetivo geral deste trabalho, que consiste em analisar metodologias para a correção atmosférica em imagens adquiridas por meio do sensor hiperespectral AisaFENIX, visando avaliar por meio de análises estatísticas quais metodologias melhor se adequaram na correção de imagens com e sem a presença de alvos de controle. Os objetivos específicos consistiam em: a) realizar a correção atmosférica das imagens utilizando o FLAASH, QUAC, ATCOR-4 e o método de Linha Empírica, comparando as assinaturas espectrais dos alvos coletadas a partir das imagens com as coletadas no campo com o sensor ASD utilizando os índices SAM e ASDS;

b) Análises estatísticas, utilizando o coeficiente de correlação de Pearson e o coeficiente de determinação; testes para avaliar se houve significância nas correlações obtidas e o teste de comparação de médias. As análises estatísticas têm como finalidade avaliar se houve diferenças entre as imagens corrigidas pelo mesmo método e se houve mudanças na correção em relação às regiões do espectro eletromagnético; c) Analisar quais métodos melhor se adequaram a correção atmosférica de imagens sem a presença de alvos de controle; d) Análises estatísticas (descritas nos tópicos **a** e **b**) para avaliar a qualidade das correções realizadas na imagem sem alvos de controle utilizando alvos presente na imagem.

Entre as metodologias empíricas empregadas na correção atmosférica de imagens, destaca-se o método Linha Empírica, uma alternativa viável na correção atmosférica de imagens, principalmente, quando não há outras metodologias disponíveis. Portanto, a hipótese apresentada neste trabalho consiste no uso do método da Linha Empírica utilizando alvos dispostos no campo para calibração, resultando em melhores correções dos efeitos da atenuação atmosférica em imagens hiperespectrais obtidas através de sensor aerotransportado. As lonas de vinil coloridas servem como alvos de controle no campo, apresentando uniformidade e não sofrendo alterações em relação ao tempo. Torna-se uma alternativa de custo mais acessível em relação a lonas de calibração de tipo *Spectralon*[®].

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 DADOS HIPERESPECTRAIS

O termo “Imagem Hiperespectral” surgiu pela primeira vez no trabalho de Goetz (et. al., 1985) que discutia os primeiros resultados utilizando este tipo de dados. Atualmente, o sensoriamento remoto hiperespectral é uma tecnologia em rápida evolução, tornando-se uma grande promessa na análise científica e aprimoramento da compreensão humana em diversos campos de estudo (JABLONSKI et. al., 2016).

Imagens hiperespectrais normalmente compreendem centenas de bandas com larguras espectrais muito estreitas, na ordem de 10 nm. A combinação entre a quantidade de bandas e a espessura entre elas, implica numa completa mudança na forma de processamento de dados se comparada às imagens multiespectrais (MENESES e ALMEIDA, 2012).

Atualmente, existem sensores hiperespectrais em nível de campo, aéreo e orbital. No campo, destaca-se os espectrorradiômetros de laboratório e de campo, como o FieldSpec-3, desenvolvido pela Analytical Spectral Devices (ASD), com bandas espectrais compreendendo as regiões entre 350 nm e 2500nm. Em nível orbital, temos o sensor hiperespectral Hyperion, desenvolvido pela NASA (<http://earthobservatory.nasa.gov/Features/EO1Tenth/page3.php>), contendo 220 bandas, compreendidas entre 400nm e 2500nm, e o sensor europeu CHRIS (<https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eomissions/proba/instruments/chris>), contendo 63 bandas, compreendidas entre 400 nm e 1050nm. Já os sensores aerotransportados mais conhecidos, destacam-se o AVIRIS (Airborne Visual and Infra-Red Imaging Spectrometer), HYDICE, Casi, HyMap, DAIS e AISA (GOETZ et. al., 2009; BORENGASSER, HUNGATE e WATKINS, 2008; VAN DER MEER et. al., 2004, UNGAR et al., 2003; BARNSLEY et al., 2004).

A aquisição de espectros contíguos para cada pixel da imagem, ao longo de um intervalo de comprimento de onda permite, não só a identificação de materiais presentes na superfície terrestre, como a caracterização da atmosfera, para que possa ser removida e, que não prejudique a qualidade espectral da imagem. Esta capacidade de caracterização não está disponível em imagens multiespectrais, onde a aquisição dos dados limita-se a janelas atmosféricas (GOETZ et. al., 1985; 2009).

Vários estudos têm sido realizados para aprimorar metodologias que compensem os efeitos atmosféricos nas imagens hiperespectrais, resultando em uma grande variedade de métodos e modelos para a correção atmosférica (KAWISHWAR, 2007; RICHTER et. al., 2002).

2.2 ATENUAÇÃO ATMOSFÉRICA

Dados obtidos por meio de sistemas de sensoriamento remoto aerotransportados são coletados considerando uma distância acima da superfície da Terra tendo, como objetivo, caracterizar os alvos através da detecção, registro e análise do fluxo radiante emitido ou refletido por eles. Entretanto, as informações que chegam ao sensor podem apresentar limitações devido a grande influência da atmosfera na energia refletida pelos alvos (LATORRE et. al., 2002; BORENGASSER, HUNGATE e WATKINS, 2008).

A atmosfera tem, entre seus principais componentes, o nitrogênio molecular, oxigênio, vapor d'água e partículas que podem ser chamadas de aerossóis, que consiste em particulados como: poeira, fuligem, gotas de água e cristais de gelo (DE JONG e VAN DER MEER, 2005).

Os componentes atmosféricos influenciam na energia que chega ao sensor provocando, na imagem, redução no brilho (da superfície terrestre) e a presença de névoa, que gera perda de nitidez nas regiões com menores comprimentos de onda. A interação da atmosfera é um problema recorrente na análise de dados por sensoriamento remoto, tornando-se importante considerar as características espectrais do sensor e as condições atmosféricas na data e hora da aquisição dos dados (DE JONG e VAN DER MEER, 2005; LATORRE, 2002; SLATER et. al., 1982).

A interação da energia eletromagnética com a atmosfera provoca mudanças na sua propagação. Estas mudanças podem ser ocasionadas pelo *espalhamento* e pela *absorção*. A combinação desses dois efeitos é denominada de atenuação atmosférica (SLATER, 1980).

Existem essencialmente três tipos de espalhamento: Rayleigh, Mie e espalhamento não seletivo. Na Figura 1 são mostradas as principais subdivisões da

atmosfera e os tipos de moléculas e aerossóis encontrados em cada camada (JENSEN, 2011).

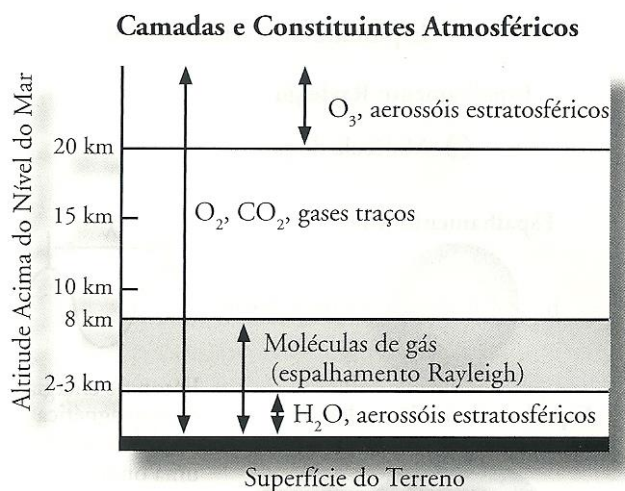


Figura 1 – Distribuição dos constituintes atmosféricos.

Fonte: Jensen, 2011.

O espalhamento de Rayleigh ocorre quando o diâmetro de partículas de ar, tais como oxigênio e nitrogênio são menores que o comprimento de onda da radiação eletromagnética incidente. O espalhamento de Rayleigh é responsável pela aparência azul do céu onde os comprimentos de ondas mais curtos do azul e do violeta (380nm a 500nm) sofrem maior espalhamento que os comprimentos de ondas maiores do laranja e do vermelho (580nm a 760nm) (JENSEN, 2011).

O espalhamento de Mie ocorre nos primeiros 5 km da atmosfera, e é causada pela interação da luz com partículas maiores, como poeira e fumaça. O tamanho real das partículas pode variar de 0,1 a 10 vezes o comprimento de onda da energia incidente. O espalhamento de Mie tem maior magnitude de espalhamento que o espalhamento de Rayleigh, portanto, quanto maior a quantidade de poeira e fumaça na coluna atmosférica maior será o espalhamento dos comprimentos de onda laranja e vermelho (JENSEN, 2011).

O terceiro tipo de dispersão é o espalhamento não-seletivo que ocorre nos níveis mais baixos da atmosfera, onde há partículas que são geralmente muito maiores de

diâmetro do que o comprimento de onda da luz incidente. Neste tipo de espalhamento todos os comprimentos de onda são espalhados e a dispersão ocorre uniformemente em todas as direções. No espalhamento não-seletivo geralmente envolve grandes partículas, como poeira, gotas de água, gelo e granizo (JENSEN, 2011).

O espalhamento de forma geral pode reduzir drasticamente as informações contidas nos dados coletados por meio de sensoriamento remoto podendo reduzir o contraste da imagem e dificultar a diferenciação de objetos. Na Figura 2 é possível ver a diferença de tamanhos e tipos de moléculas que mais influenciam cada espalhamento.

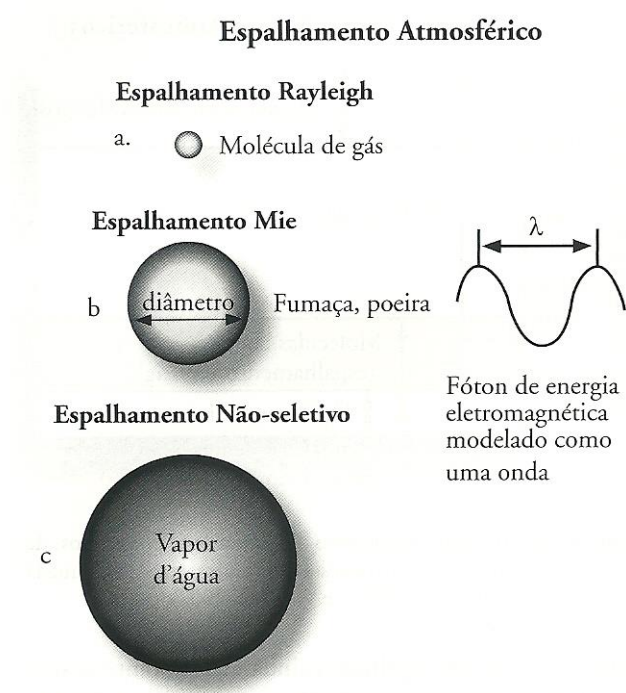


Figura 2 – Principais moléculas que influenciam cada tipo de espalhamento.

Fonte: Jensen, 2011.

Além do espalhamento outro efeito provoca mudanças na energia eletromagnética ao atravessar a atmosfera, conhecida como absorção. A absorção consiste em um processo pelo qual a energia radiante é absorvida e convertida em outras formas de energia, ocorrendo de forma seletiva em comprimentos de onda específicos, mas abrangendo todo o espectro óptico (JENSEN, 2011; LATORRE et. al., 2002). Os efeitos mais evidentes da absorção podem ser observados nos sensores hiperspectrais, pois estes abrangem regiões espectrais de forte absorção, as quais são geralmente desprezadas nos

sensores multiespectrais, cujas bandas são posicionadas apenas nas “janelas atmosféricas”. Essas janelas são regiões com pouca absorção dos gases atmosféricos como, por exemplo, as regiões espectrais de 850nm, 1.050nm e 1.250nm (LATORRE et. al., 2002).

As regiões espectrais onde a água (H₂O), dióxido de carbono (CO₂), oxigênio (O₂), ozônio (O₃), óxido nitroso (N₂O) e metano (CH₄) podem provocar efeitos na transmissão da energia eletromagnética ao passar pela atmosfera são descritas na Tabela 1 (GAO et. al., 1993; JENSEN, 2011) e demonstradas na Figura 3.

Tabela 1 – Principais regiões de absorção molecular na atmosfera terrestre

Comprimento de onda (nm)	Moléculas	Comprimento de onda (nm)	Moléculas
260	O ₃	3900	N ₂ O
600	O ₃	4300	CO ₂
690	O ₂	4500	N ₂ O
720	H ₂ O	4800	O ₃
760	O ₂	4900	CO ₂
820	H ₂ O	6000	H ₂ O
930	H ₂ O	6600	H ₂ O
1120	H ₂ O	7700	N ₂ O
1250	O ₂	7700	CH ₄
1370	H ₂ O	9400	CO ₂
1850	H ₂ O	9600	O ₃
1950	CO ₂	10400	CO ₂
2000	CO ₂	13700	O ₃
2100	CO ₂	14300	O ₃
2600	H ₂ O	15000	CO ₂
2700	CO ₂		

Fonte: Adaptado de Borengasser, Hungate e Watkins, 2008.

Os efeitos do espalhamento são muito evidentes na região do visível. Já a absorção afeta, praticamente, metade do espectro, abrangendo as regiões de 400nm a 2500nm (GAO et. al., 1993).

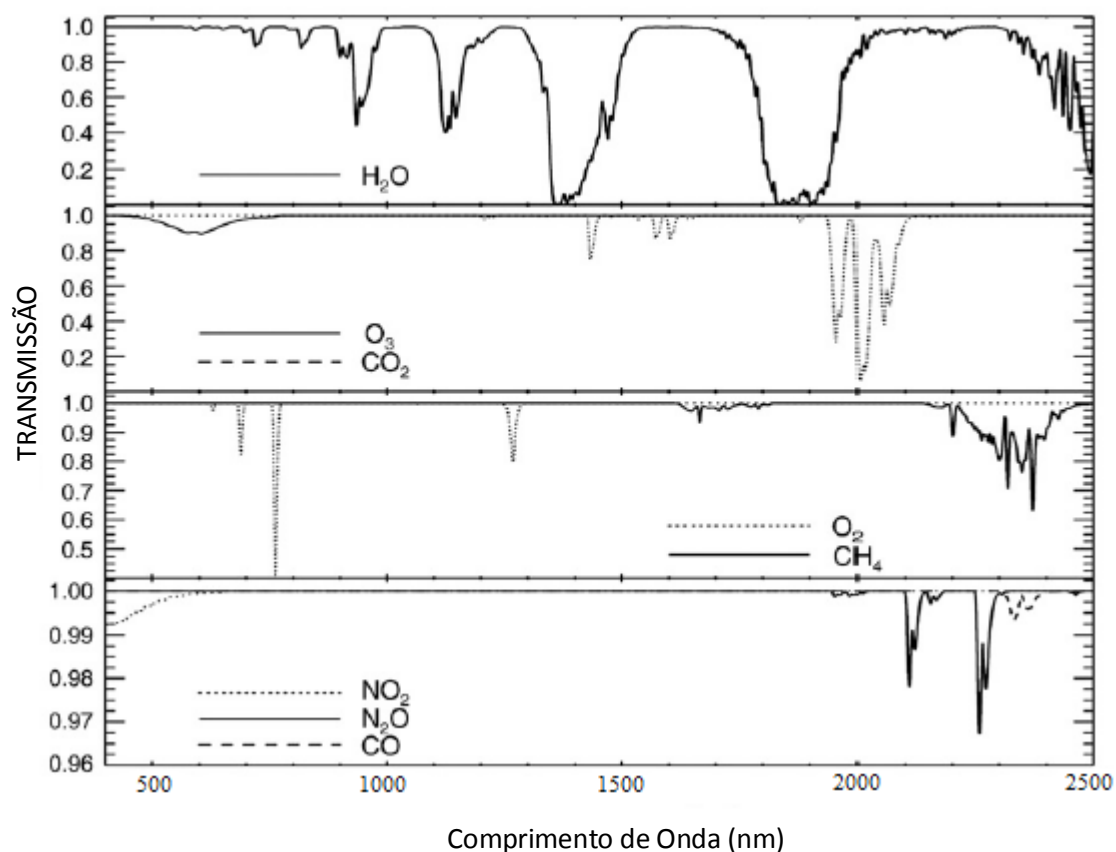


Figura 3 – Simulação dos espectros de transmitância do vapor de água atmosférico, dióxido de carbono, ozônio, óxido nítrico, monóxido de carbono, metano, oxigênio e dióxido de nitrogênio.

Fonte: Adaptado de Gao et. al., 2009.

A Figura 4 apresenta as janelas atmosféricas e as bandas de absorção ao longo do espectro entre 500nm a 3000nm. Já a Figura 5 apresenta o espectro solar, adquirido com o espectralradiômetro e a lente UW RCR (*Remote Cosine Receptor*) projetada para a aquisição de dados de irradiância. Os dados foram coletados na Universidade Estadual de Maringá, durante o período do dia compreendido entre às 7 horas e 18 horas, no dia 15 de setembro de 2015. As inflexões nas regiões de absorção de água são evidentes em todas as curvas do espectro solar coletas durante todo o dia.

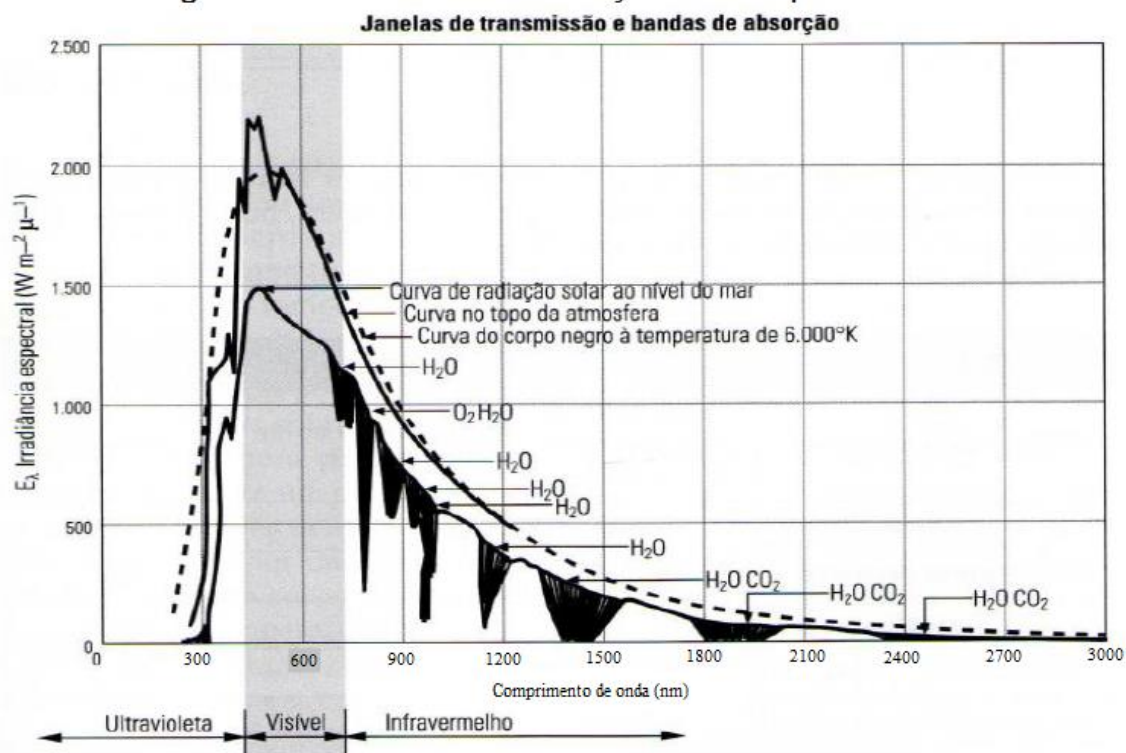


Figura 4 – Janelas de transmissão e bandas de absorção.

Fonte: Novo, 2010.

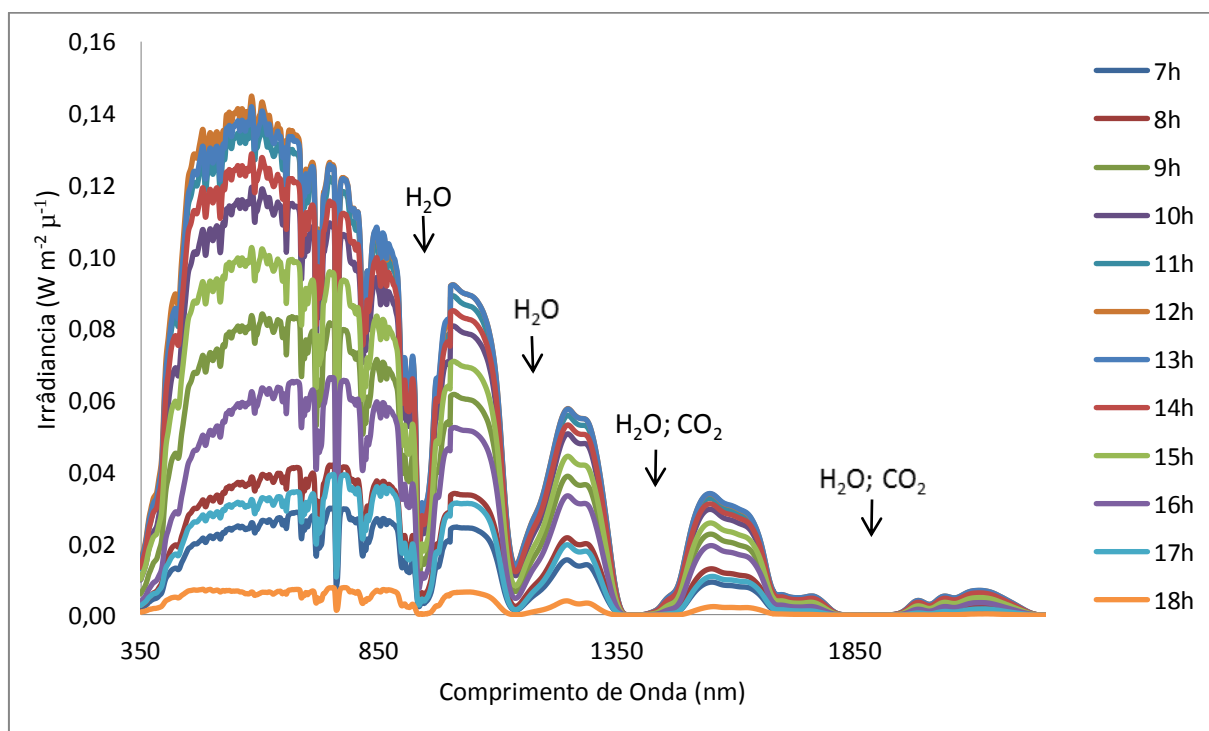


Figura 5 – Espectro Solar

2.3 CORREÇÃO ATMOSFÉRICA

A correção atmosférica é um processo importante para a análise adequada dos dados coletados através de sensoriamento remoto, cujo objetivo é remover ou diminuir a influência dos componentes atmosféricos na energia que é armazenada pelo sensor (YUAN e NIU et. al., 2008; GAO et. al., 2009; 2000; RICHTER e SCHLÄPFER et. al., 2002; HADJIMITSIS et. al., 2004).

Segundo Soares (2014) a etapa de correção atmosférica torna-se essencial quando imagens hiperespectrais são utilizadas, com o intuito de adquirir o máximo de informações radiométricas, e para que essas informações estejam livres de influências atmosféricas.

Vários métodos baseados em modelos e estratégias são utilizados para corrigir os efeitos atmosféricos. Os principais algoritmos de correção podem ser divididos em empíricos e os que se baseiam em modelos de transferência radiativa (MATTHEW et. al., 2002; BEN DOR et. al. 2004; RICHTER et. al., 1996; LENOT et. al., 2009).

Os algoritmos empíricos utilizam os dados contidos apenas nas cenas, sem dados adicionais, como temperatura, umidade e modelos de aerossóis (MORAN et. al., 2001; SOARES, 2014). Alguns métodos utilizam relações empíricas entre radiação e reflectância, como o método *Empirical Line Calibration* (EL) (SMITH e MILTON et. al., 1999). Outros algoritmos empíricos também são citados como: *Flat Field Correction* (FFC) e *Internal Average Relative Reflectance* (IARR) (KRUSE et. al., 2003; 2004),

Os modelos baseados em códigos de transferência radiativa modelam a radiação que atravessa a atmosfera e chega ao sensor, sofrendo diversas influências do meio (BEN DOR, 2005). Os principais métodos são conhecidos como: *Atmosphere Removal* (ATREM) proposto por Gao et. al., (1993), *Atmospheric and Topographic CORrection model* (ATCOR) (RICHTER e SCHLÄPFER et. al., 2002), *Atmosphere CORrection Now* (ACORN) (ACORN, 2002), *Line-of-Sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes* (FLAASH) desenvolvido em *MODerate spectral resolution atmospheric TRANsmittance* (MODTRAN) (ADLER-GOLDEN et. al., 1998) e *High Accuracy ATmospheric Correction for Hyperspectral data* (HATCH) desenvolvido em código 5S (*Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum*) e em código 6S (*Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum*) (QU et. al., 2003).

Os modelos de correção atmosférica ATCOR, ACORN e FLAASH, são baseados no algoritmo desenvolvido pela Força Aérea dos Estados Unidos, o *MODerate spectral resolution atmospheric TRANsmittance* (MODTRAN). O MODTRAN calcula a transmitância e radiância atmosférica, incorporando código LOWTRAN, com capacidade de calcular a transmitância atmosférica e a radiância nas regiões do ultravioleta, visível e infravermelho. O MODTRAN também tem capacidade de calcular o espalhamento atmosférico, além dos componentes de atenuação dos gases, aerossóis, nuvens, nevoeiros e chuva (BORENGASSER, HUNGATE e WATKINS, 2008; KAWISHWAR, 2007; FELDE et. al., 2004; ABREU e ANDERSON, 1996).

2.3.1 Algoritmo FLAASH

O FLAASH foi desenvolvido pela Spectral Sciences, Inc., através de uma parceria com o Laboratório de pesquisas da Força Aérea dos Estados Unidos, utilizando como código base o modelo de transferência radiativa baseado em MODTRAN. A diferença entre o modelo MODTRAN e o FLAASH é a inclusão, no código, de uma correção para a mistura de pixels devido à irradiação refletida no ambiente e que atinge a imagem degradando sua qualidade espectral (KAWISHWAR, 2007; BEN DOR, 2005; GAO et. al., 2009, KRUSE et. al., 2004; MOSES et. al., 2012).

O objetivo do FLAASH consiste em eliminar efeitos causados pela atenuação atmosférica na radiância que chega ao sensor que, posteriormente, será transformada em refletância (contendo as informações da superfície terrestre). Durante o processo de correção do FLAASH alguns parâmetros atmosféricos são recuperados para serem utilizados na correção. O primeiro é a recuperação da visibilidade que está relacionada com o tipo e distribuição do aerossol, e a segunda é a coluna vapor de água. Para cada cena tem-se uma visibilidade média, que utiliza a recuperação dos aerossóis obtidos através de pixels escuros contidos na imagem. Já a recuperação do vapor de água é muito mais eficiente, possibilitando que as colunas de vapor de água possam ser recuperadas pixel por pixel na imagem, melhorando de modo mais eficaz os efeitos causados pela atmosfera (FELDE et. al., 2004; MARKELIN et. al., 2016; YUAN e NIU et. al., 2008; MENESES e ALMEIDA, 2012; ROTTA et. al., 2016).

O FLAASH apresenta configurações para a correção de imagens adquiridas a partir de sensores hiperspectrais como HyMAP, AVIRIS, HYDICE, HYPERION, Probe-1, CASI e AISA e os multiespectrais como ASTER, IRS, Landsat, RapidEye e SPOT, podendo corrigir imagens que estejam dentro do espectro do visível até o infravermelho médio (de 400nm a 3000 nm). Para a obtenção da radiância de cada pixel da imagem o FLAASH utiliza a equação padrão descrita a seguir:

$$L = \left(\frac{A\rho}{1 - \rho_e S} \right) \left(\frac{B\rho_e}{1 - \rho_e S} \right) + L_a \quad (1)$$

Onde:

L é a radiância do sensor;

ρ é a reflectância do pixel na superfície;

ρ_e é a média da reflectância no entorno do pixel;

S é o albedo do topo da atmosfera;

L_a é a radiação espalhada pela superfície;

A e B são coeficientes que dependem da geometria e da condição atmosférica.

O primeiro termo da Equação 1 corresponde a radiância que é refletida a partir da superfície e chega diretamente ao sensor, enquanto que o segundo termo corresponde à radiação da superfície que é espalhada pela atmosfera e que também chega ao sensor. A diferença entre os termos ρ e ρ_e é devido à mistura espectral, causada pela dispersão atmosférica (FLAASH e QUAC, 2009).

Os valores de A , B , S e L_a são determinados a partir de cálculos utilizando o código MODTRAN4 que necessita dos ângulos solares e da altitude média do terreno contido na imagem. Estes parâmetros são fortemente ligados à quantidade de vapor de água presentes na

imagem, por isso a importância da determinação correta da quantidade de vapor de água (FLAASH e QUAC, 2009).

Através da razão entre bandas é possível estimar, para cada pixel, a quantidade de vapor de água presente no horário da tomada da imagem. Este cálculo é possível, se o sensor possuir duas bandas em pelo menos uma das três seguintes regiões: 850nm, 940nm e 1135nm. Como os sensores hiperespectrais possuem bandas nestas regiões, alguns valores da estimativa do vapor de água são propostos, e dependem da área de estudo e da época do ano, como é apresentado nas Tabelas 2 e 3.

Os valores recomendados de vapor d'água foram obtidos através de radiossondas para diferentes regiões terrestres (ABREU e ANDERSON, 1996). Contudo, o uso de estimativas do vapor de água, geradas a partir de modelos empíricos nem sempre podem retratar a realidade no momento do imageamento, o que acarreta em resposta espectral maior ou menor do que o esperado, dependendo do valor utilizado (SOARES, 2014).

Tabela 2 – Valores recomendados para Vapor D'água

Modelo Atmosférico	Vapor D'água (g/cm²)
Sub-ártico de Inverno (SI)	0,42
Média latitude de Inverno (MLI)	0,85
Sub-ártico de Verão (SV)	2,08
Média Latitude de Verão (MLV)	2,92
Tropical (T)	4,11

Fonte: Soares, 2014.

Tabela 3 – Recomendação de perfil do MODTRAN em relação a faixa de latitude e época do ano.

Latitude	Janeiro	Março	Maió	Julho	Setembro	Novembro
0	T	T	T	T	T	T
-10	T	T	T	T	T	T
-20	T	T	T	MLV	MLV	T
-30	MLV	MLV	MLV	MLV	MLV	MLV

Fonte: Adaptado de FLAASH e QUAC, 2009.

Os modelos para a correção de aerossóis são classificados como: *Rural*, que considera baixa quantidade de partículas na atmosfera, o *Urban*, que é indicado para áreas adensadas e com indústrias, o *Maritim*, que considera áreas próximas ao oceano e o *Tropospheric* que aplica-se a condições calmas, claras (visibilidade superior a 40 km) e assim como no modelo rural considera a atmosfera com pequenas partículas e em baixas quantidades (FLAASH e QUAC, 2009; SOARES, 2014).

2.3.2 Algoritmo ATCOR

O modelo *Atmospheric and Topographic CORrection model* (ATCOR) que foi desenvolvido pela DLR (*German Aerospace Center – Centro Aeroespacial Alemão*) abrange a regiões espectrais de 400-2500nm e suporta sensores hiperespectrais e multiespectrais.

Existem dois modelos do ATCOR disponíveis, um para imagens de satélites e outro para imagens aéreas. Os códigos para processamento de imagens de satélite são chamados de ATCOR-2 (usado em terrenos planos, com dois graus de liberdade: x e y) e o ATCOR-3 (usado em terrenos montanhosos, com três graus de liberdade: x, y e z), estes dois códigos, suportam satélites com sensores de campo de visada (FOV) pequeno a médio, e com uma base de dados atmosféricos específicos para cada sensor. Como os valores do FOV destes sensores são pequenos, o ângulo de varredura, neste caso pode ser negligenciado pelos dois códigos (KAWISHWAR, 2007; ATCOR-4, 2012).

A versão para sensores aerotransportados é chamada de ATCOR-4 indicando os quatro parâmetros geométricos: x, y, z e o ângulo de varredura. Nesta versão há uma dependência do ângulo de varredura dos sensores devido ao FOV que, para a maioria dos sensores aerotransportados, variam de 60° a 90° (ATCOR-4, 2012).

Os sistemas satélites operam sempre fora da atmosfera ao contrário dos sensores aerotransportados que podem operar em altitudes de centenas de metros até 20 km. Devido a essas mudanças de altitude é necessário uma base de dados atmosféricos que recubra estas variações. Como não há um padrão nos instrumentos aéreos e como os valores radiométricos podem variar devido às modificações de hardware dos sensores, foi desenvolvido um banco de dados atmosféricos baseada no código de transferência radiativa MODTRAN R5. Esta

base de dados deve ser utilizada de acordo com o sensor e com as necessidades do usuário durante o processamento no ATCOR-4 (ATCOR-4, 2012; RICHTER e SCHLÄPFER et. al., 2002, BEN DOR, 2005).

Os três parâmetros atmosféricos mais importantes que variam de acordo com o espaço e o tempo são o tipo de aerossol, visibilidade e vapor de água. O tipo de aerossol inclui as propriedades de absorção e dispersão das partículas e a dependência do comprimento de onda das propriedades ópticas. O ATCOR suporta quatro tipos de aerossol sendo: rural, urbano, marítimo e desértico. Geralmente a escolha do aerossol é de acordo com a localização geográfica, por exemplo, o aerossol marítimo seria para regiões próximas ao mar ou que sofrem influência de correntes marítimas. O aerossol também pode ser calculado a partir dos dados da imagem, desde que, na cena contenha áreas com vegetação (ATCOR-4,2012; GAO et. al., 2009).

A visibilidade no ATCOR pode ser estimada usando o módulo SPECTRA ou um cálculo automático da visibilidade pode ser realizado se houver na cena pixels de referência escura. Já o conteúdo de vapor de água pode ser calculado automaticamente se o sensor tiver bandas espectrais em regiões de estimativa do vapor de água, por exemplo, regiões entre 920nm a 960nm. Os modelos atmosféricos e a estimativa de vapor de água para cada modelo são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Estimativa do vapor de água em diferentes condições

Modelo Atmosférico	Vapor D'água (g/cm²)
Condições tropicais	3-5
Verão de médias latitudes	2-3
Verão seco, primavera	1-1,5
Deserto seco ou inverno	0,3-0,8

2.3.3 Algoritmo QUAC

O QUick Atmospheric Correction (QUAC) é um método que realiza a correção atmosférica de imagens multiespectrais e hiperspectrais compreendendo a região do visível

até o infravermelho médio (~ 400 nm a 2500nm) e suporta muitos sensores como: AISA, AVIRIS, COMPASS, HYDICE, HyMap, Hyperion, IKONOS, Landsat TM, MODIS, QuickBird entre outros.

O QUAC, ao contrário de outros métodos de correção como o FLAASH, por exemplo, determina os parâmetros de compensação atmosférica a partir das informações contidas na própria imagem, sem utilizar informações auxiliares, tornando-se uma alternativa mais simples aos sofisticados procedimentos de correção atmosférica que utilizam modelos de transferência radiativa (MOSES et. al., 2012).

O QUAC processa uma imagem com maior velocidade se comparada a outros métodos, e permite também que se tenha qualquer ângulo de visada ou elevação solar. Se um sensor não tiver a calibração radiométrica adequada, ou se a intensidade da iluminação solar for desconhecida, este método ainda permite a obtenção de espectros de reflectância razoavelmente precisos (FLAASH e QUAC, 2009).

Como o QUAC não necessita de nenhuma informação prévia sobre os alvos terrestres e da atmosfera no momento da tomada da imagem, ele se baseia em várias suposições simplistas. Primeiro supõe-se que a imagem seja composta de, pelo menos, dez pixels espectralmente diversos; assume-se que o desvio padrão da reflectância do conjunto de pixels escolhido seja uma constante praticamente independente do comprimento de onda. Esta suposição baseia-se no princípio de que não se espera que diversos pixels sejam correlacionados espectralmente e tenham sido empiricamente validados (BERNSTEIN et. al., 2005; MOSES et. al., 2012). Os efeitos atmosféricos são removidos através de uma correção de linha de base usando pixels escuros dentro da imagem.

Nos resultados demonstrados por Bernstein et. al. (2005) é possível ver que o QUAC produz precisões que são compatíveis a métodos mais sofisticados e com velocidade computacional significativamente mais rápida. Na Figura 6 é possível ver o esquema de processamentos de dados realizado no QUAC.

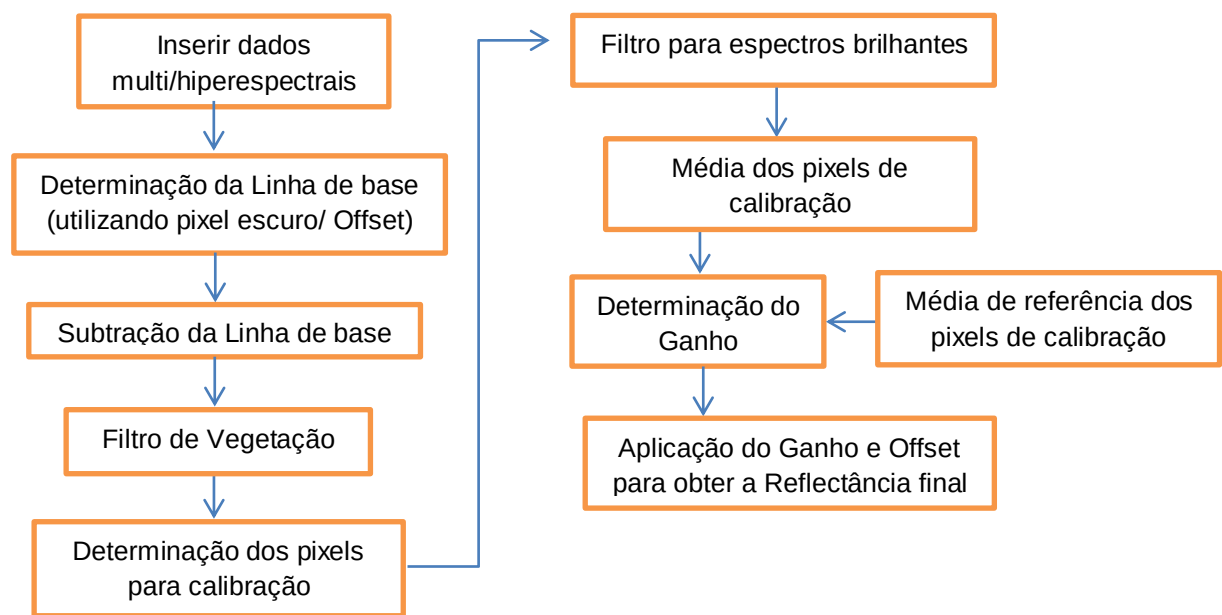


Figura 6 – Esquema de processamentos realizado pelo QUAC.

Fonte: Adaptado de FLAASH e QUAC, 2009.

2.2.4 Correção Linear Empírica

Durante a década de 1980, vários métodos empíricos foram desenvolvidos com o intuito de remover os efeitos atmosféricos de imagens hiperespectrais (GAO et. al., 2009). O método de correção linear empírica (LE) é amplamente utilizado e frequentemente produz bons resultados, sempre que as informações atmosféricas não são conhecidas (BEN DOR et. al., 2004).

O método de LE tem como objetivo realizar a conversão dos valores de radiância coletados pelo sensor em valores de reflectância, caracterizando a superfície terrestre. Esta metodologia pode ser empregada tanto para satélites multiespectrais como para sensores hiperespectrais aerotransportados (STABEN et. al., 2012).

Para realizar a correção utilizando o método de LE pressupõe-se que na imagem há um ou mais alvos com diferentes valores de reflectância e que abrangem uma quantidade significativa de bandas do sensor. Utilizando um espectrorradiômetro, são medidos os valores de reflectância destes alvos (no campo) que serão utilizados no processo de calibração. Os valores de radiância destes mesmos alvos são coletados na imagem e, a partir destes dados de

radiância e reflectância é possível desenvolver uma equação que é aplicada em cada banda da imagem, com o intuito de remover os efeitos atmosféricos, produzindo uma nova imagem em unidades de reflectância (SMITH e MILTON et. al., 1999). Na Figura 7 é demonstrado o desenvolvimento da equação para LE utilizando dois alvos na calibração.

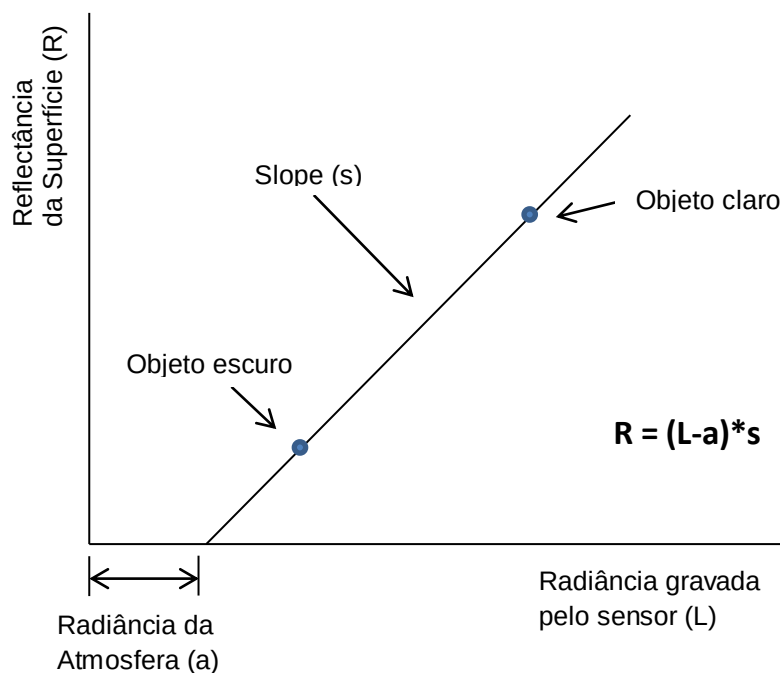


Figura 7 – Desenvolvimento da equação LE utilizando dois alvos.

O método de LE pode ser aplicado de diversas maneiras. A maneira mais simples é utilizando um único alvo para a calibração. Assumindo que superfícies com zero valor de reflectância também terão valor zero de radiância na imagem, e que há uma relação linear entre a radiância e a reflectância. Já a utilização de dois alvos, sendo um claro e um escuro, é uma das formas mais empregadas para a calibração do método LE, determinando-se assim, o contraste espectral entre os alvos, e eliminando os efeitos atmosféricos (SMITH e MILTON et. al., 1999).

Os melhores resultados, utilizando o método LE, foram apresentados por Smith e Milton (et. al., 1999) utilizando mais de dois alvos no processo de calibração. Dessa forma, elimina-se a necessidade de assumir uma relação linear entre a radiância coletada na imagem e a reflectância coletada no campo, melhorando assim, a precisão dos resultados.

Segundo Karpouzli e Malthaus et. al. (2003) os critérios para a seleção dos alvos de calibração na imagem são: áreas espectralmente homogêneas (de preferência horizontais), áreas desprovidas de vegetação e áreas com pelo menos três vezes o tamanho do pixel da imagem.

Vale ressaltar que método LE realiza a simplificação de vários fatores importantes, considerando uniformes as condições atmosféricas e a intensidade da iluminação em toda a imagem (STABEN et. al., 2012), o que pode diminuir a qualidade das assinaturas espectrais. Porém, há resultados significativos, quando utiliza-se na calibração, alvos escuros e brilhantes bem definidos na imagem. Dessa forma, a precisão da calibração depende quase que exclusivamente da correta caracterização dos alvos (MORAN et. al., 2001).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO

O aerolevanteamento com o sensor AisaFENIX foi realizado no município de Maringá –PR , mais precisamente na Universidade Estadual de Maringá (UEM) com latitude $23^{\circ}24'18.16''\text{S}$ e longitude $51^{\circ}56'17.37''\text{O}$. O município de Maringá está situado na região Noroeste do Estado do Paraná (Figura 8), e sua área territorial é de $487,730 \text{ Km}^2$. O clima predominante do município apresenta verões quentes e geadas pouco frequentes, com concentração de chuvas nos meses de verão, sem estação seca definida (BOVO, 2009; MAACK, 1981).

O voo com o sensor AisaFENIX foi realizado no município de Maringá devido a logística de voo adotada e a otimização dos custos com a retirada do equipamento da UEM. Diversos trabalhos nas áreas de solo e vegetação estão em desenvolvimento nesta região e em municípios vizinhos, dessa forma as imagens hiperespectrais adquiridas no aerolevanteamento poderão ser utilizadas nos trabalhos em andamento e em novos estudos.

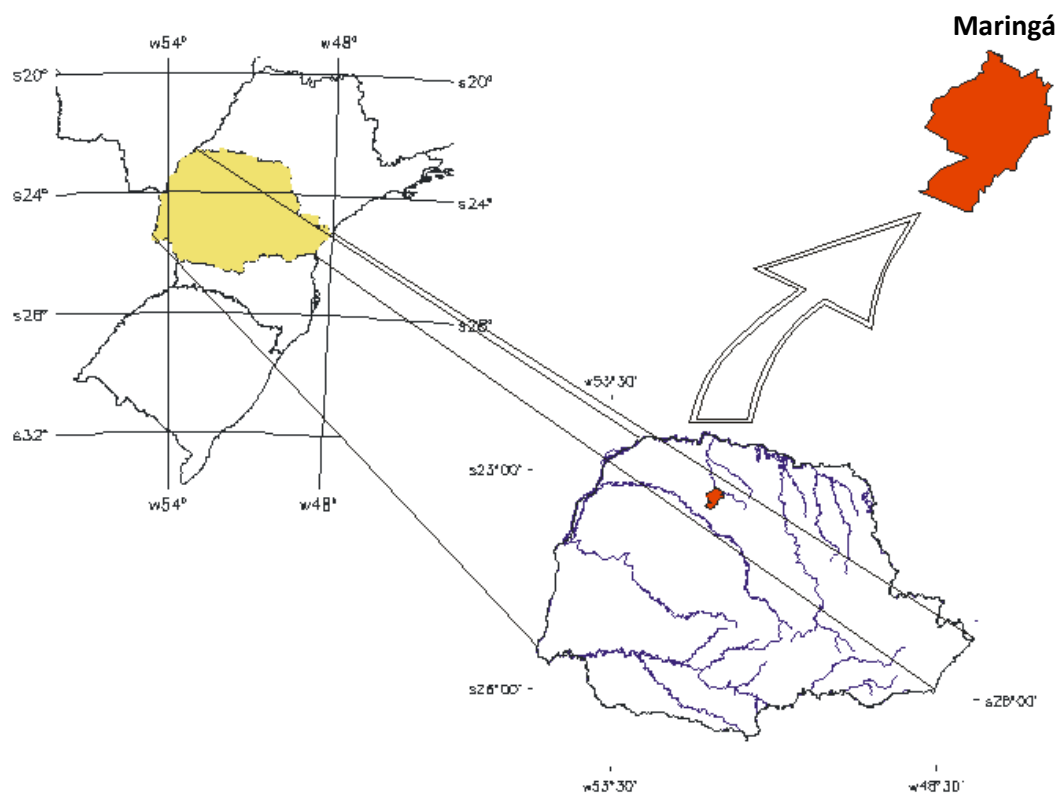


Figura 8 – Localização da área de estudo.

3.2 MATERIAL

3.2.1 Sensor Hiperespectral AisaFENIX

A aquisição de dados através de sensores hiperespectrais possibilita não só assinaturas espectrais mais definidas de determinados alvos como permite também caracterizar a atmosfera para a remoção dos seus efeitos na imagem (GOETZ et. al., 2009).

Existem muitos sensores hiperespectrais disponíveis no mercado. O sensor de interesse neste trabalho foi o AisaFENIX, como pode ser visto na Figura 9, do fabricante Spectral Imaging (www.specim.fi). O AisaFENIX é um sensor de varredura, que abrange o intervalo espectral de 380nm a 2500nm.



Figura 9 – Sensor aerotransportado AisaFENIX.

Fonte: <http://www.gales.uem.br/>; <http://www.specim.fi/products/aisafenix-hyperspectral-sensor/>.

O sensor AisaFENIX possui dois detectores físicos, que registram separadamente as regiões de comprimento de onda do visível e do infravermelho. O CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) opera na região do visível e infravermelho próximo (VNIR), no intervalo espectral de 380nm a 970nm, e o MCT (Mercury Cadmium Telluride) na faixa do infravermelho médio (SWIR) no intervalo espectral de 970nm a 2500nm. O detector CMOS, possui três opções de formado binário espectral, resultando em 348 bandas no modo binário 2x, 174 bandas no modo binário 4x, e 87 bandas no modo binário 8x. O detector MCT, não

possui opções de formato binário e resulta em 274 bandas (SPECIM, 2013, MARKELIN et. al., 2016).

A resolução espectral na região do VNIR é igual a 3,5nm e no SWIR igual a 12nm. Já o detector CMOS apresenta resolução radiométrica de 12 bits, e o detector MCT apresenta resolução radiométrica igual a 16 bits. A resolução espacial do sensor pode chegar a 1 metro, caso o sensor esteja a uma altitude de voo de 660 metros (SPECIM, 2013).

3.2.2 Aquisição de imagens hiperespectrais

O aerolevantamento com o sensor AisaFENIX foi realizado nos dias 30 de abril, 01 e 02 de maio de 2016. Na Figura 10 está situada a pista de atletismo da UEM, região alvo para a aquisição das imagens e dos dados de campo adquiridos com o espectrorradiômetro.



Figura 10 – Região onde está situada a pista de Atletismo da UEM.

Fonte: Imagem Digital Globe (Google Earth, 2016)

Após a realização do aerolevantamento, foram selecionadas as imagens hiperespectrais adquiridas com sensor AisaFENIX. As quatro imagens selecionadas são apresentadas nas Figuras 11, 12, 13 e 14. As imagens estão no sistema de referência WGS-84,

projeção UTM, Fuso 22. A denominação de cada imagem segue uma ordem dada pelo próprio sistema durante a aquisição das mesmas, mas com o intuito de facilitar as nomenclaturas a imagem 1340 foi denominada, como sendo, a imagem 1 do dia 30 de abril de 2016 (Figura 11), imagens 1144 e 1303, como sendo, a imagem 2 e imagem 4 ambas do dia 01 de maio de 2016 (Figura 12 e Figura 14) e a imagem 1140-1, como sendo, a imagem 3 do dia 02 de maio de 2016 (Figura 13).

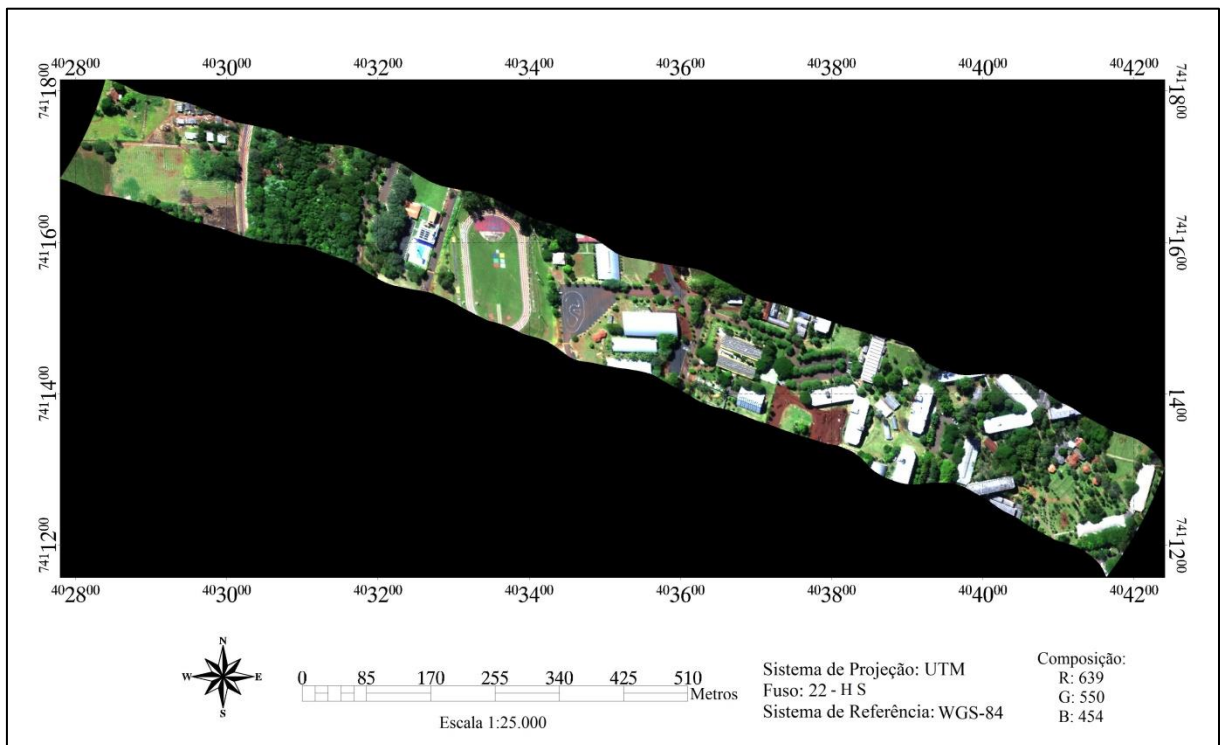


Figura 11 – Imagem 1 coletada no dia 30/04/2016.

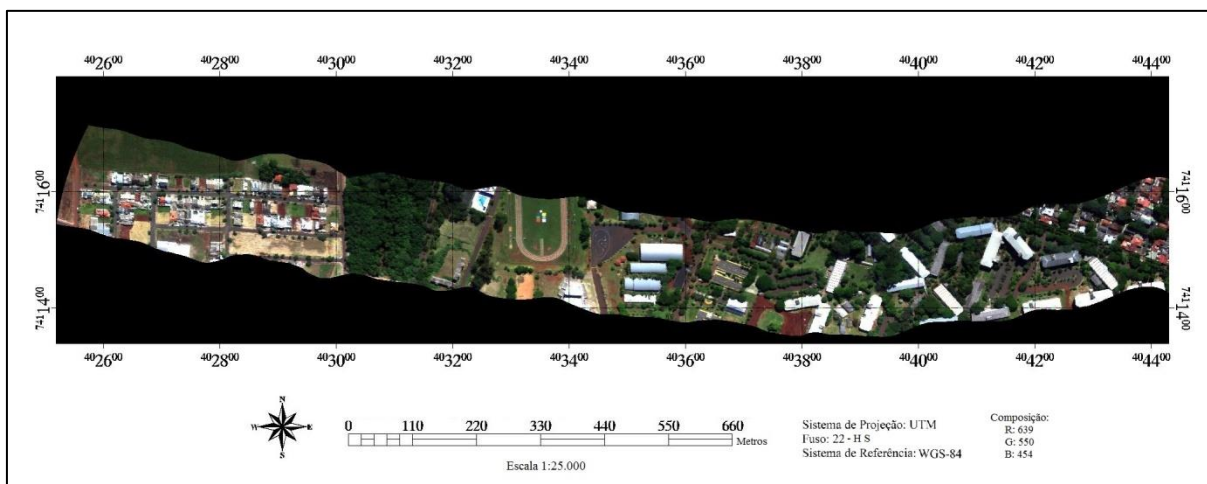


Figura 12 – Imagem 2 coletada no dia 01/05/2016.

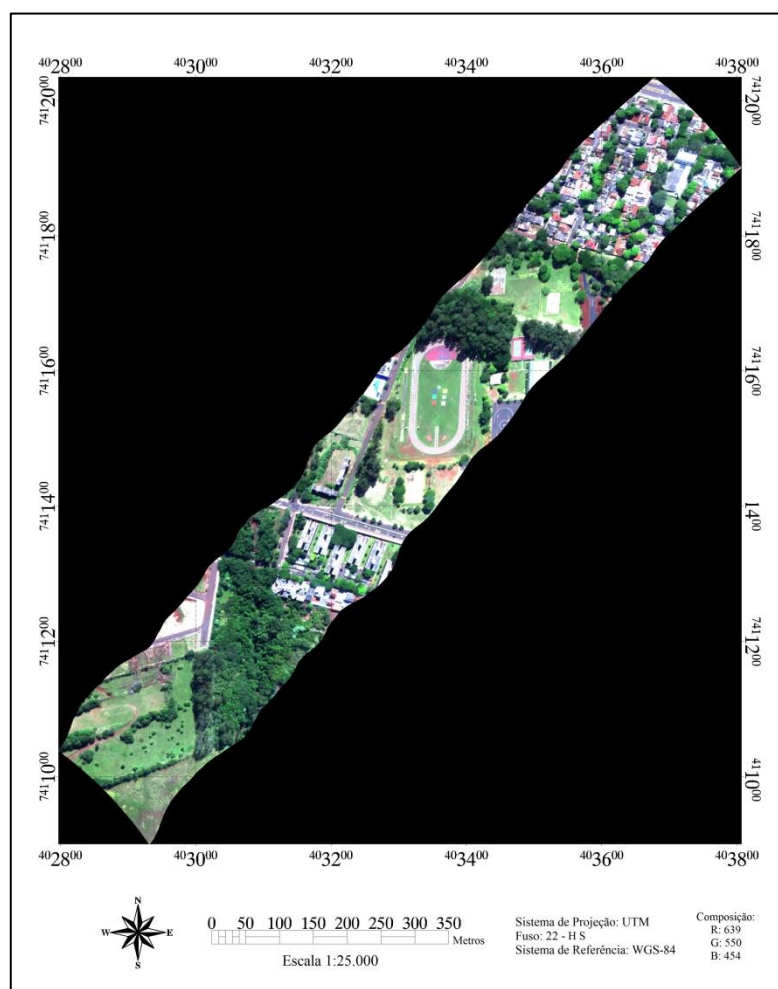


Figura 13 – Imagem 3 coletada no dia 02/05/2016.

A região da imagem 4, diferentemente das demais imagens, está situada na região do município de Diamante do Norte – PR, localizado na latitude 22° 40’S e longitude 52° 51’O, está a 130km aproximadamente do município de Maringá – PR. A imagem 4 foi utilizada para a análise dos métodos de correção atmosférica sem alvos de referência para calibração.

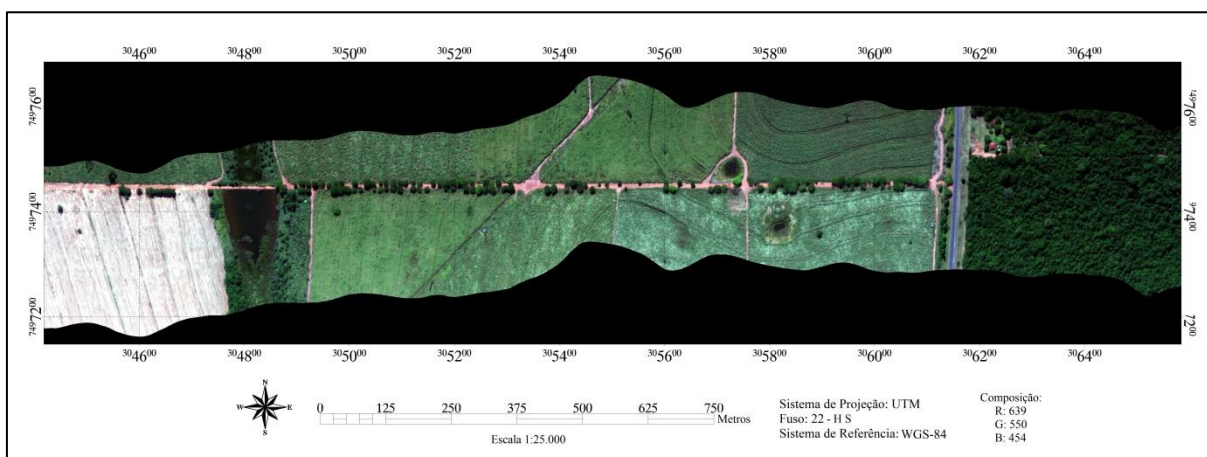


Figura 14 – Imagem 4 de Diamante do Norte-PR.

3.2.3 Coleta de dados no campo

Nos três dias, simultaneamente ao voo foram estendidas lonas no centro da pista de atletismo da UEM, nas cores: azul, vermelho, verde, amarelo, cinza claro e cinza escuro como, também uma placa de Sulfato de Bário (BaSO_4). As lonas e a placa de BaSO_4 têm dimensões iguais a 5m x 5m (largura x comprimento), o material de composição das lonas é o vinil trançado, já a placa de BaSO_4 foi pintada com BaSO_4 diluído em água dias antes do voo. A pintura da placa de BaSO_4 foi realizada anteriormente ao voo para eliminar possíveis influências de umidade na placa.

As lonas e a placa foram utilizadas na avaliação e comparação dos métodos empregados para correção atmosférica das imagens. A placa de BaSO_4 , tem alto poder refletivo, tornando-se um alvo brilhante na imagem o que pode melhorar a qualidade da correção atmosférica em métodos que utilizam alvos brilhantes na calibração, como o ATCOR-4. Na Figura 15 é possível ver as lonas e a placa dispostas no campo no momento do voo.



Figura 15 – Lonas estendidas no campo de futebol da UEM no momento do voo.

No campo as coletas das curvas espectrais das lonas e da placa de BaSO_4 foram realizadas utilizando o espectrorradiômetro FieldSpec-3. Foram realizadas três coletas em cada alvo e, posteriormente, foram calculadas as médias aritméticas das curvas espectrais, como mostra a Figura 16. O cálculo da média tem como finalidade diminuir os possíveis erros ocorridos durante a aquisição e o processamento dos dados. Estes erros ocorrem devido a efeitos de ótica e eletrônica do sensor ASD causando a presença de ruídos nas medidas radiométricas. Dessa forma, além da média aritmética, aplicou-se nas curvas espectrais o filtro *Splice Correction* implementado no *software ViewSpec PRO* para a diminuição de possíveis ruídos (MIYOSHI, 2016; ViewSpec PRO, 2008).

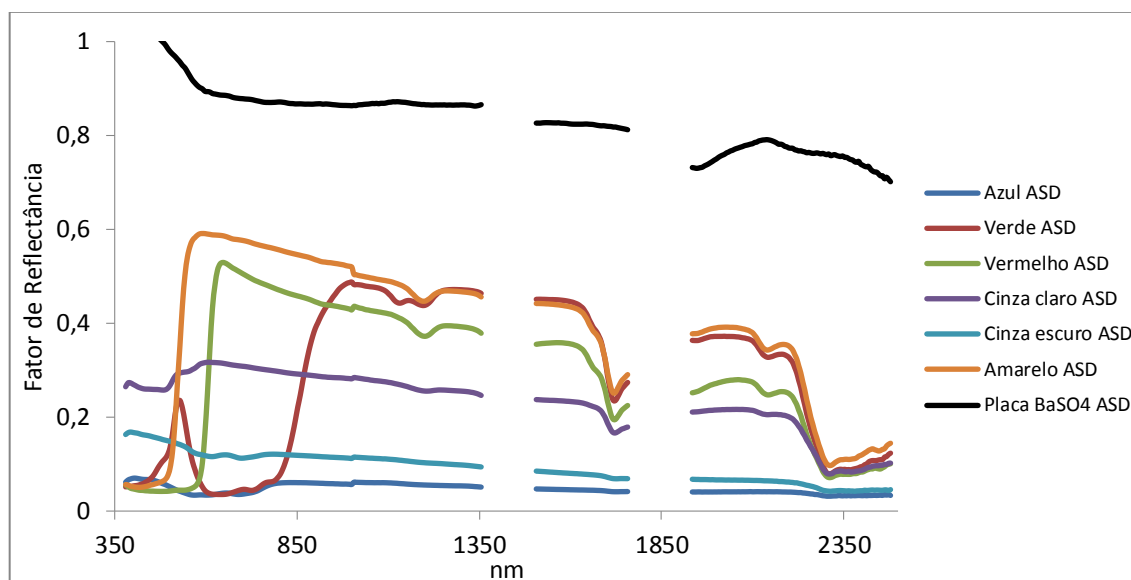


Figura 16 – Assinaturas espectrais das lonas e da placa de BaSO₄ adquiridas no campo, utilizando o espectrorradiômetro FieldSpec-3.

Para a avaliação da correção atmosférica realizada na imagem 4, onde não há alvos de referência para calibração dos métodos de correção, foram selecionadas as curvas espectrais de duas espécies arbóreas localizadas na cena. As espécies arbóreas selecionadas foram o Ipê Roxo (*Handroanthus impetiginosus*) e a Mangueira (*Mangifera indica*), como apresenta a Figura 17. As coordenadas geográficas obtidas no campo do Ipê Roxo são latitude -22°37'4.45" e longitude -52°53'6.98" e as coordenadas da Mangueira são latitude -22°37'4.75" e longitude -52°53'6.25".

Para a coleta das assinaturas espectrais das espécies arbóreas também foi utilizado o espectrorradiômetro Fieldspec-3. No campo foram realizadas 10 coletas, em nível foliar, para cada espécie analisada. Posteriormente, realizou-se a média aritmética das assinaturas espectrais coletadas no campo, gerando uma curva espectral média para cada espécie.



Figura 17 – Localização das espécies arbóreas Ipê Roxo (*Handroanthus impetiginosus*) e a Mangueira (*Mangifera indica*).

3.3 MÉTODOS

A Figura 18 e a Figura 19 apresentam o esquema metodológico dos processos realizados na correção atmosférica, das imagens 1, 2, 3 e 4.

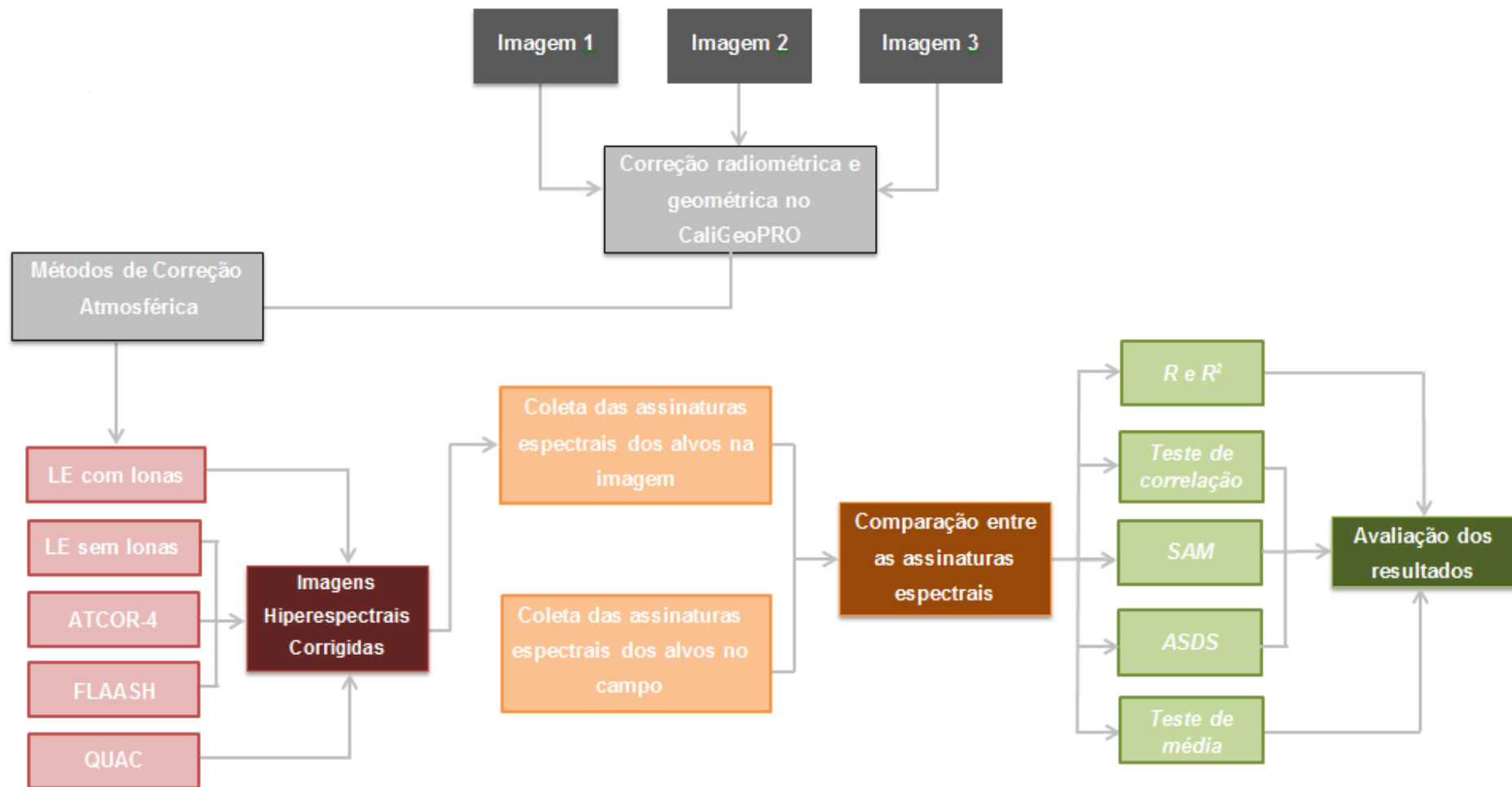


Figura 18 – Esquema metodológico para correção das imagens 1, 2 e 3.

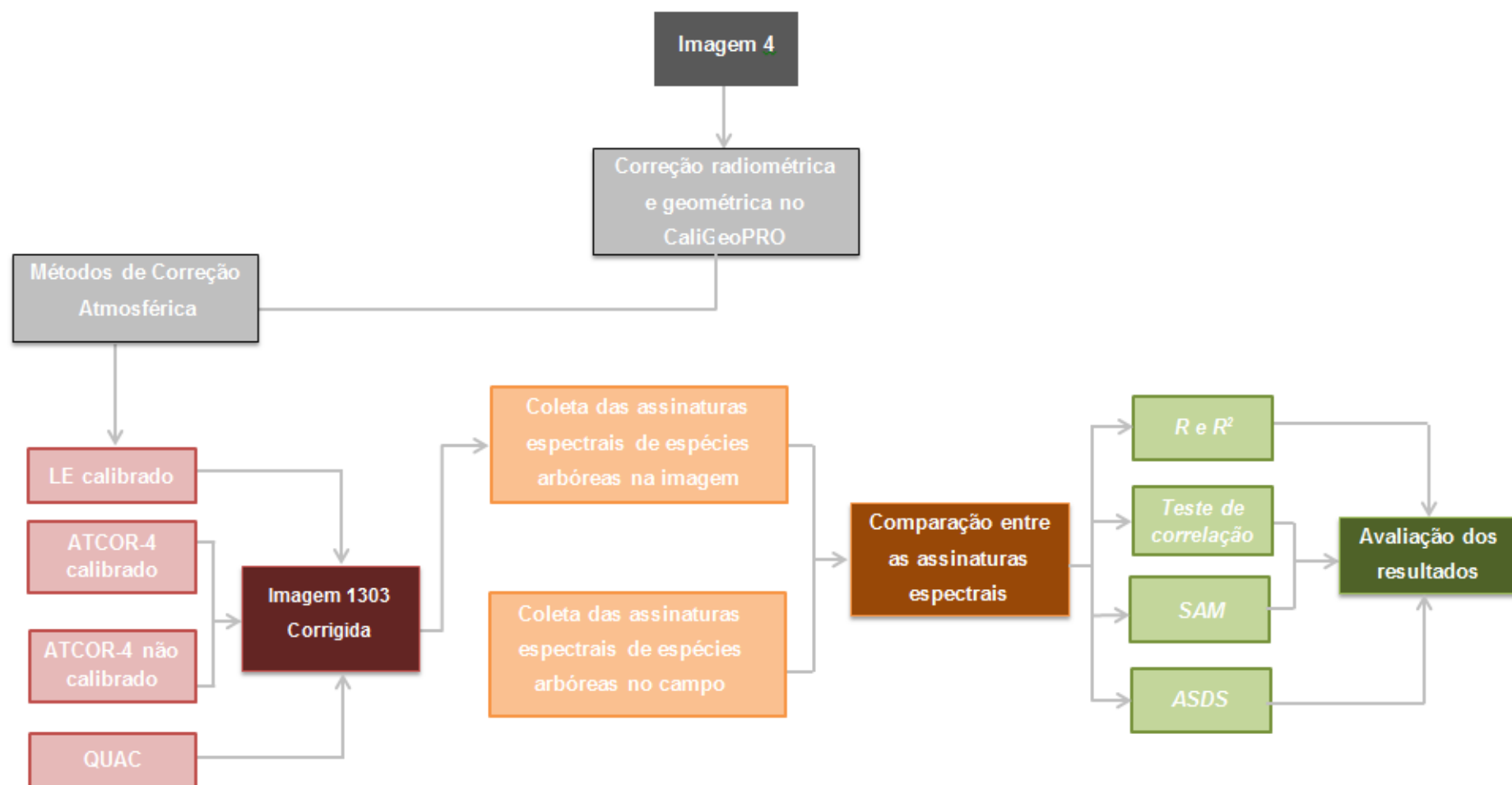


Figura 19 – Esquema metodológico para a correção da imagem 4.

3.3.1 Correção radiométrica e geométrica

Os dados adquiridos no aerolevantamento e que ainda não sofreram nenhum tipo de processamento, frequentemente apresentam degradação radiométrica, ocasionada por má calibração dos detectores, possíveis erros na transmissão dos dados e influências atmosféricas. Durante a aquisição das imagens algumas distorções sistemáticas também são introduzidas, gerando erro na geometria das imagens (D'ALGE, 2001).

Com o intuito de corrigir estas degradações, torna-se necessário a realização de correções radiométricas e geométricas nas imagens originais. Desse modo, as imagens utilizadas neste trabalho foram corrigidas radiometricamente e geometricamente utilizando o software CaliGeoPRO. A Figura 20 apresenta uma imagem sem correção radiométrica e geométrica e a imagem após a correção no CaliGeoPRO.

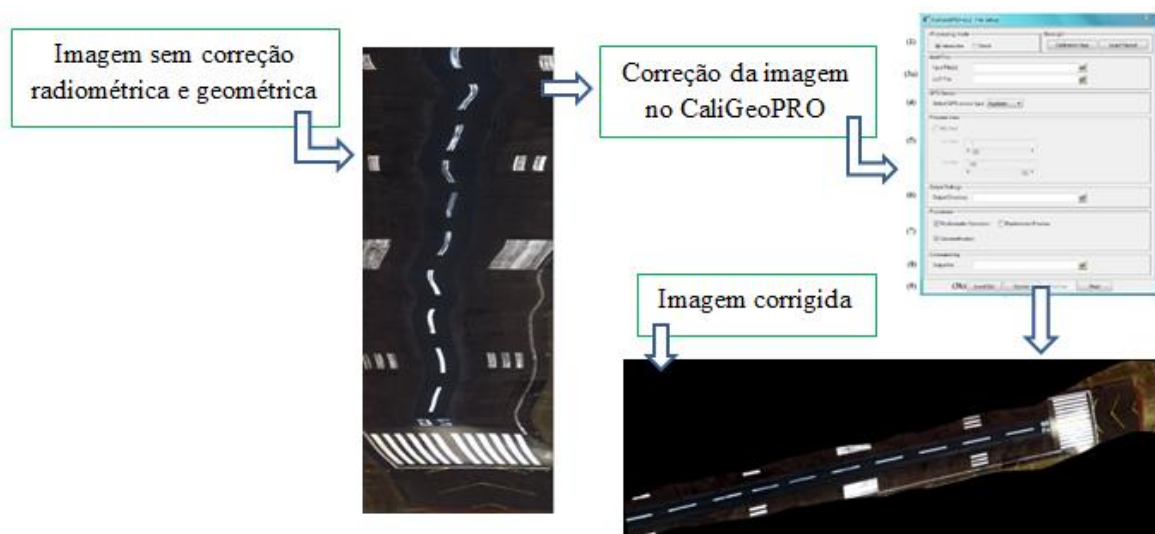


Figura 20 – Imagem antes e após a correção geométrica e radiométrica.

O CaliGeoPRO é um software desenvolvido pela SPECIM (<http://www.specim.fi/>), tem como finalidade realizar correções, utilizando os arquivos de calibração do sensor (.LUT e .CAL) e os arquivos brutos das imagens (.NAV, .RAW e .HDR) adquiridos durante o aerolevantamento.

O CaliGeoPRO permite configurar o tipo de processamento de acordo com as necessidades do usuário, onde todas as opções de processamento podem ser encontradas no Guia do CaliGeoPRO obtido através da SPECIM.

Na realização das correções radiométrica e geométrica, as imagens são transformadas de número digital (ND) em unidades de radiância ($((\text{mW}/\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m}) \cdot 1000.00)$), como apresenta a Figura 21. Dessa forma, a próxima etapa no tratamento de imagens pode ser realizada, a correção atmosférica.

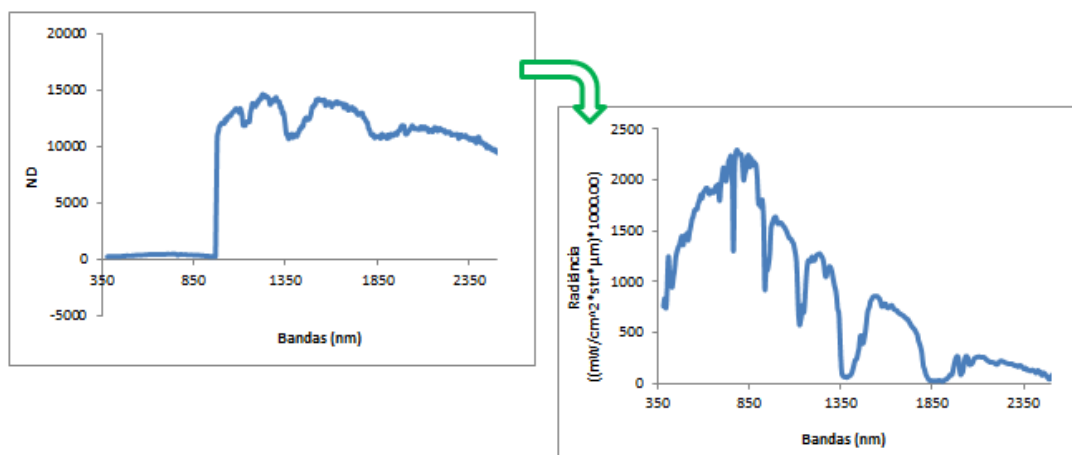


Figura 21 – Transformação de unidades após a correção no CaliGeoPRO (ND para radiância).

3.3.2 Reflectância Bidirecional

A geometria de aquisição dos dados e os parâmetros atmosféricos proporcionam efeitos que influenciam a medida da reflectância de um alvo, e que, portanto afetam diretamente a distribuição e a intensidade da reflectância (NOGUEIRA et. al., 1996).

A função de distribuição da reflectância bidirecional (FDRB) considera as propriedades direcionais da reflectância medida em todas as possíveis direções fonte-alvo-sensor, contudo a FDRB não pode ser medida diretamente (SLATER, 1980; MILTON et. al., 1987, NOGUEIRA et. al., 1996). Dessa forma, a FDRB pode ser substituída por uma aproximação denominada fator de reflectância bidirecional (FRB). O fator de reflectância bidirecional é definido como a razão entre a radiância do alvo pela radiância de uma superfície Lambertiana ideal (Figura 22), medidos sob as mesmas condições de iluminação e observação, quando os ângulos de iluminação e observação envolvidos forem menores do que

20° (MILTON et. al., 1987). Trata-se, portanto, de um parâmetro fundamental no estudo do comportamento espectral de alvos (PONZONI, 2012).

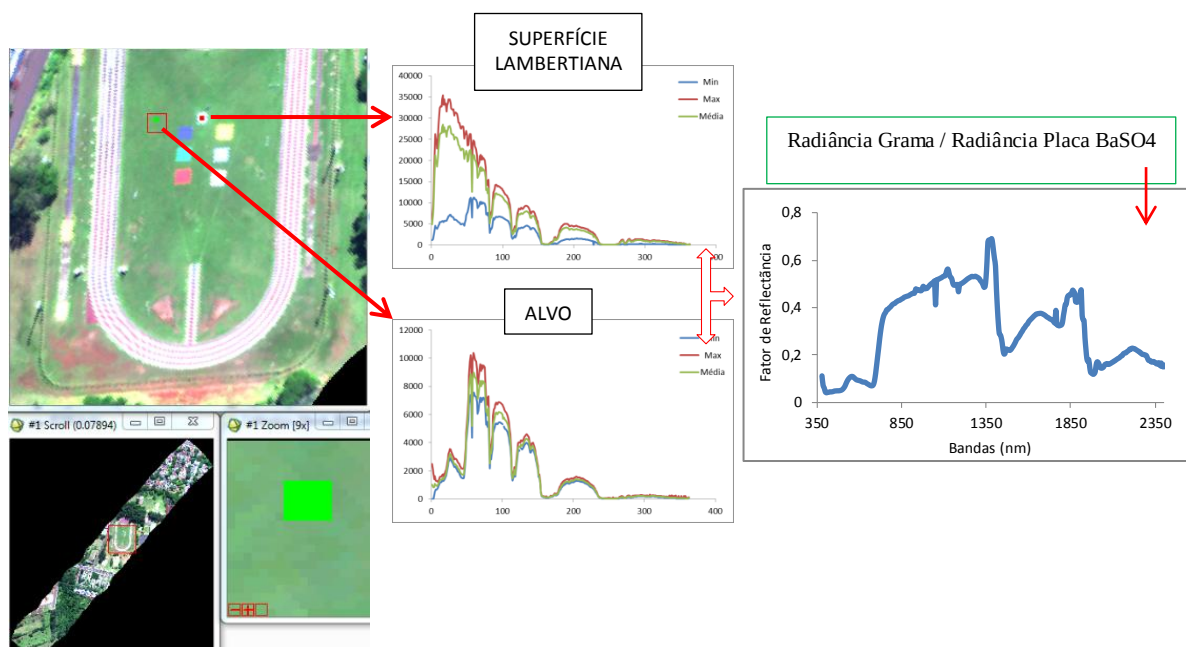


Figura 22 – Fator de Reflectância Bidirecional da grama utilizando a placa de BaSO₄.

As curvas espectrais adquiridas a partir dos espectrorradiômetros utilizam-se de uma superfície Lambertiana, como a placa *Spectralon*®, para obter os valores do fator de reflectância de alvos no campo. Todas as imagens, durante o processo de correção atmosférica também sofreram uma aproximação da FDRB sendo convertidas em unidades de reflectância. Dessa forma, os dados de campos e da imagem podem ser comparados, considerando que suas unidades são proporcionais.

3.3.3 Correção atmosférica utilizando o método ATCOR

Para realizar a correção atmosférica utilizando o ATCOR-4, inicialmente foi necessário definir os parâmetros do sensor como, o tamanho do FOV, número de bandas e número de pixels por coluna. Etapas importantes no pré-processamento, também foram realizadas, como a escolha do tipo de filtro a ser utilizado, neste trabalho o filtro utilizado foi o Gaussiano (Figura 23), este filtro permite a correção de ruídos e distorção das imagens; e a

definição dos modelos atmosféricos e de aerossóis que foram utilizados no processamento das imagens.

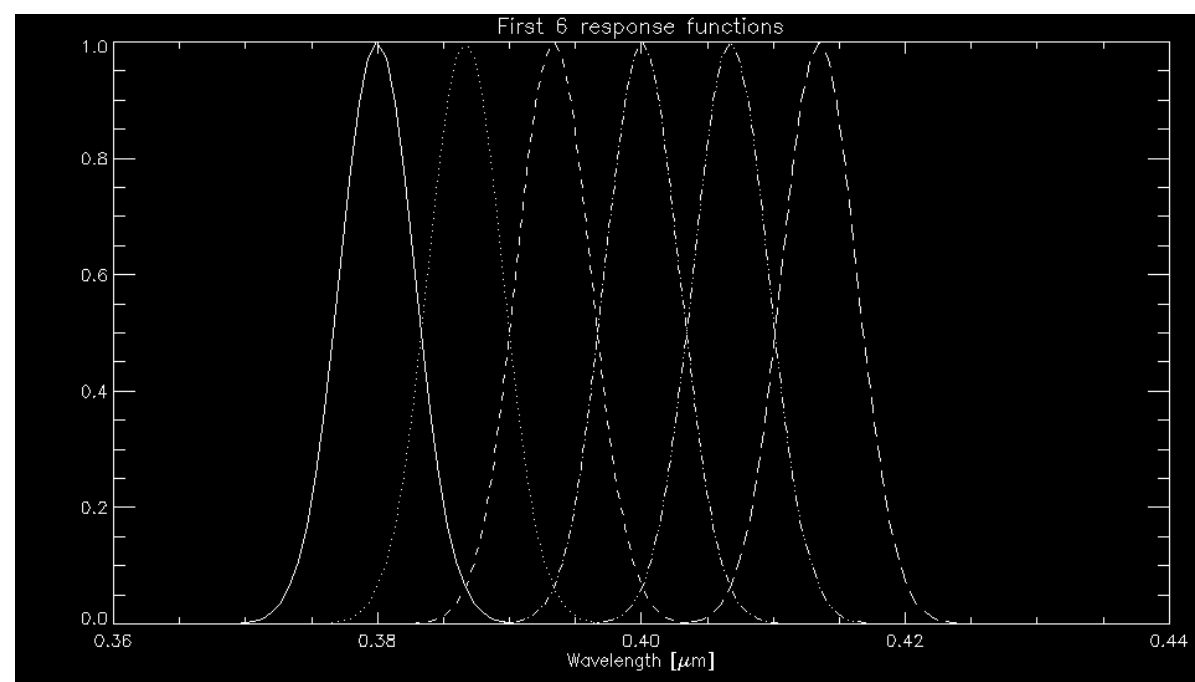


Figura 23 – Distribuição Gaussiana para a correção de ruídos e distorção das imagens.

Após a realização das etapas de pré-processamento, as imagens foram corrigidas atmosféricamente. A Tabela 5 apresenta as configurações utilizadas, na correção atmosférica nas imagens 1, 2 e 3 utilizando o ATCOR-4.

Tabela 5 - Configurações para a correção atmosférica utilizando o ATCOR4

Parâmetros	1	2	3
Data	Dia 30/04/16	Dia 01/05/16	Dia 02/05/16
Hora (UTC)	16:41	14:45	14:40
Latitude	-23,40°	-23.39°	-23,40°
Longitude	-51,94°	-51.93°	-51,94°
Visibilidade inicial (km)	18,4	25,0	18,8
Altitude do sensor (m)	1000	1000	1000
Resolução Espacial (m)	0,35	1,0	0,35
Configuração Espectral	363 bandas	363 bandas	363 bandas
Modelo Atmosférico	Condições Tropicais	Condições Tropicais	Condições Tropicais
Modelo do Aerossol	Rural	Rural	Rural
Ângulo solar zenital	43°	39,7°	40,3°
Ângulo solar azimuthal	330,8°	15°	16,7°

Parâmetros	1	2	3
Altitude do terreno (m)	600	600	600

No processo de correção atmosférica do ATCOR-4, é possível realizar a calibração radiométrica (*Inflight Calibration*) nas imagens (Figura 24), o que pode melhorar a qualidade da correção. Alvos brilhantes contidos nas imagens são ideais para a calibração. Neste trabalho utilizou-se a placa de BaSO₄, que foi disposta no campo no momento do voo, com o intuito de realizar esta calibração.

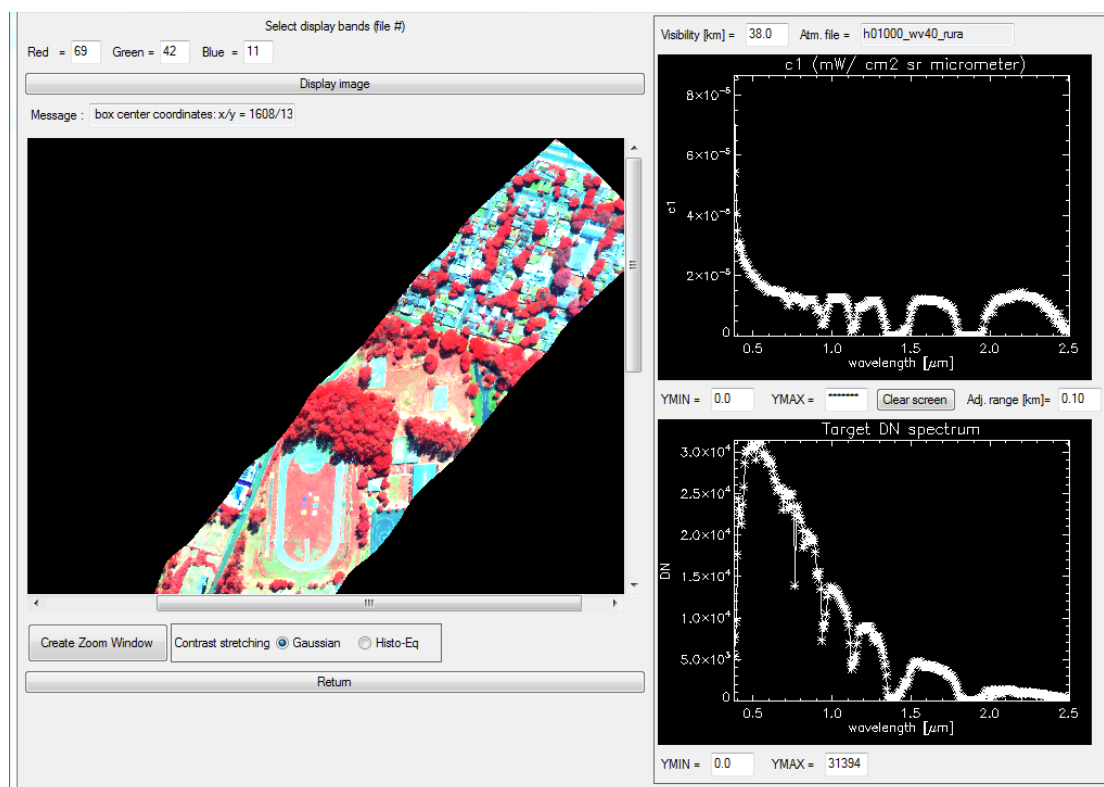


Figura 24 – Calibração Radiométrica do voo no ATCOR-4.

O vapor de água é um dos principais componentes atmosféricos que degradam a qualidade espectral das imagens. Para estimar a quantidade de vapor de água (*Water Vapor*) de forma mais adequada, realizou-se a correção atmosférica da imagem 1 do dia 30/04/2016 utilizando todas as regiões espectrais de interpolação do vapor de água. As cinco correções realizadas utilizaram as regiões espectrais de 820nm, 940nm, 940nm e 1130 nm, 1130 nm e sem nenhuma região espectral para interpolação selecionada, como apresenta a Figura 25.

Nas imagens corrigidas, com diferentes interpolações de vapor de água, foram coletadas curvas espectrais da placa de BaSO₄. Não houve mudanças significativas entre as curvas espectrais da placa de BaSO₄ com estimativas de vapor da água, nas regiões de 820nm, 940nm, 940 e 1130nm e 1130nm. Em todas as curvas espectrais houve um pico ruidoso na região de 1750nm, e a curva espectral da placa de BaSO₄ que não utilizou nenhuma banda para estimativa do vapor de água, apresentou nas regiões espectrais de 1400nm e 1900nm, ruídos estes, não encontrados nas demais curvas espectrais. Este comportamento já era esperado devido à região de 1400nm e 1900nm apresentarem forte influência de vapor de água na imagem.

Dessa forma, na estimativa do vapor de água das imagens corrigidas pelo ATCOR-4, foi utilizada a região espectral de 940nm, porém as demais regiões de estimativa, também poderiam ser utilizadas, já que apresentaram bons resultados.

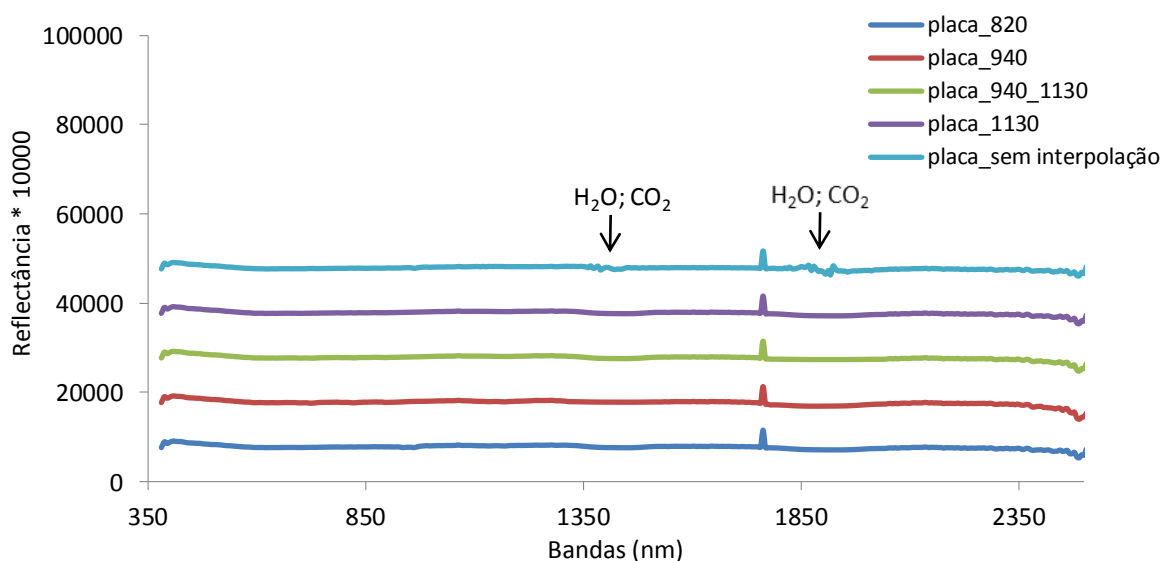


Figura 25 – Regiões espectrais de estimativa de vapor de água.

A escolha do modelo atmosférico também é uma etapa importante na estimativa da quantidade de vapor de água presente na imagem. O modelo atmosférico adotado nas correções das imagens, 1, 2 e 3, foi o de condições tropicais (Tabela 5), que contém uma estimativa de vapor de água de 3-5 g/cm². A Figura 26 apresenta, as curvas espectrais da placa de BaSO₄ coletadas a partir da imagem 1 utilizando diferentes estimativas de vapor de água, sendo 0,4 g/cm², 2,0 g/cm², 2,9 g/cm² e 4,0 g/cm². Como pode ser observado, a

assinatura espectral da placa de BaSO₄ com menores ruídos foi a 4,0_940 que tem como estimativa do vapor de água 4,0 g/cm², condizente com o modelo atmosférico selecionado anteriormente.

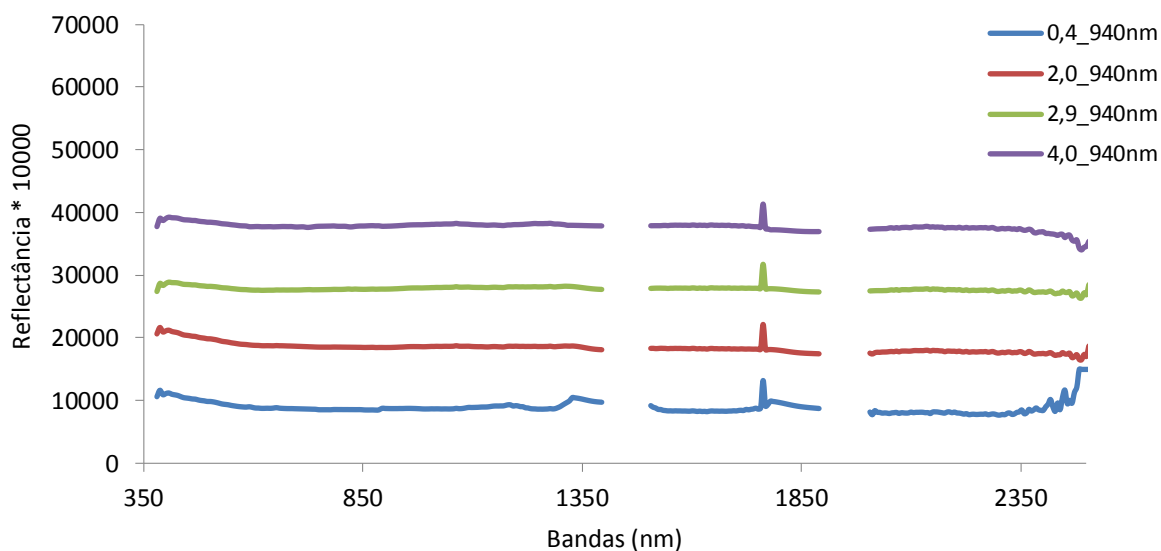


Figura 26 – Definição do modelo atmosférico através da estimativa de vapor de água.

Após a realização da correção atmosférica as imagens sofrem uma transformação em unidades de medida, passando de unidades de radiância para reflectância, uma unidade adimensional que normaliza as diferenças de iluminação e de sensores, pela razão entre o fluxo refletido e o fluxo incidente sobre a superfície (NOVO, 2010; MIYOSHI, 2016).

3.3.3 Correção atmosférica utilizando o método FLAASH

O módulo de correção atmosférica do FLAASH encontra-se dentro do *software* ENVI (<http://www.envi.com.br/index.php/modulos/acm>). As configurações utilizadas no processamento das imagens encontram-se na Tabela 6. Alguns parâmetros adotados são os mesmos utilizados no ATCOR-4, como o modelo atmosférico, modelo do aerossol e os parâmetros da imagem.

Tabela 6 - Configurações para a correção atmosférica utilizando o FLAASH

Parâmetros	1	2	3
Tipo de Sensor	AISA	AISA	AISA
Data	Dia 30/04/16	Dia 01/05/16	Dia 02/05/16
Hora (UTC)	16:41	14:45	14:40
Latitude	-23,40°	-23,39°	-23,40°
Longitude	-51,94°	-51,93°	-51,94°
Visibilidade inicial (km)	40	40	40
Altitude do sensor (m)	1000	1000	1000
Resolução Espacial (m)	0,35	1,0	0,35
Modelo Atmosférico	Tropical	Tropical	Tropical
Modelo do Aerossol	Rural	Rural	Rural
Altitude do terreno (m)	600	600	600

O FLAASH permite que se determinem algumas configurações avançadas se for da necessidade do usuário. No entanto, neste trabalho todas as configurações avançadas foram as inseridas pelo próprio FLAASH de maneira padrão (*Default*).

3.3.5 Correção atmosférica utilizando o método de Linha Empírica

A correção atmosférica utilizando o método Linha Empírica foi realizada no *software* ENVI (ENVI, 2012). A correção atmosférica das imagens 1, 2 e 3, foi realizada de duas maneiras distintas: na primeira utilizou-se um alvo escuro e um claro, sendo o alvo claro a placa de BaSO₄ e o alvo escuro o asfalto presente na imagem; e o segundo método além destes dois alvos utilizou-se também as lonas dispostas no campo, com o intuito de analisar as diferenças entre os dois processamentos e se as lonas melhorariam a qualidade da correção atmosférica.

Em cada imagem foram coletadas as curvas espectrais (em unidades de radiância) de cada alvo utilizado nos processos de correção. Foram realizadas três repetições na coleta da curva espectral de cada alvo. Totalizando, para o método sem lonas: 2 alvos coletados com três repetições, portanto, neste método foram utilizadas 6 curvas espectrais, e para o método com lonas foram 8 alvos coletados com três repetições, totalizando 24 curvas espectrais.

Para cada alvo utilizou-se a média de pixels nas imagens. Foi realizada a média com valores de radiância de 8 pixels vizinhos, com finalidade de diminuir possíveis ruídos presentes nas imagens.

Para o estabelecimento de um referencial de cada alvo, na coleta de campo foi utilizado o espectrorradiômetro FieldSpec-3 com sensor ASD que opera nas regiões do visível e infravermelho de 350nm a 2500nm. Foram coletadas no campo, as curvas espectrais de cada alvo utilizado nos processos de correção atmosférica. Foram realizadas três repetições, em cada alvo no campo, assim como na imagem, todas as curvas espectrais coletadas no campo foram utilizadas no processo de correção das imagens.

O método Linha Empírica associa os valores de radiância da imagem com os valores de reflectância coletados no campo dos mesmos alvos. Dessa forma, no *software* ENVI, cada coleta da imagem foi relacionada com uma coleta de campo, gerando desse modo, a equação que transforma as imagens em reflectância, eliminando também os efeitos atmosféricos.

3.3.6 Correção atmosférica utilizando o método QUAC

O processo de correção atmosférica nas três imagens também foi realizado utilizando o método QUAC no *software* ENVI (ENVI, 2012).

Como o QUAC realiza a correção atmosférica a partir de modelos empíricos, utilizando somente as informações contidas na imagem, sem a necessidade de informações auxiliares, o processamento torna-se mais rápido, em relação a outros métodos de correção, como o ATCOR e o FLAASH. O único parâmetro a ser selecionado no processamento é o tipo de sensor utilizado (QUAC e FLAASH, 2009).

3.3.7 Área teste

A imagem 4 (teste) foi corrigida utilizando os arquivos de calibração gerados a partir dos processamentos da imagem 2 do mesmo dia de voo, como apresenta a Figura 27.

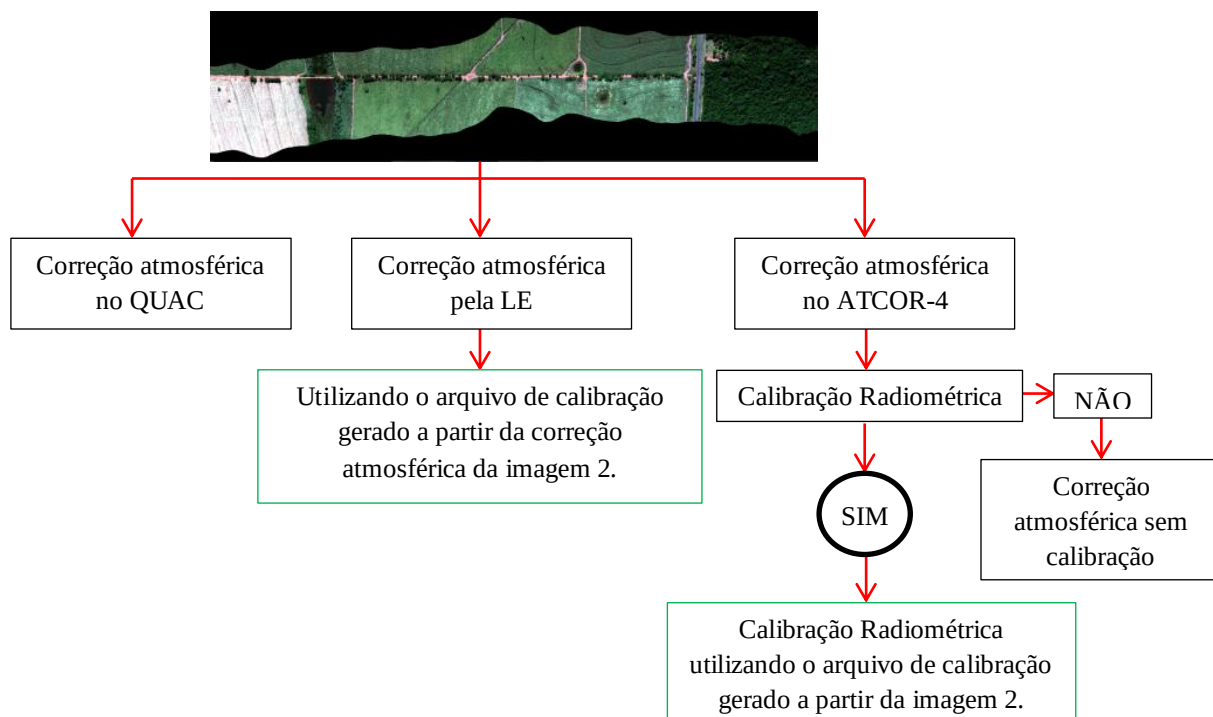


Figura 27 – Esquema das etapas de correção da imagem 4.

No processo de correção atmosférica do ATCOR-4, há a opção de realização da calibração radiométrica, com o intuito de melhorar a qualidade das correções. A imagem 2 foi submetida a essa correção e, a partir dela, gerou-se um arquivo de calibração que foi utilizado no processamento da imagem 4.

O método Linha Empírica também gera um arquivo de calibração contendo os parâmetros calculados através de uma regressão linear para eliminar os efeitos atmosféricos. Este arquivo pode ser utilizado para o processamento de outras imagens (ENVI, 2012). Quando na imagem não há alvos de referência para a calibração, a utilização de um arquivo externo de calibração torna-se uma vantagem, porém os parâmetros atmosféricos podem sofrer muitas variações entre duas imagens distintas.

A imagem 4 foi corrigida primeiramente com o ATCOR-4 utilizando o arquivo de calibração da imagem 2. O segundo método de correção também utiliza o ATCOR-4, mas sem realizar a etapa de calibração radiométrica. No terceiro método de correção utiliza-se o método Linha Empírica, utilizando o arquivo de calibração gerado a partir da imagem 2, processada no método Linha Empírica com lonas.

Por fim, A imagem 4 foi processada no QUAC, para ser comparada com os processamentos anteriores, já que neste método não inserimos nenhum parâmetro externo. Dessa forma, a imagem 4 foi processada das seguintes formas:

- No ATCOR-4, utilizando o arquivo de calibração da imagem 2;
- No ATCOR-4, sem a realização da correção radiométrica;
- No método Linha Empírica, utilizando o arquivo de calibração da imagem 2 gerado a partir do método Linha Empírica com lonas e;
- No QUAC.

A Tabela 7 apresenta as configurações adotadas no ATCOR-4 para a imagem 4.

Tabela 7 - Configurações para a correção atmosférica utilizando o ATCOR4 na imagem 4

Parâmetros	4
Data	Dia 01/05/16
Hora (UTC)	16:05
Latitude	-22,62°
Longitude	-52,86°
Visibilidade Inicial (km)	25,0
Altitude do sensor (m)	1000
Resolução Espacial (m)	0,35
Configuração Espectral	363 bandas
Modelo Atmosférico	Condições Tropicais
Modelo do Aerossol	Rural
Ângulo solar zenital	35,9°
Ângulo solar azimutal	345,4°
Altitude do terreno (m)	300

3.3.8 Avaliação dos resultados

Após a correção atmosférica realizada nas imagens 1, 2 e 3, foram coletadas em todas as imagens corrigidas, a média das curvas espectrais de cada lona dispostas no campo e da placa de BaSO₄. A aquisição das curvas espectrais foi realizada no *software* ENVI pelo algoritmo de leitura de pixel. A partir da seleção de uma região de interesse em cada lona e na

placa de BaSO₄, como mostra a Figura 28, foi gerada a média de valores de reflectância para cada banda da curva espectral dos alvos selecionados.



Figura 28 – Seleção de pixels para geração da média espectral de cada alvo.

Após os processos de correção atmosférica da imagem 4, foram selecionadas, nas imagens corrigidas, as curvas espectrais das espécies arbóreas Ipê Roxo (*Handroanthus impetiginosus*) e a Mangueira (*Mangifera indica*). Para cada imagem e espécie, foram selecionados três pixels e realizada a média entre os pixels vizinhos, gerando assim, a curva espectral de cada espécie, obtidas a partir das imagens corrigidas por diferentes métodos.

As respostas espectrais das lonas, da placa de BaSO₄ e das espécies arbóreas também foram coletadas no campo com o espectrorradiômetro, como citado anteriormente na seção (3.2.3).

Os valores de reflectância de todos os alvos, coletados com o espectrorradiômetro, tiveram que ser reamostrados para o número de bandas contidas nas imagens, já que o número de bandas das curvas espectrais coletas com o espectrorradiômetro são superiores aos das imagens. As curvas espectrais adquiridas com o espectrorradiômetro continham 2113 bandas e passaram a ter 325 bandas, assim como, na imagem. A reamostragem foi realizada no Microsoft Excel, relacionando as bandas da imagem com as bandas mais próximas encontradas na curva espectral do espectrorradiômetro, dessa maneira, foi possível relacionar a resposta espectral dos dois sensores numa mesma região espectral.

Após as coletas das assinaturas espectrais das lonas, placa de BaSO₄ e das espécies arbóreas em todas as imagens corrigidas e no campo, foram analisados e comparados os métodos de correção atmosférica através de estatísticas descritivas, como o coeficiente de correlação de Pearson e coeficiente de determinação, além do teste de significância, t de *Student* para análise da correlação. Desta forma, foi possível verificar qual método de correção aproximou-se mais das assinaturas espectrais obtidas no campo, com um alto grau de confiabilidade.

Para a comparação entre diferentes imagens, corrigidas pelo mesmo método, foi realizado o teste de comparação de médias Scott-Knott (SCOTT e KNOTT et. al., 1974). Para a análise foram escolhidas as lonas que apresentaram as melhores correlações. O teste de comparação de médias foi realizado utilizando cinco repetições.

Outras técnicas foram empregadas para a análise de semelhanças espectrais entre espectros de referência e de testes, como o índice SAM que determina o grau de similaridade entre espectros de referência (ASD) e os espectros de teste (imagem) por meio de um ângulo médio (θ), como mostra a equação a seguir (KRUSE et. al., 1993; KAWISHWAR, 2007; VAN DER MEER et. al., 2004):

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{\sum_{i=1}^{nb} t_i r_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^{nb} t_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{nb} r_i^2}} \right) \quad (3)$$

Onde:

nb é o número de bandas;

t representa os espectros da imagem e;

r representa os espectros de referência.

O resultado gerado pelo SAM é uma diferença angular (α) medida em radianos e variando de 0 a $\pi/2$. Pequenos valores de ângulo espectral correspondem à alta similaridade entre os espectros da imagem e os espectros do sensor ASD, consequentemente, os valores de ângulos maiores correspondem a menor similaridade entre os espectros (KRUSE et. al., 1993; KAWISHWAR, 2007; VAN DER MEER et. al., 2004). A Figura 29 apresenta o ângulo formado entre os espectros de referencia e teste.

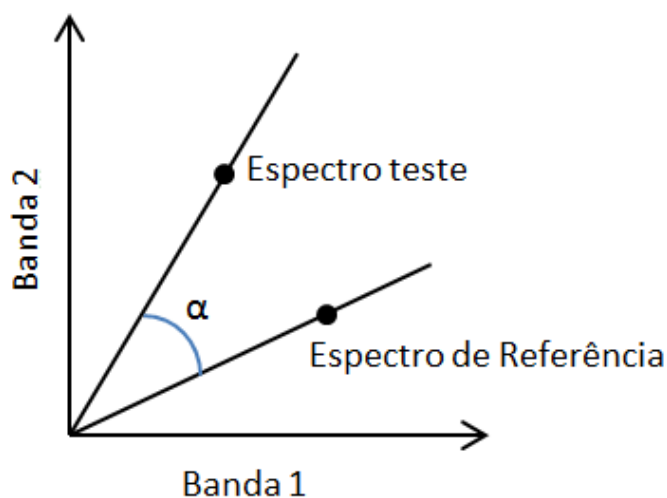


Figura 29 – Espectro de referência e Espectro teste para uma imagem de duas bandas. Os vetores conectam a origem (sem iluminação) aos pontos que representam os espectros reais.

Fonte: Adaptado de Kruse et. al., 1993.

A segunda técnica empregada foi o índice ASDS (Média da soma dos desvios ao quadrado), proposto por Ben dor et. al. (2004), que visa analisar o desempenho da correção atmosférica nas imagens comparando-as com os dados de campo (ASD), sendo calculado da seguinte forma:

$$ASDS = \frac{\sum(Rrn-1)^2}{n} \quad (4)$$

Onde:

$$Rrn = \frac{Rtn}{Rtrn} \quad (5)$$

Sendo:

Rtn a reflectância pontual na imagem;

Rtrn a reflectância medida no campo com o sensor ASD;

n o número de bandas espectrais.

Quanto menor os valores do índice ASDS melhor o desempenho das correções nas imagens (BROOK e BEN DOR et. al., 2011).

O coeficiente de correlação de Pearson, o coeficiente de determinação e o teste de hipótese t de *Student* foram gerados no *software* livre R (<https://www.r-project.org/>). Já o teste de comparação de médias Scott-Knott foi gerado no *software* livre Assistat (<http://www.assistat.com/indexp.html>). Os índices SAM e ASDS foram gerados no Microsoft Excel para todos os alvos analisados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CORREÇÃO ATMOSFÉRICA UTILIZANDO O ATCOR-4

As imagens 1, 2 e 3 coletadas com o sensor AisaFENIX foram submetidas a correções atmosféricas utilizando o ATCOR-4. Em todas as assinaturas espectrais adquiridas a partir das imagens corrigidas foram excluídos os fatores de reflectância nas regiões espectrais de 1400nm (de 1350nm a 1500nm) e 1900nm (de 1850nm a 2000nm), devido à grande influência do vapor de água nestas regiões (GAO et. al., 1993).

A Figura 30 apresenta as assinaturas espectrais de cada lona e da placa de BaSO₄ da imagem 1. Em cada gráfico há duas assinaturas espectrais de cada alvo, uma obtida através da imagem corrigida e outra coletada no campo com o sensor ASD.

Observa-se que após as correções da imagem 1 há a presença de ruídos na região de 1840nm, que não foi corrigido adequadamente, mas que não influenciou na qualidade da assinatura espectral ao longo do espectro. Na Figura 30 as assinaturas espectrais das lonas adquiridas através da imagem e do campo tiveram comportamentos semelhantes, assim como a da placa de BaSO₄.

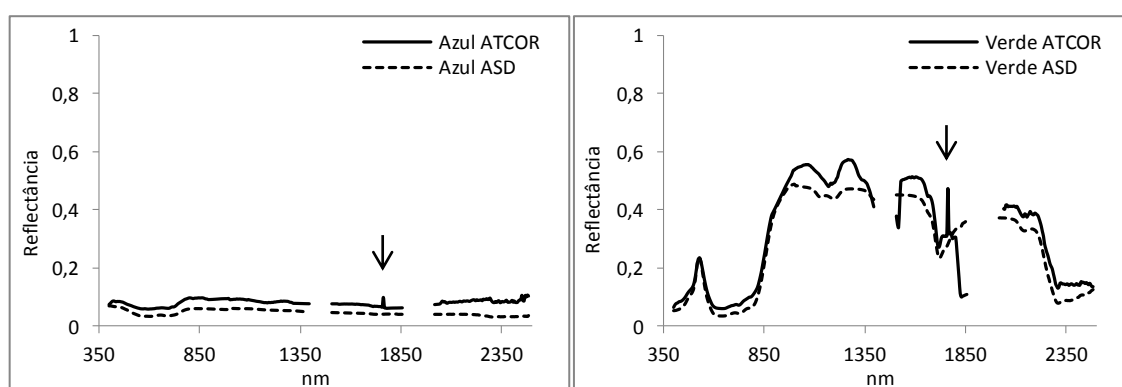


Figura 30 - Comparação entre as assinaturas espectrais geradas a partir da imagem 1 corrigida pelo ATCOR-4 e as geradas pelo espectrorradiômetro FieldSpec-3.

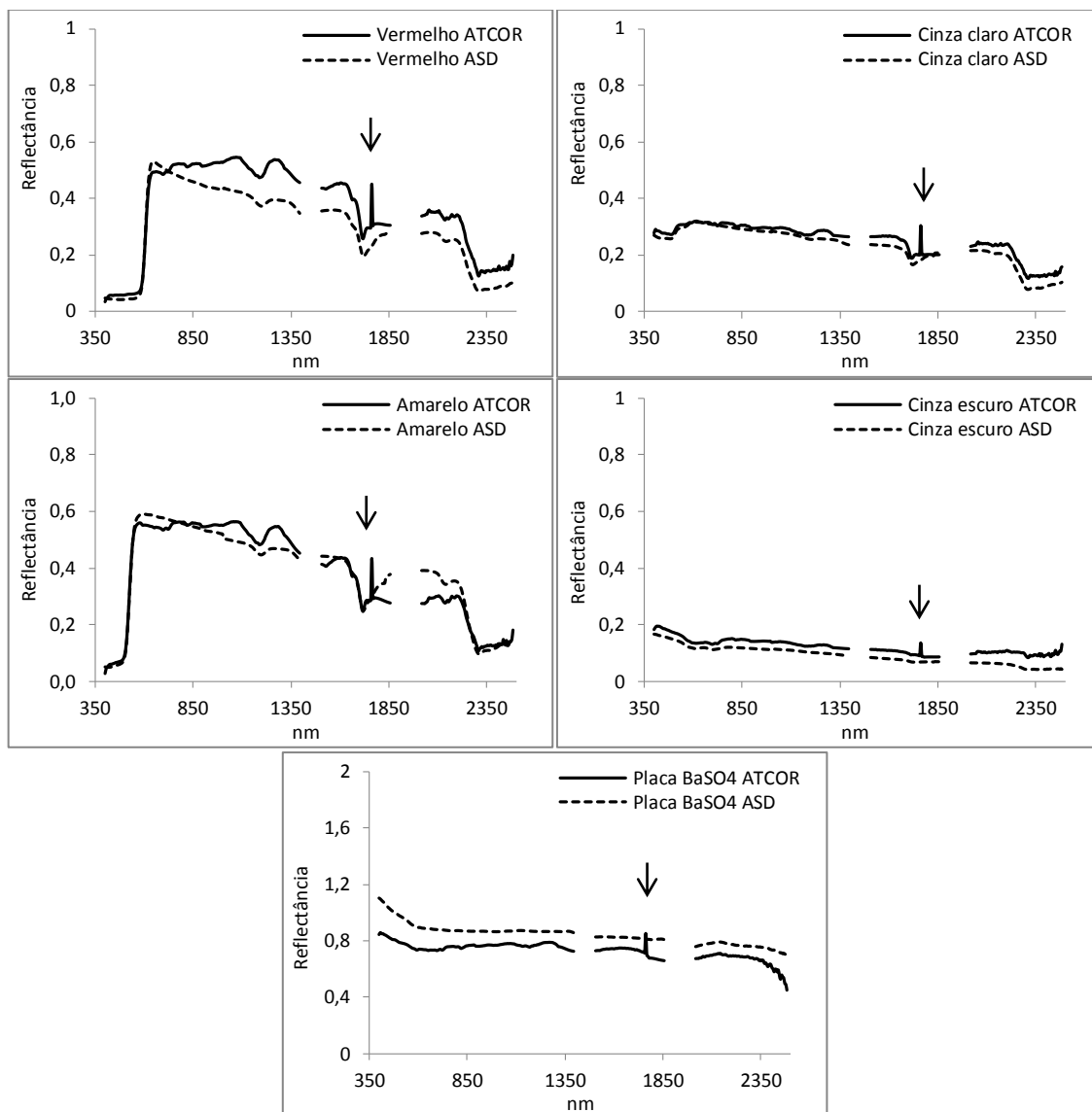


Figura 30 – Continuação.

A Figura 31 apresenta as assinaturas espectrais obtidas a partir da imagem 2 corrigida com o ATCOR-4 e as assinaturas espectrais coletadas no campo com o espectrorradiômetro. As curvas espectrais coletadas a partir da imagem não mantiveram as mesmas características espectrais das coletas com o sensor ASD, pois as curvas demonstraram magnitudes diferentes ao longo do espectro, esta diferença pode ser vista principalmente nas lonas vermelha e amarela nas regiões entre 350nm e 850nm, onde a resposta espectral das curvas obtidas a partir das imagens tiveram valores superiores a 1, o que pode ser devido a angulação do sensor no momento da tomada das imagens.

Os ruídos encontrados na Figura 30, na região de 1840nm, ocorreram novamente nas assinaturas espectrais adquiridas através da imagem na Figura 31, na mesma região, mas em menores proporções.

As assinaturas espectrais que mantiveram características muito semelhantes aos espectros de referência na Figura 31, foram as das lonas verde, vermelha e amarela, apesar da superestimação das assinaturas espectrais da imagem em relação aos dados de campo. As lonas azul, cinza claro, cinza escuro e a placa de BaSO₄ entre as regiões de 350nm e 850nm tiveram respostas espectrais diferentes dos espectros de referência.

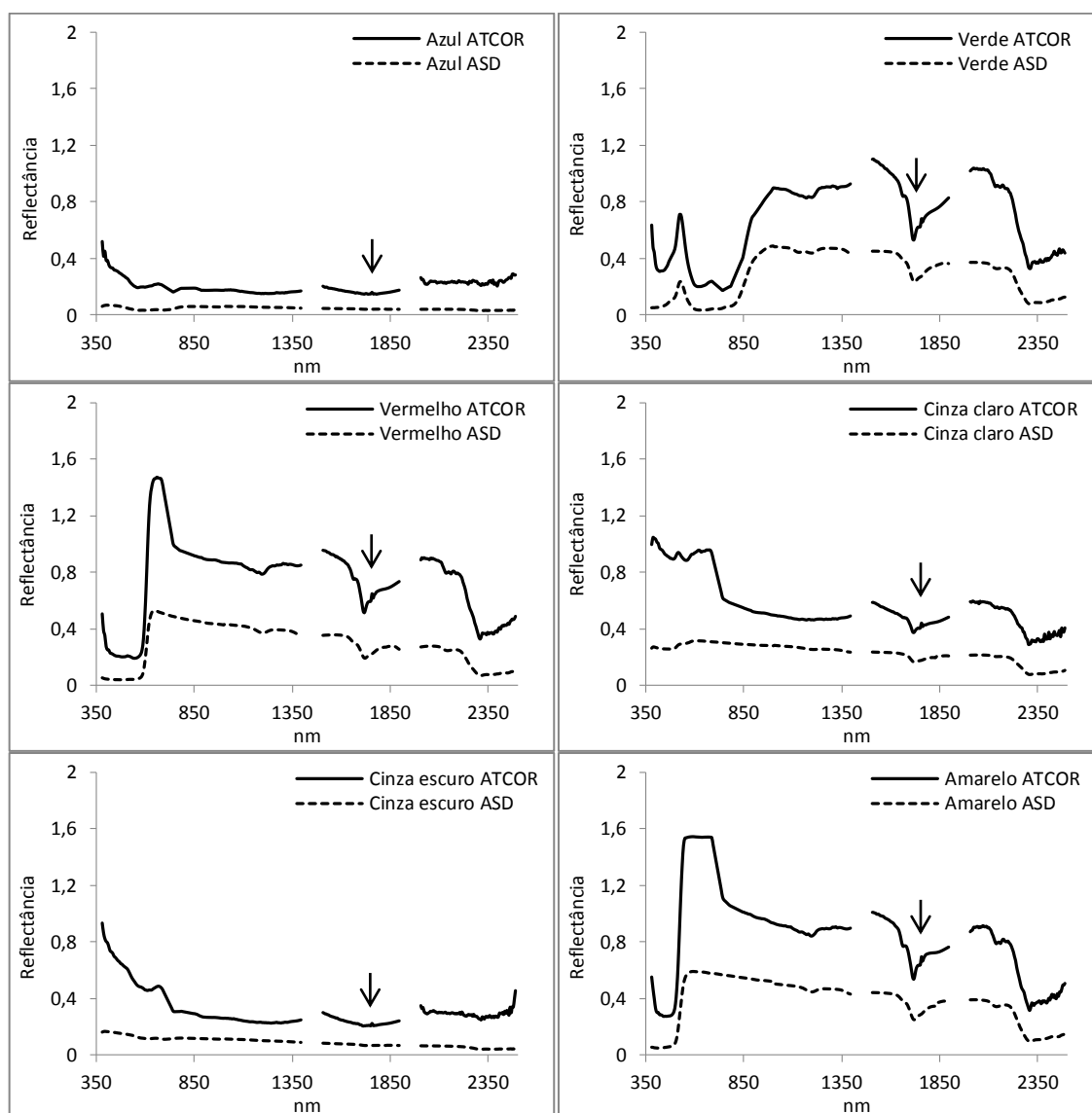


Figura 31 - Comparação entre as assinaturas espectrais geradas a partir da imagem 2 corrigida pelo ATCOR-4 e as geradas pelo espectrorradiômetro FieldSpec-3.

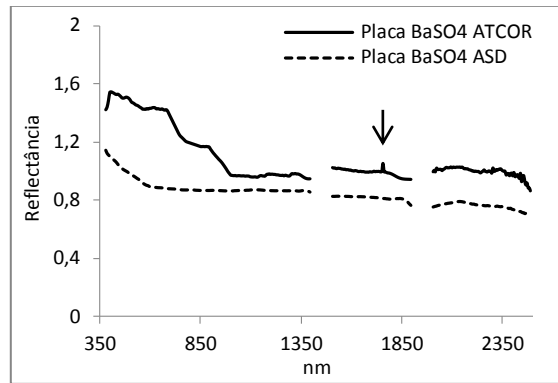


Figura 31 – Continuação.

A Figura 32 apresenta as assinaturas espectrais adquiridas a partir da imagem 3 corrigida utilizando o ATCOR-4 e as assinaturas espectrais coletas no campo com o espectrorradiômetro. As curvas espectrais obtidas a partir da imagem mantiveram as mesmas características espectrais das coletas com o sensor ASD, mostrando que a correção atmosférica foi eficaz na eliminação de possíveis ruídos em todos os alvos.

Os ruídos encontrados nas assinaturas espectrais das imagens 1 e 2 não ocorreram nas curvas espectrais coletadas a partir da imagem 3. Além disso, as melhores assinaturas espectrais adquiridas a partir das imagens são apresentadas na Figura 32, onde as assinaturas espectrais da imagem e do campo mostram grande similaridade entre os dados.

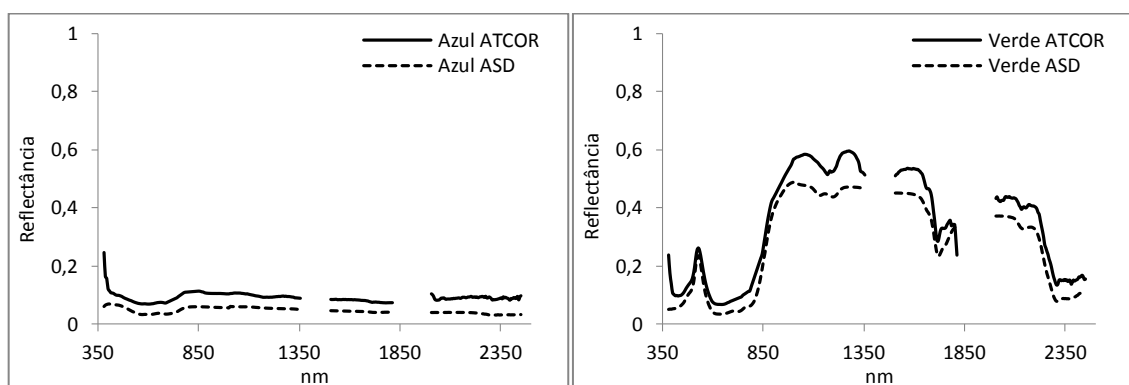


Figura 32 - Comparação entre as assinaturas espectrais geradas a partir da imagem 3 corrigida pelo ATCOR-4 e as geradas pelo espectrorradiômetro FieldSpec-3.

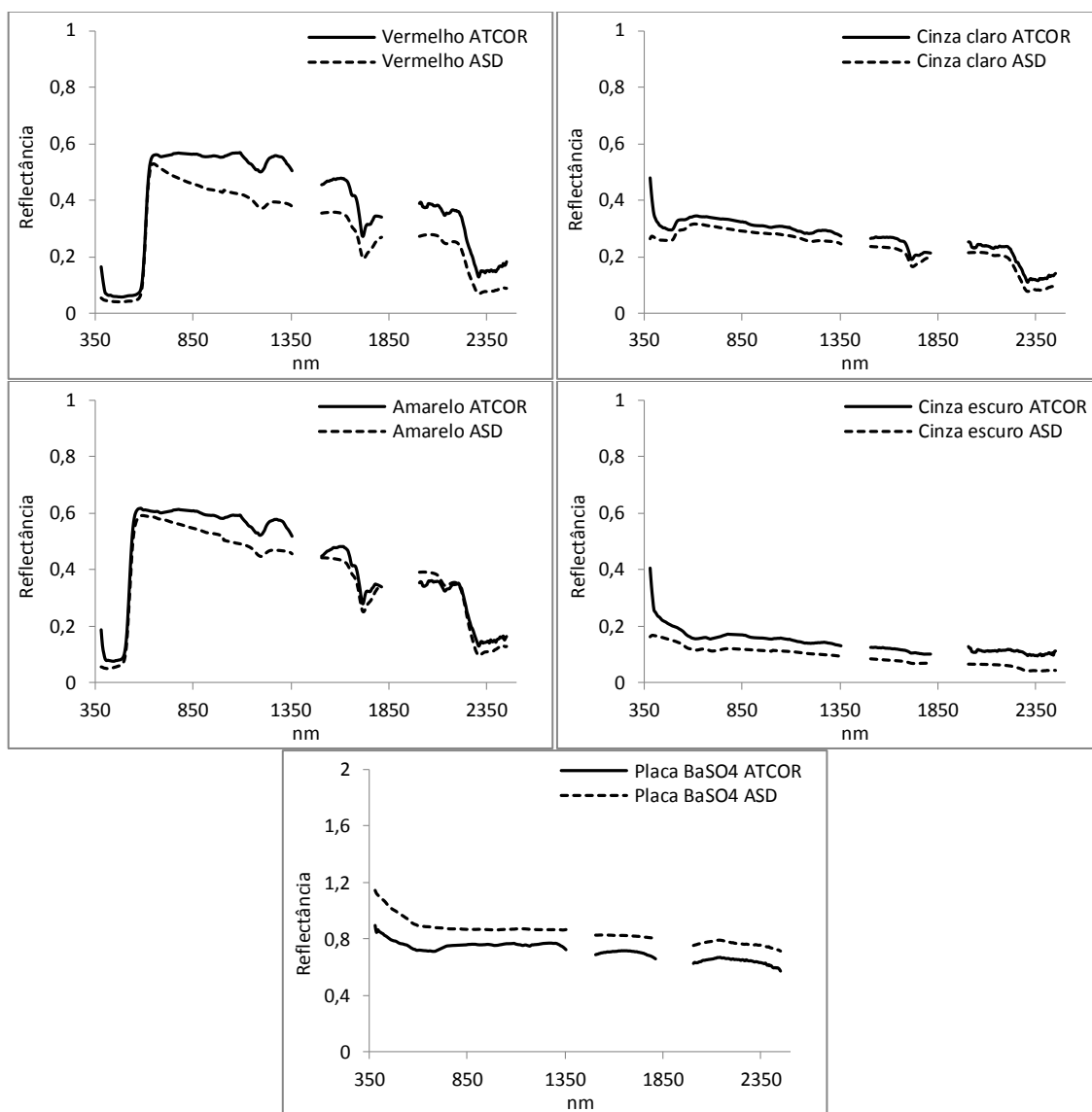


Figura 32 – Continuação.

O ATCOR-4 durante o processo de correção atmosférica realiza uma estimativa média da coluna de vapor de água contida na cena. Na imagem 1 a estimativa do vapor de água foi de 1,63cm, na imagem 2 foi de 2,34cm e na imagem 3 a estimativa foi de 1,47cm. O vapor de água é um dos principais constituintes atmosféricos que podem provocar a diminuição da qualidade espectral das imagens. Essa relação entre a estimativa do vapor de água e a qualidade espectral das imagens demonstra que a imagem 3 (Figura 32), com menor média de vapor de água foi a que apresentou as melhores assinaturas espectrais dos alvos.

Os maiores valores de estimativa do vapor de água nas imagens 1 e 2 podem ser indicativos dos maiores ruídos encontrados na Figura 30 e Figura 31 em relação a Figura 32,

além das maiores diferenças de amplitudes em relação as curvas da imagem e do ASD na imagem 2 (Figura 31).

Os coeficientes de correlação de Pearson, coeficientes de determinação e os testes de hipótese das imagens 1, 2 e 3 corrigidas com o ATCOR-4, são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Resultados do coeficiente de correlação de Pearson, coeficiente de determinação e teste de hipótese das imagens 1, 2 e 3.

ALVOS	R		R ²		Teste t	
1	VIS	NIR/SWIR	VIS	NIR/SWIR	VIS	NIR/SWIR
Lona Azul	0,960	0,197	0,922	0,039	23,328*	3,338*
Lona Verde	0,961	0,842	0,924	0,709	23,635*	25,899*
Lona Vermelha	0,983	0,975	0,966	0,952	36,139*	73,511*
Lona Cinza Claro	0,974	0,973	0,948	0,947	29,054*	70,331*
Lona Cinza Escuro	0,992	0,816	0,985	0,666	54,691*	23,419*
Lona Amarela	0,985	0,944	0,970	0,892	38,865*	47,640*
Placa de BaSO ₄	0,906	0,886	0,820	0,784	14,480*	31,628*
2	VIS	NIR/SWIR	VIS	NIR/SWIR	VIS	NIR/SWIR
Lona Azul	0,882	-0,451	0,778	0,203	12,692*	-8,378*
Lona Verde	0,884	0,899	0,781	0,808	12,804*	34,034*
Lona Vermelha	0,995	0,886	0,990	0,785	66,389*	31,657*
Lona Cinza Claro	-0,139	0,712	0,019	0,507	-0,952 ^{NS}	16,830*
Lona Cinza Escuro	0,945	-0,013	0,894	0,0001	19,682*	-0,211 ^{NS}
Lona Amarela	0,994	0,942	0,989	0,888	63,022*	46,587*
Placa de BaSO ₄	0,771	0,576	0,595	0,332	8,214*	11,684*
3	VIS	NIR/SWIR	VIS	NIR/SWIR	VIS	NIR/SWIR
Lona Azul	0,663	0,560	0,440	0,314	6,011*	12,116*
Lona Verde	0,892	0,898	0,795	0,806	13,352*	36,463*
Lona Vermelha	0,997	0,987	0,994	0,975	84,156*	112,130*
Lona Cinza Claro	0,278	0,989	0,077	0,979	1,965 ^{NS}	121,345*
Lona Cinza Escuro	0,813	0,932	0,661	0,868	9,467*	45,938*
Lona Amarela	0,997	0,968	0,995	0,936	91,872*	68,661*
Placa de BaSO ₄	0,996	0,955	0,991	0,913	71,683*	57,930*

* Correlação considerada significativa através do Teste t com $p > 0,005$.

NS - Correlação não significativa através do Teste t com $p > 0,005$.

Os coeficientes de correlação e os coeficientes de determinação da imagem 1 na região do visível foram superiores a 0,90 mostrando alta correção entre as assinaturas espectrais. A correlação mais alta encontrada foi para a lona cinza escuro com 0,99 e a menor foi para a placa de BaSO₄ com 0,90. Na região do infravermelho as correlações diminuíram

em relação ao visível, principalmente a lona azul, que apresentou 0,197. Já para as demais lonas as correlações foram mais altas, principalmente para a lona vermelha com 0,975 de correlação.

Na imagem 2, as mais altas correlações encontradas na região do visível foram para as lonas vermelha e amarela com 0,995 e 0,994 respectivamente e a menor foi para a lona cinza claro com correlação negativa igual a -0,139. Na região do infravermelho algumas correlações foram negativas como as das lonas azul e cinza escuro com correlações iguais a -0,451 e -0,013 respectivamente. Já a correlação mais alta encontrada na região do infravermelho foi a da lona amarela com 0,942.

Na imagem 3 as maiores correlações na região do visível foram as das lonas vermelha e amarela com correlações iguais a 0,99. A menor correlação foi a da lona cinza claro com 0,27. Na região do infravermelho as maiores correlações foram para as lonas vermelha e cinza claro com correlações iguais a 0,98, já a menor correlação nesta região foi a da lona azul com 0,56.

Nas três imagens as lonas vermelha, amarela, verde e cinza escuro apresentaram resultados semelhantes na região do visível e do infravermelho. A lona azul apresentou nas três imagens correlação alta na região do visível e mais baixa na região do infravermelho. A lona cinza claro na imagem 1 apresentou altas correlações nas regiões do visível e infravermelho, porém nas imagens 2 e 3 as correlações foram baixas na região do visível e mais altas na região do infravermelho.

O teste de significância da correção (R) com um nível de confiança de 95% mostrou que as correlações foram significativas na maioria dos alvos, considerando as três imagens 1, 2 e 3, exceto a lona cinza claro que não apresentou correlação significativa na região do visível nas imagens 2 e 3, e a lona cinza escuro que não apresentou correlação significativa na região do infravermelho na imagem 2.

Os resultados da correção atmosférica das imagens 1, 2 e 3 utilizando o ATCOR-4 foram satisfatórios, assim como, outros autores também apresentam resultados satisfatórios na utilização do ATCOR-4 na correção de imagens hiperespectrais. Como Markelin et.al. (2016) que realizou estudos recentes utilizando imagens hiperespectrais do sensor AisaFENIX em combinação com o ATCOR-4 para análise da qualidade da água. Os resultados foram considerados satisfatórios, considerando que o ATCOR-4 não foi projetado para realizar

correções atmosféricas em superfícies com água; e Ben dor et. al. (2005) que avaliou seis algoritmos ACORN, ATREM, ATCOR-4, CAM5S (*Canadian Advanced Modified 5S*) O'Neill et. al., (1996) , FLAASH e HATCH para a correção atmosférica de dados AVIRIS. Os algoritmos ACORN e ATCOR-4 forneceram resultados mais confiáveis e realistas. O FLAASH forneceu os piores resultados na correção.

Estudos como o de Lenot et. al. (2009) que desenvolveu um novo algoritmo, denominado SIERRA, utilizando a Função de Distribuição da Reflectância Bidirecional (FDRB) e comparou com algoritmos que utilizam uma aproximação viável da FDRB, sendo um desses algoritmos o ATCOR-4, demonstrou que apesar da aproximação, o ATCOR-4 apresentou resultados muito semelhantes ao SIERRA em imagens adquiridas pelo sensor HyMap. Dessa forma, o ATCOR-4 demonstra ser um algoritmo eficaz na correção atmosférica de imagens hiperespectrais.

4.2 CORREÇÃO ATMOSFÉRICA UTILIZANDO O FLAASH

As imagens 1, 2 e 3 coletadas com o sensor AisaFENIX foram submetidas a correções atmosféricas utilizando o FLAASH, assim como na seção (4.1) utilizando o algoritmo ATCOR-4.

A Figura 33, Figura 34 e Figura 35 apresentam as curvas espectrais coletadas a partir das imagens 1, 2, 3, respectivamente, corrigidas com o FLAASH e as curvas espectrais coletadas no campo com o sensor ASD.

Todas as curvas espectrais, das três imagens corrigidas, apresentam feições ruidosas em diferentes comprimentos de onda, notadamente aqueles referentes a pontos de absorção atmosférica decorrentes da presença de vapor de água, gases e aerossóis. As curvas espectrais adquiridas a partir das três imagens corrigidas pelo FLAASH tiveram o mesmo comportamento espectral em todos os alvos, onde não foram geradas as feições características das lonas e a da placa de BaSO₄.

Tal fato deve-se, provavelmente, ao modelo matemático adotado pelo FLAASH que não realiza correções atmosféricas tão robustas como no ATCOR-4, onde são definidos anteriormente ao processamento das imagens os parâmetros do sensor utilizado, filtros e aerossóis.

Feições nas curvas espectrais das lonas e da placa de BaSO₄, entre as regiões de 350nm a 850nm foram minimizadas em relação as curvas espectrais do espectrorradiômetro.

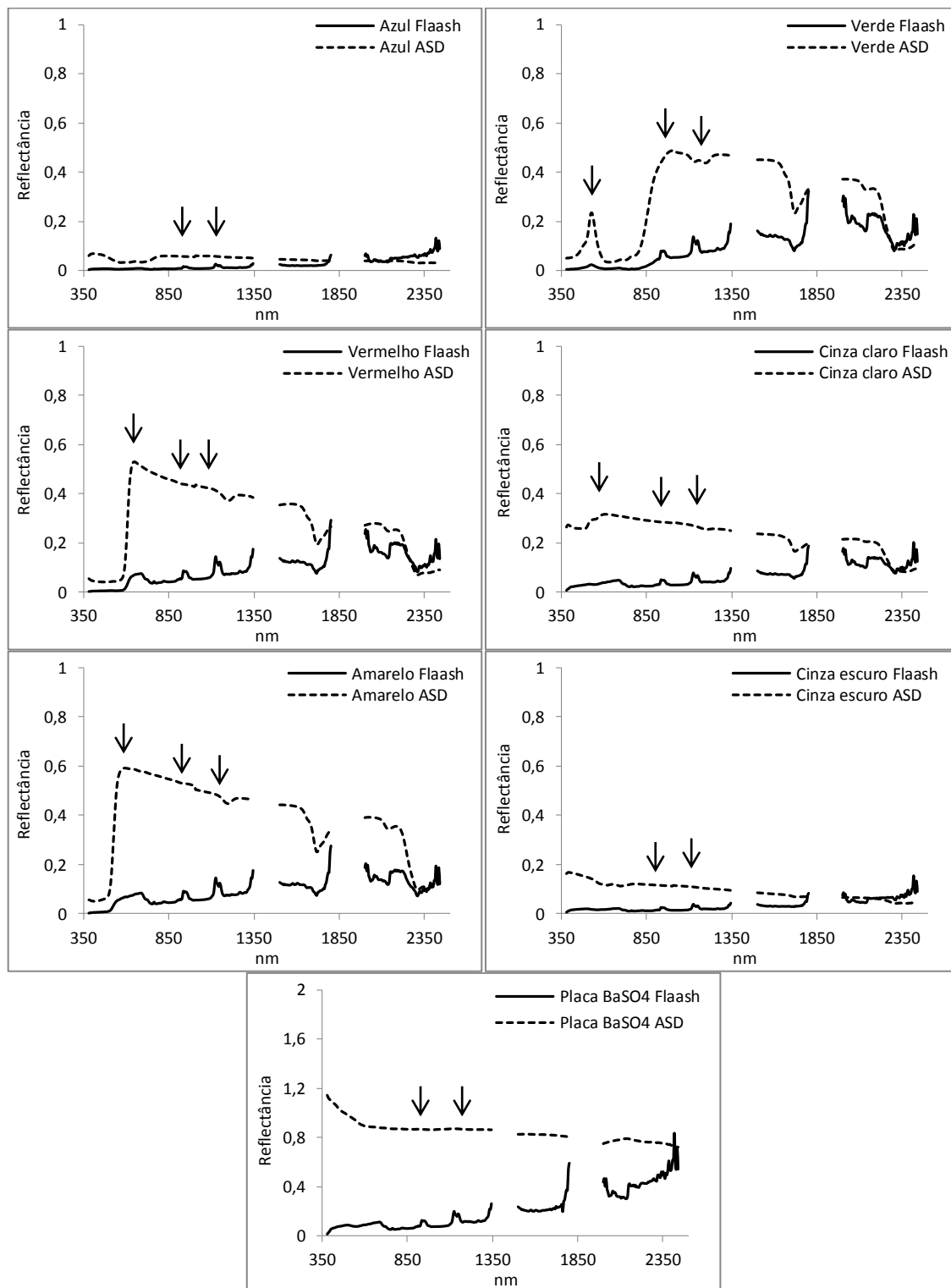


Figura 33 - Comparação entre as assinaturas espectrais geradas a partir da imagem 1 corrigida pelo FLAASH e as geradas pelo espectrorradiômetro FieldSpec-3.

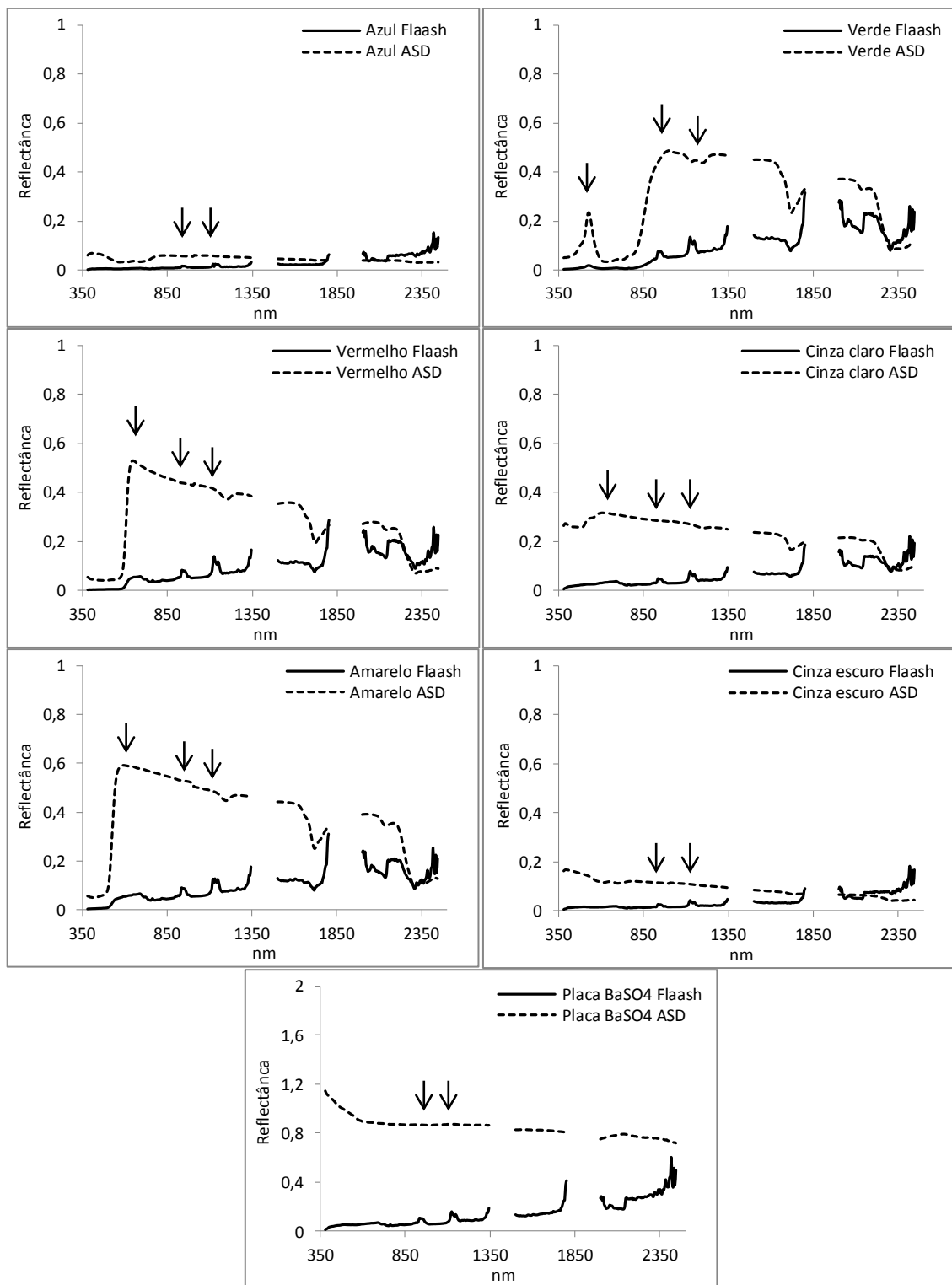


Figura 34 - Comparação entre as assinaturas espectrais geradas a partir da imagem 2 corrigida pelo FLAASH e as geradas pelo espectrorradiômetro FieldSpec-3.

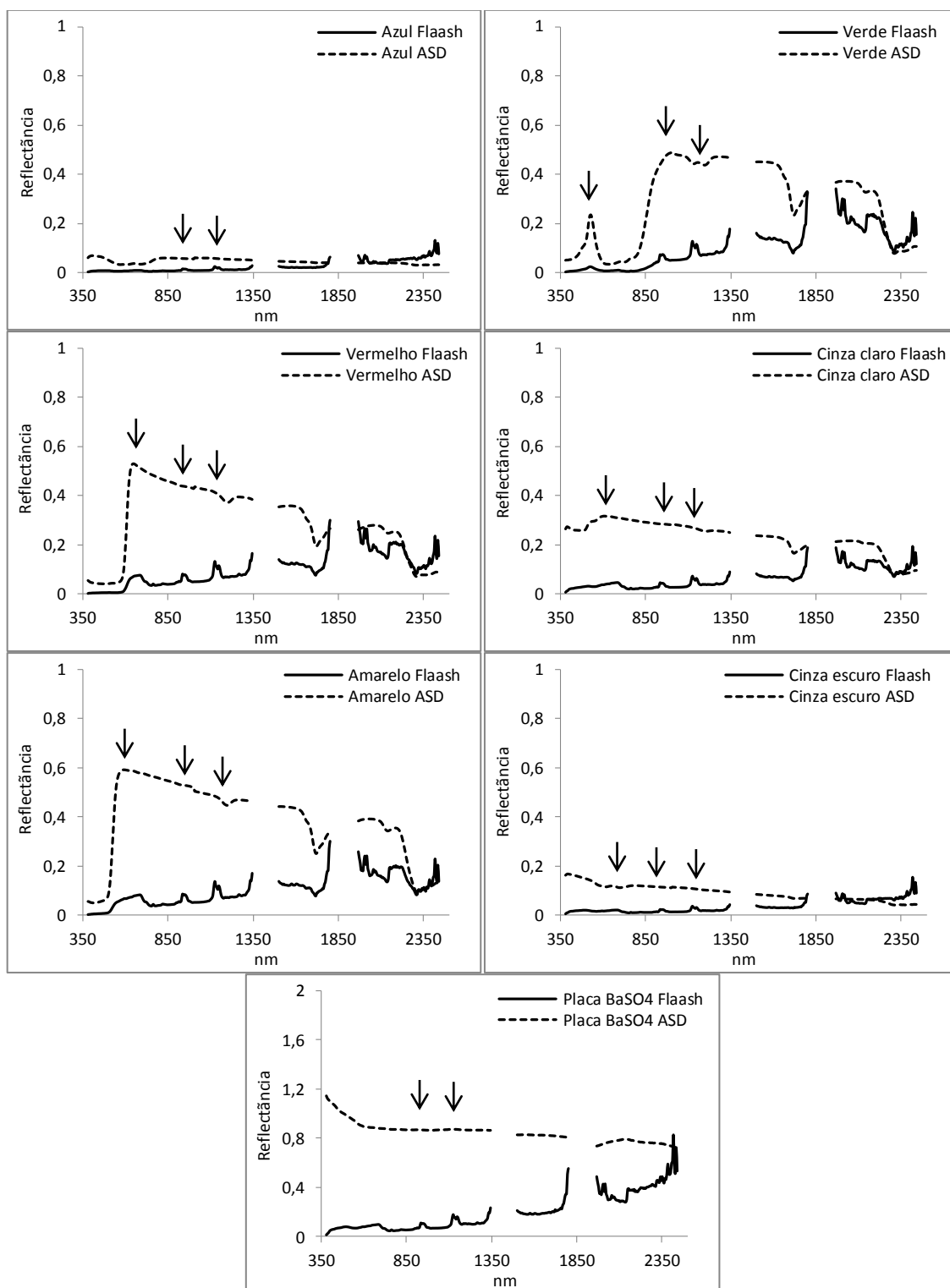


Figura 35 - Comparação entre as assinaturas espectrais geradas a partir da imagem 3 corrigida pelo FLAASH e as geradas pelo espectrorradiômetro FieldSpec-3.

Os coeficientes de correlação de Pearson, coeficientes de determinação e os testes de hipótese das imagens 1, 2 e 3 corrigidas com o FLAASH, são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Resultados do coeficiente de correlação de Pearson, coeficiente de determinação e teste de hipótese das imagens 1, 2 e 3.

ALVOS	R		R ²		Teste t	
1	VIS	NIR/SWIR	VIS	NIR/SWIR	VIS	NIR/SWIR
Lona Azul	-0,169	-0,612	0,029	0,375	-1,163 ^{NS}	-12,564*
Lona Verde	0,945	0,079	0,893	0,006	19,578*	1,289 ^{NS}
Lona Vermelha	0,995	-0,488	0,991	0,238	69,569*	-9,072*
Lona Cinza Claro	0,797	-0,586	0,635	0,344	8,941*	-11,732*
Lona Cinza Escuro	-0,473	-0,684	0,224	0,467	-3,639*	-15,191*
Lona Amarela	0,981	-0,372	0,963	0,138	34,501*	-6,501*
Placa de BaSO ₄	-0,869	-0,892	0,755	0,795	-11,900*	-31,946*
2	VIS	NIR/SWIR	VIS	NIR/SWIR	VIS	NIR/SWIR
Lona Azul	-0,430	-0,636	0,185	0,404	-3,233*	-13,355*
Lona Verde	0,919	-0,006	0,844	0,0003	15,774*	-0,096 ^{NS}
Lona Vermelha	0,996	-0,554	0,993	0,307	78,177*	-10,788*
Lona Cinza Claro	0,830	-0,626	0,689	0,391	10,094*	-13,007*
Lona Cinza Escuro	-0,680	-0,691	0,462	0,478	-6,282*	-15,504*
Lona Amarela	0,984	-0,461	0,969	0,212	38,044*	-8,414*
Placa de BaSO ₄	-0,927	-0,831	0,859	0,691	-16,739*	-24,250*
3	VIS	NIR/SWIR	VIS	NIR/SWIR	VIS	NIR/SWIR
Lona Azul	-0,187	-0,662	0,035	0,438	-1,289 ^{NS}	-14,310*
Lona Verde	0,945	0,059	0,892	0,004	19,506*	0,964 ^{NS}
Lona Vermelha	0,995	-0,496	0,990	0,246	66,710*	-9,267*
Lona Cinza Claro	0,781	-0,570	0,609	0,325	8,468*	-11,244*
Lona Cinza Escuro	-0,394	-0,713	0,156	0,509	-2,910*	-16,508*
Lona Amarela	0,980	-0,408	0,960	0,166	33,381*	-7,242*
Placa de BaSO ₄	-0,857	-0,876	0,735	0,767	-11,285*	-29,390*

* Correlação considerada significativa através do Teste t com $p > 0,005$.

NS - Correlação não significativa através do Teste t com $p > 0,005$.

Os coeficientes de correlação das imagens 1, 2 e 3, apresentaram valores negativos na lona azul, cinza escuro e na placa BaSO₄ na região do visível. Já na região do infravermelho todas as correlações foram negativas, exceto as correlações da lona verde nas imagens 1 e 3. Correlações negativas mostram que os dados analisados estão em sentidos opostos, ou seja, enquanto uma variável aumenta a outra sempre diminuirá.

Na região do visível as altas correções das lonas verde, vermelha e amarela merecem destaque, assim como na região do infravermelho destaca-se a lona verde, mas pela baixa correlação encontrada.

O teste de significância na região do visível mostra que todos os alvos tiveram correlação significativa, exceto a lona azul nas imagens 1 e 3. Já na região do infravermelho o único alvo que não mostrou correlação significativa foi a lona verde nas três imagens.

Apesar das correlações significativas na região do visível, de modo geral, na região do infravermelho, as curvas espectrais adquiridas a partir das correções realizadas pelo FLAASH não apresentaram resultados satisfatórios em nenhuma das imagens corrigidas, ao contrário dos resultados obtidos com ATCOR-4, que realizou a correção atmosférica nas imagens de forma mais efetiva.

Ao contrário dos resultados obtidos na correção das imagens do sensor AisaFENIX, Yuan e Niu et. al. (2008) analisaram as correções atmosféricas realizadas pelo FLAASH em imagens dos sensores Hyperion e ALI. As assinaturas espectrais das imagens foram comparadas com as assinaturas espectrais obtidas com o sensor ASD, onde foram adquiridas boas correlações entre os dados, exceto para corpos hídricos, já que o modelo não consegue corrigir áreas com baixa resposta espectral, como é o caso da água.

Estudos realizados utilizando os algoritmos FLAASH e ATCOR-2 por Kawishwar (2007) mostraram que os dois algoritmos compensaram de forma satisfatória os efeitos do oxigênio e do gás carbônico. Contudo, os efeitos do vapor de água não foram bem corrigidos quando comparados com dados de radiossondas. Segundo o autor, as correções realizadas em imagem do sensor Hyperion utilizando o FLAASH, apresentaram melhores resultados que as do ATCOR-2.

Os trabalhos citados anteriormente apresentam resultados satisfatórios do FLAASH na correção de imagens hiperespectrais adquiridas a partir de sensores orbitais, dessa forma, estudos para a correção de imagens de sensores hiperespectrais aerotransportados, utilizando o algoritmo FLAASH devem ser aprimorados, já que os resultados para a correção de imagens do sensor AisaFENIX não foram satisfatórios. Os ajustes dos parâmetros de Configuração avançada disponíveis no FLAASH podem proporcionar uma melhora na qualidade dos dados obtidos, porém na correção das imagens do sensor AisaFENIX o FLAASH demonstrou problemas ao ajustar estes parâmetros, por isso a utilização das configurações avançadas de maneira *default* no processamento destas imagens.

4.3 CORREÇÃO ATMOSFÉRICA UTILIZANDO O QUAC

As imagens 1, 2 e 3, coletadas com o sensor AisaFENIX foram submetidas a correções atmosféricas utilizando o QUAC.

As assinaturas espectrais adquiridas após a correção atmosférica na imagem 1 e as coletas de campo com o sensor ASD são apresentadas na Figura 36. As curvas espectrais das lonas cinza claro, cinza escuro, amarela e da placa de BaSO₄ corrigidas pelo QUAC apresentaram superestimação no início das curvas, entre 350nm e 500nm, o que não ocorreu nas curvas coletadas com o espectrorradiômetro. Essa superestimação pode ser ocasionada por problemas no algoritmo de correção atmosférica nesta região do espectro eletromagnético.

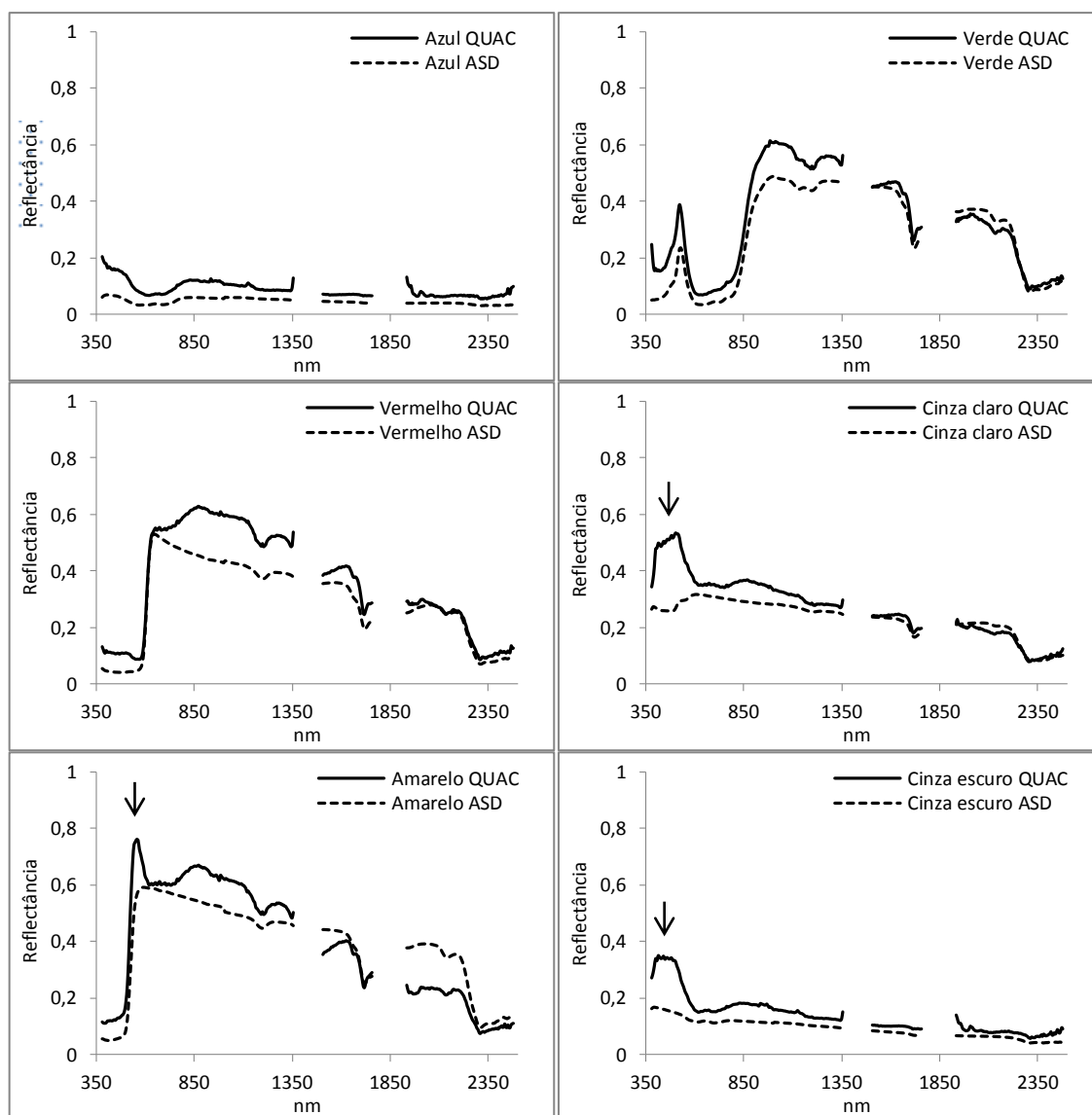


Figura 36- Comparação entre as assinaturas espectrais geradas a partir da imagem 1 corrigida pelo QUAC e as geradas pelo espectrorradiômetro FieldSpec-3.

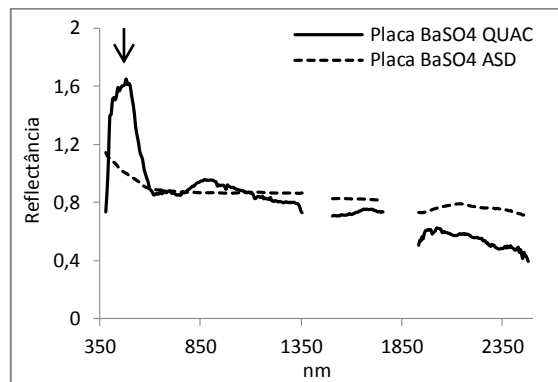


Figura 36 – Continuação.

As assinaturas espectrais adquiridas após a correção atmosférica realizada pelo QUAC na imagem 2 e as obtidas após as coletas de campo são apresentadas na Figura 37. Ao contrário do que ocorreu nas curvas espectrais coletadas a partir da imagem 1 corrigida pelo QUAC, não há superestimação nos dados no início das curvas espectrais coletadas a partir da imagem 2, porém houve uma subestimação da curva spectral da placa de BaSO₄ em relação aos dados de campo.

Nas lonas azul e amarela, entre as regiões de 850nm e 1350nm, há a presença de ruídos, que não apareceram nas imagens 1 e 3.

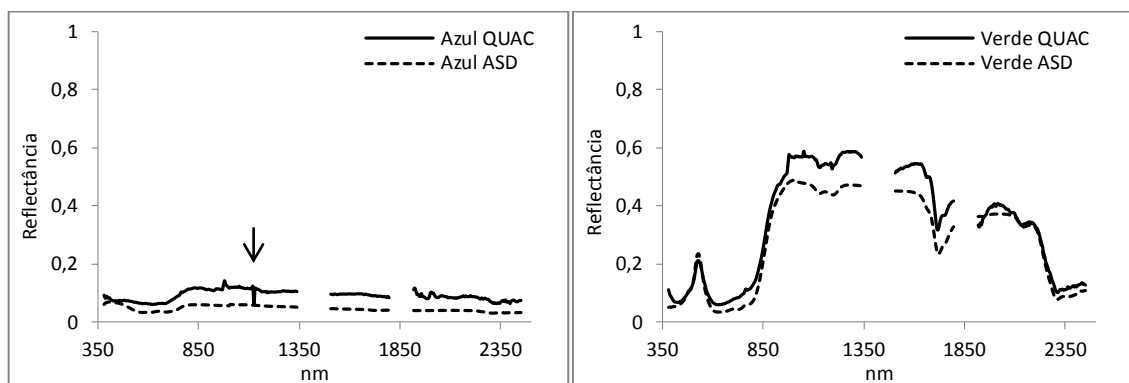


Figura 37- Comparação entre as assinaturas espectrais geradas a partir da imagem 2 corrigida pelo QUAC e as geradas pelo espectrorradiômetro FieldSpec-3.

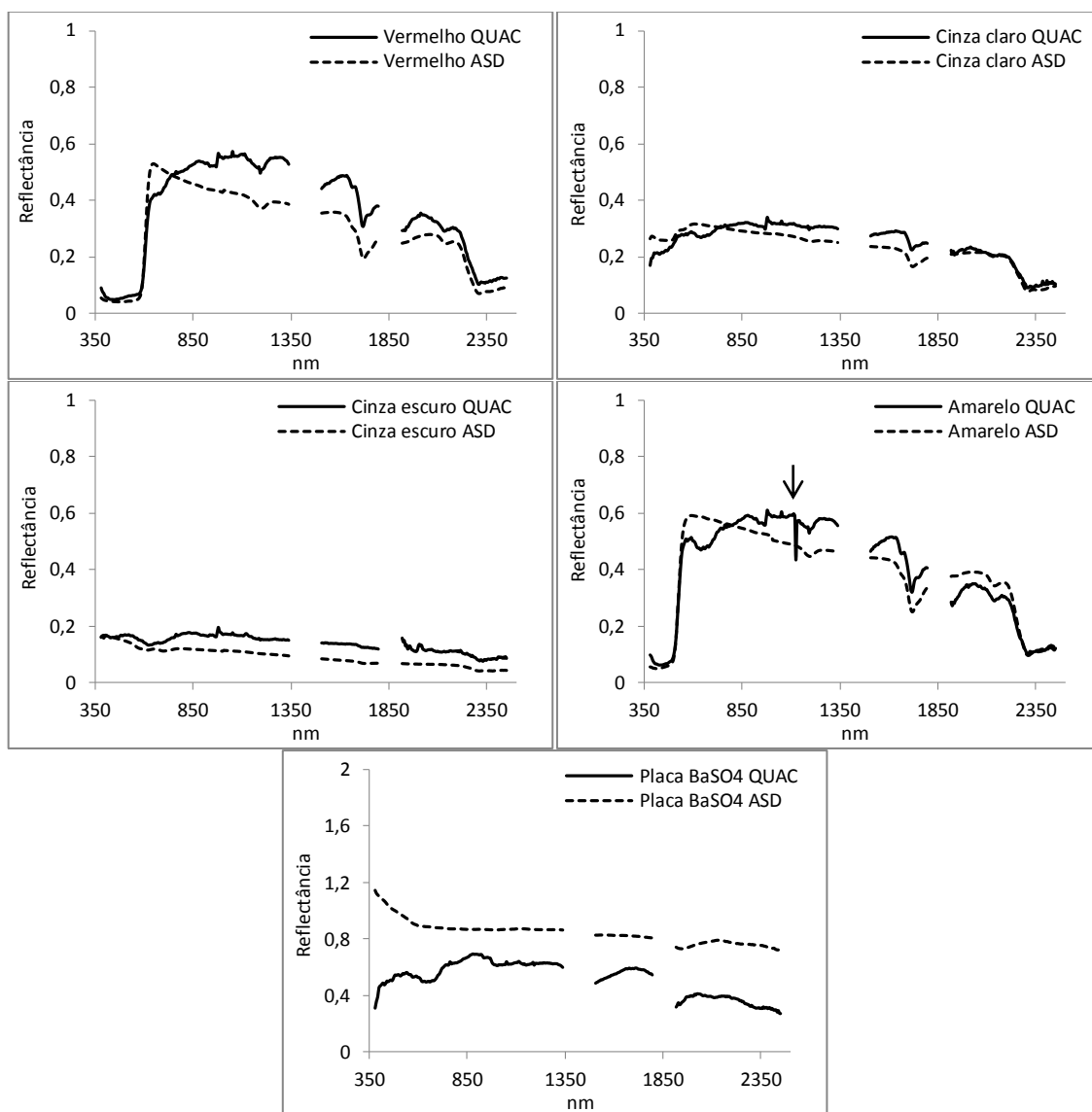


Figura 37 – Continuação.

As correções realizadas pelo QUAC na imagem 3 resultaram em assinaturas espectrais apresentadas na Figura 38, assim como, as assinaturas espectrais coletadas no campo como sensor ASD. Conforme ocorreram nas curvas espectrais coletadas a partir da imagem 1 corrigida pelo QUAC, há superestimação dos dados no início das curvas espectrais nas lonas vermelha, cinza claro, cinza escuro, amarela e na placa de BaSO_4 .

As feições encontradas nas imagens 1 e 3 entre 350nm e 850nm demonstram que o QUAC não corrigiu adequadamente a região do visível, superestimando as curvas espectrais das lonas e subestimando a curva espectral da placa de BaSO_4 . Assim como na imagem 2, onde a curva espectral das lonas vermelha e amarela apresentaram mudanças em relação as curvas espectrais coletadas no campo, e a placa de BaSO_4 sofreu uma subestimação no processo de correção, entre 850nm e 2500nm.

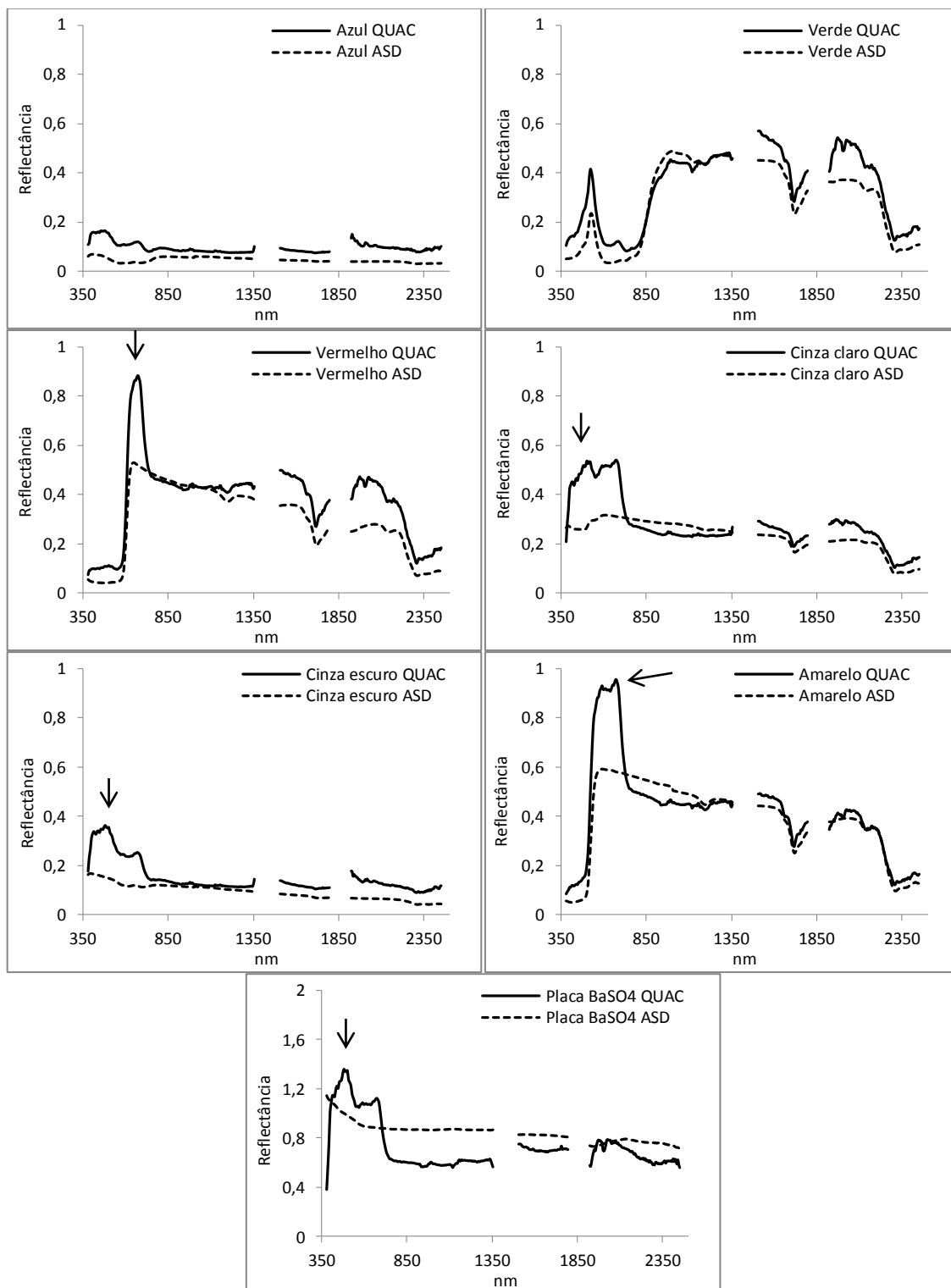


Figura 38- Comparação entre as assinaturas espectrais geradas a partir da imagem 3 corrigida pelo QUAC e as geradas pelo espectrorradiômetro FieldSpec-3.

O algoritmo QUAC não utiliza parâmetros externos para realizar o processo de correção atmosférica, o que pode acarretar na generalização espectral no processo de correção, diferente de algoritmos como o ATCOR-4, que diminuem possíveis ruídos

presentes na imagem utilizando-se de parâmetros externos, que melhoram a qualidade da correção.

Os coeficientes de correlação de Pearson, coeficientes de determinação e os testes de hipótese das imagens 1, 2 e 3 corrigidas com o QUAC, são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Resultados do coeficiente de correlação de Pearson, coeficiente de determinação e teste de hipótese das imagens 1, 2 e 3.

ALVOS	R		R ²		Teste t	
1	VIS	NIR/SWIR	VIS	NIR/SWIR	VIS	NIR/SWIR
Lona Azul	0,961	0,507	0,924	0,257	23,594*	9,771*
Lona Verde	0,925	0,959	0,856	0,920	16,537*	56,490*
Lona Vermelha	0,997	0,973	0,995	0,946	95,292*	69,676*
Lona Cinza Claro	-0,819	0,951	0,671	0,904	-9,678*	51,022*
Lona Cinza Escuro	0,955	0,838	0,912	0,703	21,799*	25,533*
Lona Amarela	0,966	0,914	0,933	0,835	25,370*	37,334*
Placa de BaSO₄	0,591	0,786	0,350	0,618	4,975*	21,114*
2	VIS	NIR/SWIR	VIS	NIR/SWIR	VIS	NIR/SWIR
Lona Azul	0,855	0,517	0,731	0,267	11,175*	10,090*
Lona Verde	0,979	0,979	0,958	0,958	32,329*	79,484*
Lona Vermelha	0,998	0,955	0,996	0,912	106,682*	53,858*
Lona Cinza Claro	0,866	0,943	0,750	0,889	11,758*	47,260*
Lona Cinza Escuro	0,820	0,779	0,673	0,606	9,732*	20,725*
Lona Amarela	0,997	0,938	0,995	0,880	93,355*	45,180*
Placa de BaSO₄	-0,604	0,957	0,365	0,915	-5,143*	54,800*
3	VIS	NIR/SWIR	VIS	NIR/SWIR	VIS	NIR/SWIR
Lona Azul	0,866	-0,257	0,750	0,066	11,750*	-4,443*
Lona Verde	0,989	0,919	0,978	0,844	45,694*	38,827*
Lona Vermelha	0,997	0,879	0,995	0,773	95,470*	30,786*
Lona Cinza Claro	0,409	0,777	0,167	0,604	3,039*	20,574*
Lona Cinza Escuro	0,706	0,300	0,499	0,090	6,765*	5,251*
Lona Amarela	0,997	0,965	0,994	0,931	86,965*	61,014*
Placa de BaSO₄	-0,193	0,093	0,037	0,009	-1,335 ^{NS}	1,558 ^{NS}

* Correlação considerada significativa através do Teste t com $p > 0,005$.

NS - Correlação não significativa através do Teste t com $p > 0,005$.

Na Tabela 10 é possível observar as altas correlações encontradas entre os dados da imagem 1 e do campo, sendo que na região do visível a maior correlação encontrada foi o da lona vermelha com valor igual a 0,99 e a menor correlação foi o da placa de BaSO₄ com 0,59. A lona cinza claro obteve correlação negativa na região do visível com -0,81. Na região

do infravermelho o maior coeficiente de correlação encontrado também foi o da lona vermelha com 0,97 e o menor foi o da lona azul com 0,5.

As curvas espectrais adquiridas a partir da imagem 2 corrigida e as curvas espectrais coletadas no campo, apresentam altas correlações na região do visível, sendo a maior correlação observada a da lona vermelha com valor igual a 0,998 e a menor correlação a da placa de BaSO_4 com valor negativo igual a -0,604. Na região do infravermelho o maior coeficiente de correlação observado foi o da lona verde com 0,979 e o menor foi o da lona azul com 0,517.

Na imagem 3, as correlações entre os dados da imagem corrigida e do campo na região do visível, apresentam resultados satisfatórios, principalmente, as lonas vermelha e amarela com correlações igual a 0,997. A menor correlação observada foi a da placa de BaSO_4 com valor negativo igual a -0,193. Na região do infravermelho o maior coeficiente de correlação encontrado foi o da lona amarela com 0,965 e a menor foi o da placa de BaSO_4 com 0,093.

A placa de BaSO_4 sofreu subestimação nas curvas espectrais das imagens 2 e 3, decorrente de possíveis problemas do algoritmo na generalização espectral dos alvos, principalmente na região do visível.

Todas as correlações das imagens 1 e 2 foram consideradas significativas de acordo com o Teste t adotado com um nível de confiança de 95%. Já na imagem 3 apenas a placa de BaSO_4 não obteve correlação significativa em nenhuma das regiões do espectro.

Os algoritmos FLAASH e QUAC utilizados neste trabalho foram implementados no *software* ENVI (ENVI, 2012). Os resultados obtidos nas correções das imagens 1, 2 e 3 demonstraram maior eficácia nas correções realizadas pelo QUAC do que pelo algoritmo FLAASH. Outros trabalhos também demonstraram melhores resultados nas correções realizadas pelo QUAC, como o de Moses et. al. (2012) que analisou os algoritmos FLAASH e QUAC para a correção dos efeitos atmosféricos em imagens do sensor AISA, com o objetivo de realizar estimativas mais precisas da concentração da clorofila presentes em águas turvas. O QUAC produziu correções atmosféricas mais consistentes e confiáveis em relação ao FLAASH, apesar do FLAASH ser um algoritmo mais robusto. Assim como, Bernstein et. al. (2005) também apresentou resultados notáveis nas correções realizadas pelo QUAC em dados dos sensores AVIRIS, HyMap e Landsat-7 em relação ao algoritmo FLAASH.

4.4 CORREÇÃO ATMOSFÉRICA UTILIZANDO O MÉTODO LINHA EMPÍRICA

As imagens 1, 2 e 3, coletadas com o sensor AisaFENIX foram submetidas a correções atmosféricas utilizando o método Linha Empírica (LE).

Este método foi empregado de duas formas distintas. Na primeira, foram utilizadas lonas na calibração e geração da equação de correção. Na segunda, as lonas não foram utilizadas, com o intuito de avaliar se houve melhora na correção das imagens ao utilizar as lonas no processo de correção.

A Figura 39 apresenta as assinaturas espectrais dos alvos coletados a partir da imagem 1 corrigida pelo método LE (com lonas e sem lonas) e as coletadas no campo com o sensor ASD.

A curva espectral da lona azul gerada a partir da imagem 1, corrigida pelo método LE com lonas apresentou, em algumas regiões do espectro, valores de reflectância negativos, causando subestimativa da reflectância e mostrando falha do método utilizado. As assinaturas espectrais das lonas cinza claro, cinza escuro, amarela e da placa de BaSO₄ geradas a partir da imagem, corrigida com LE com lonas, também demonstraram diferenças ao longo do espectro em relação as assinaturas espectrais coletas no campo.

As assinaturas espectrais, adquiridas a partir da imagem 1 corrigida com LE sem lonas e aquelas coletadas com o espectrorradiômetro, não apresentaram na lona azul valores negativos, como aconteceu com o método LE com lonas. A não utilização das lonas, pode ter contribuído para está melhora nos resultados da lona azul, já os ruídos encontrados no início do espectro nas lonas cinza claro, cinza escuro, amarelo e na placa BaSO₄ mantiveram-se, mostrando que a inserção das lonas no método anterior não corrigiu este problema.

As intensidades entre os métodos LE com e sem lonas sofreram alterações em todos os alvos. As assinaturas espectrais adquiridas a partir da imagem corrigida com LE com lonas aproximaram-se mais das assinaturas espectrais coletadas no campo, exceto para a lona azul, que sofreu subestimativa da reflectância neste método.

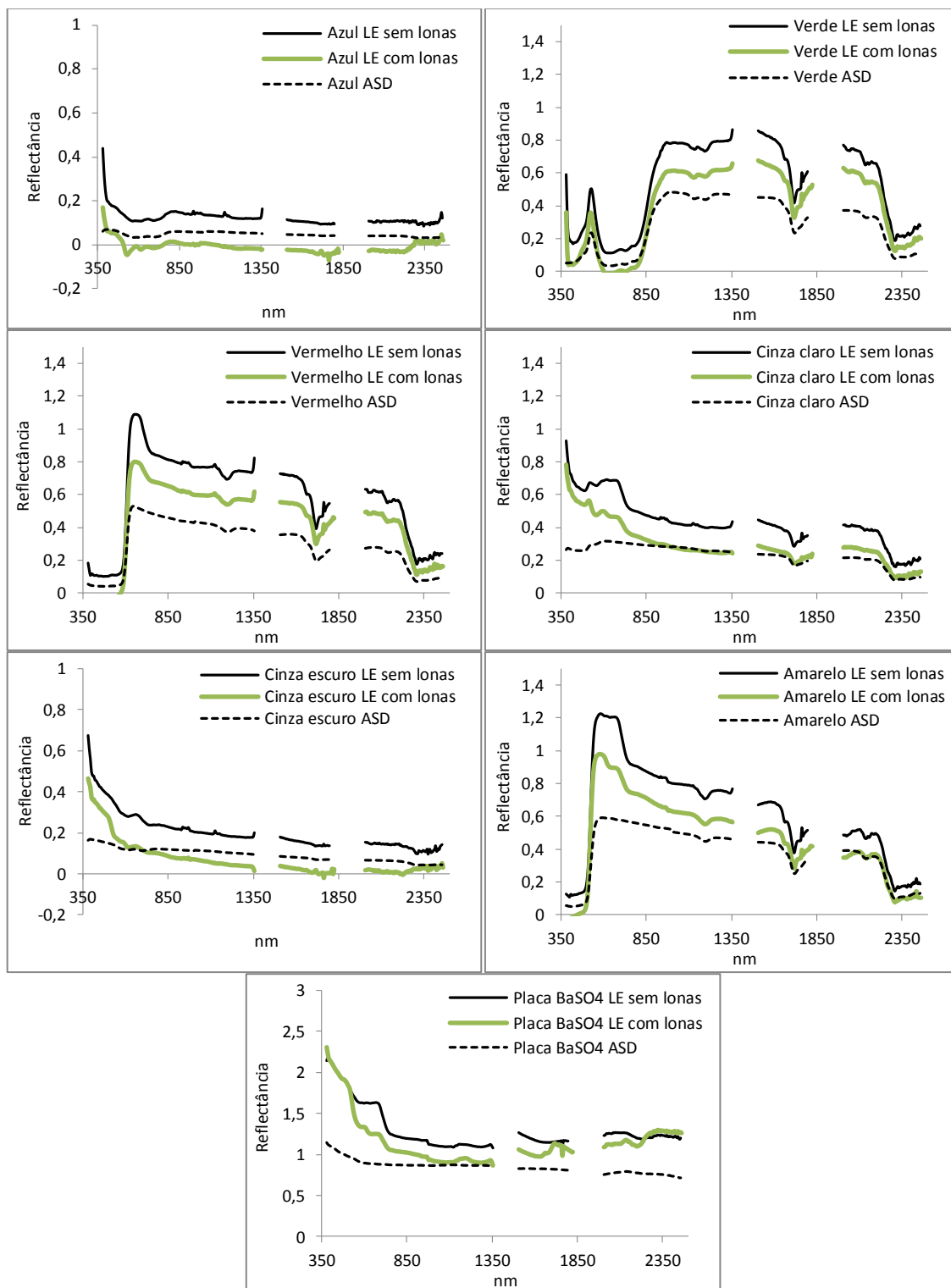


Figura 39 - Comparação entre as assinaturas espectrais geradas a partir da imagem 1 corrigida pelo método Linha Empírica (com lonas e sem lonas no processamento) e as geradas pelo espectrorradiômetro FieldSpec-3.

A Figura 40 apresenta as assinaturas espectrais dos alvos coletados a partir da imagem 2 corrigida pelo método LE (com lonas e sem lonas) e as coletadas no campo com o sensor ASD.

A assinatura espectral da lona azul, adquirida a partir da imagem 2 corrigida utilizando o método LE com lonas apresentou, em algumas regiões do espectro, valores de reflectância negativos causando subestimativa da curva espectral, assim como ocorreu na correção da imagem 1.

As assinaturas espectrais das lonas cinza claro, cinza escuro e da placa de BaSO_4 adquiridas a partir da imagem corrigida, pelo método LE com lonas, também demonstraram diferenças no início do espectro em relação as assinaturas espectrais coletas no campo, além disto, em todas as curvas há um pequeno ruído na região entre 1000nm e 1200nm, que provavelmente seja, oriundo de ruídos presentes nos dados inseridos no processamento do método LE.

A não utilização das lonas, assim como, ocorreu na correção da imagem 1, contribuiu para a melhora nos resultados da lona azul, onde, não houve a subestimação da reflectância. Já a placa de BaSO_4 demonstrou resultados diferentes em relação a imagem 1, corrigida pelo mesmo método, apresentando subestimativa da reflectância, assim como no método LE com lonas.

No método LE sem lonas, o ruído encontrado na região entre 1000nm e 1200nm diminuiu em relação ao método LE com lonas, manifestando-se apenas nas lonas azul e amarela.

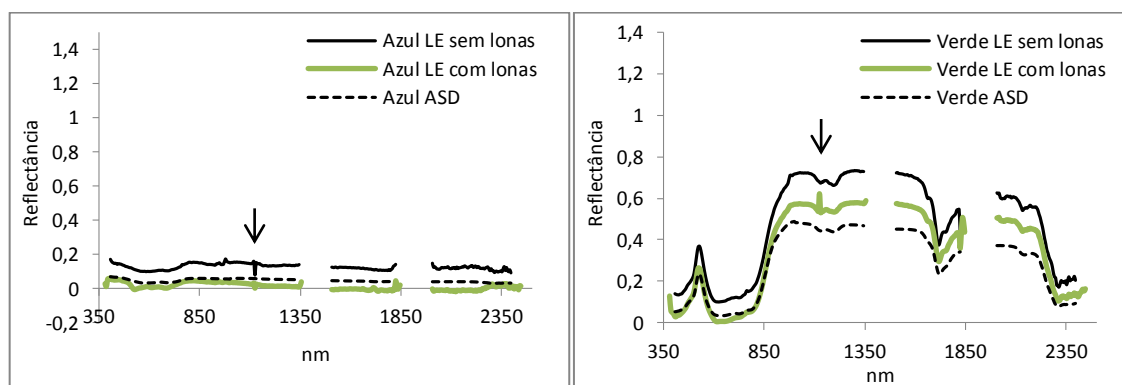


Figura 40 - Comparação entre as assinaturas espectrais geradas a partir da imagem 2 corrigida pelo método Linha Empírica (com lonas e sem lonas no processamento) e as geradas pelo espectrorradiômetro FieldSpec-3.

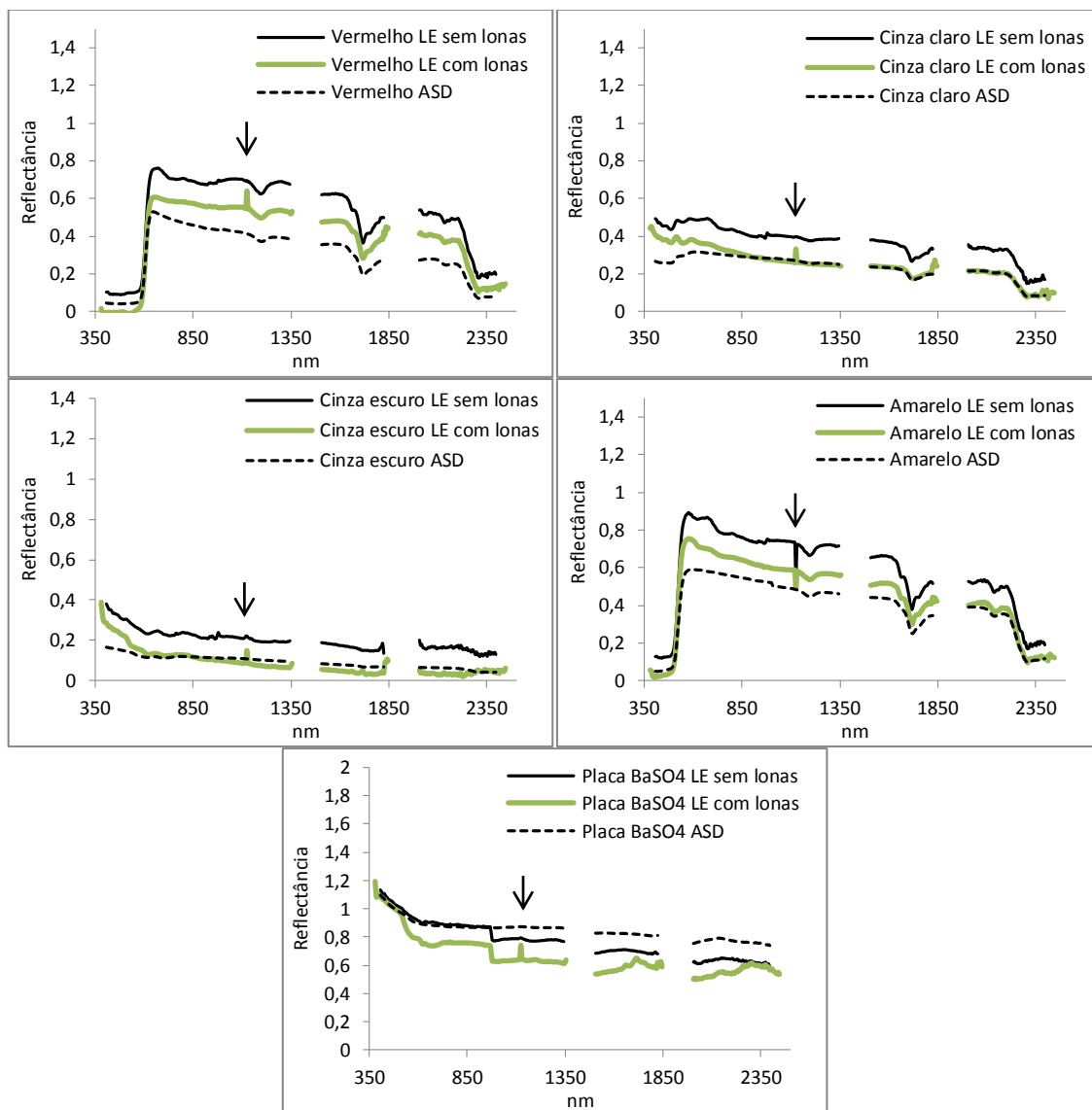


Figura 40 – Continuação.

A Figura 41 apresenta as assinaturas espectrais dos alvos, coletadas na imagem 3 corrigida através do LE com lonas e aquelas coletadas no campo com o espectrorradiômetro. Diferente do ocorrido nas imagens 1 e 2, não há na assinatura spectral da lona azul, valores de reflectância negativos, porém a subestimativa da reflectância permaneceu, assim como, nas lonas cinza claro, cinza escuro e na placa de BaSO₄.

A Figura 41 apresenta também, as assinaturas espectrais dos alvos, coletadas a partir da imagem 3 corrigida pelo método LE sem lonas. A não utilização das lonas, assim como, nas imagens anteriores, resultou em assinaturas espectrais satisfatórias em todas as lonas e na placa de BaSO₄.

Além disso, as assinaturas espectrais de todos os alvos coletados a partir da imagem 3 corrigida pelo método LE com lonas e sem lonas, apresentaram as menores variações na amplitude da reflectância, em relação as correções das imagens 1 e 2.

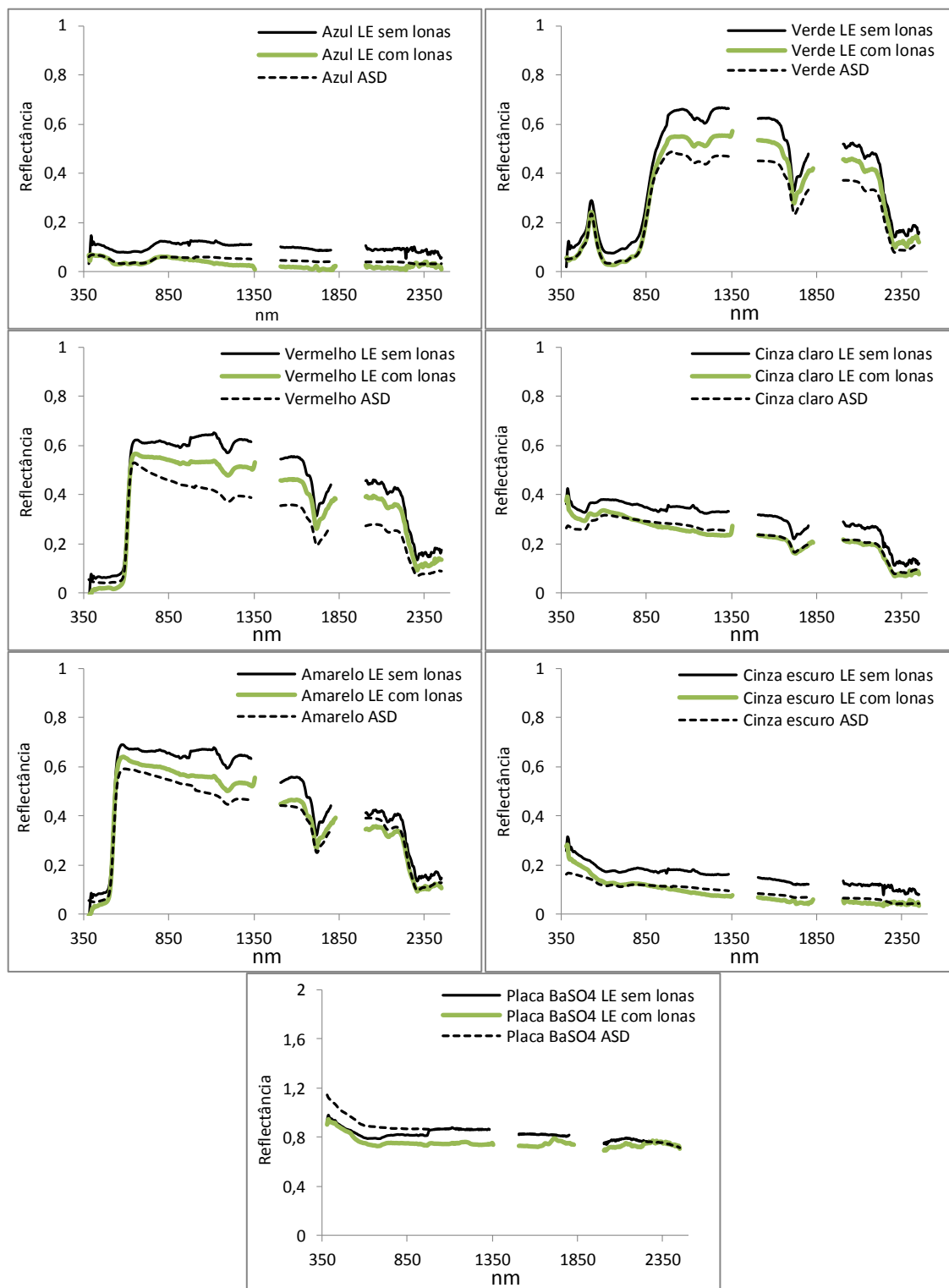


Figura 41 - Comparação entre as assinaturas espectrais geradas a partir da imagem 2 corrigida pelo método Linha Empírica (com lonas e sem lonas no processamento) e as geradas pelo espectrorradiômetro FieldSpec-3.

Os coeficientes de correlação de Pearson, coeficientes de determinação e os testes de hipótese, entre os dados das imagens 1, 2 e 3 corrigidas pelo método LE com lonas e os dados coletados no campo, são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Resultados do coeficiente de correlação de Pearson, coeficiente de determinação e teste de hipótese das imagens 1, 2 e 3, corrigidas pelo método LE com lonas.

ALVOS	R		R ²		Teste t	
1	VIS	NIR/SWIR	VIS	NIR/SWIR	VIS	NIR/SWIR
Lona Azul	0,836	-0,024	0,699	0,001	10,344*	-0,388 ^{NS}
Lona Verde	0,887	0,965	0,788	0,931	13,057*	60,243*
Lona Vermelha	0,997	0,978	0,994	0,957	90,247*	77,206*
Lona Cinza Claro	-0,717	0,926	0,514	0,858	-6,977*	40,341*
Lona Cinza Escuro	0,963	0,743	0,927	0,552	24,205*	18,246*
Lona Amarela	0,991	0,983	0,982	0,966	49,499*	86,960*
Placa de BaSO₄	0,977	-0,855	0,955	0,732	31,239*	-27,142*
2	VIS	NIR/SWIR	VIS	NIR/SWIR	VIS	NIR/SWIR
Lona Azul	0,917	0,576	0,841	0,332	15,593*	11,663*
Lona Verde	0,977	0,989	0,955	0,978	31,192*	109,549*
Lona Vermelha	0,9996	0,985	0,999	0,971	262,104*	95,010*
Lona Cinza Claro	-0,501	0,979	0,251	0,959	-3,929*	80,393*
Lona Cinza Escuro	0,947	0,765	0,897	0,586	19,984*	19,679*
Lona Amarela	0,997	0,993	0,994	0,985	90,129*	135,328*
Placa de BaSO₄	0,979	0,700	0,958	0,490	32,232*	16,239*
3	VIS	NIR/SWIR	VIS	NIR/SWIR	VIS	NIR/SWIR
Lona Azul	0,965	0,506	0,932	0,256	25,095*	10,330*
Lona Verde	0,998	0,994	0,996	0,989	113,607*	165,077*
Lona Vermelha	0,999	0,985	0,997	0,970	126,544*	99,353*
Lona Cinza Claro	0,402	0,972	0,161	0,945	2,975*	72,769*
Lona Cinza Escuro	0,953	0,885	0,908	0,783	21,306*	33,413*
Lona Amarela	0,999	0,984	0,997	0,967	124,946*	96,002*
Placa de BaSO₄	0,981	0,282	0,963	0,080	34,626*	5,183*

* Correlação considerada significativa através do Teste t com $p > 0,005$.

NS - Correlação não significativa através do Teste t com $p > 0,005$.

A utilização das lonas influenciou os resultados obtidos entre os dados das imagens 1 e 2 com os dados de campo (Tabela 11). A região do visível na imagem 1 apresentou as maiores correlações nas lonas vermelha e amarela com valores iguais 0,997 e 0,991. Na região do infravermelho, as lonas amarela e vermelha mantiveram as maiores correlações com 0,983 e 0,978, respectivamente.

Na região do visível da imagem 2, as maiores correlações foram as das lonas vermelha e amarela com 0,9996 e 0,997. No infravermelho as maiores correlações foram as das lonas verde e amarela com 0,989 e 0,993, respectivamente.

Assim como nas imagens 1 e 2, a utilização das lonas não degradou as correlações entre os dados da imagem 3 e do campo. Na região do visível foram observadas na maioria dos alvos altas correlações. As maiores correlações foram as das lonas vermelha e amarela com valor igual a 0,999. No infravermelho as maiores correlações foram as das lonas verde e vermelha com valores iguais a 0,994 e 0,984. As menores correlações no visível e no infravermelho foram a da lona cinza claro e da placa de BaSO₄, respectivamente.

Apenas a lona azul na região do infravermelho, na imagem 1 corrigida pelo método LE com lonas, não mostrou correlação significativa, já nas imagens 2 e 3, a lona azul apresentou correlação significativa nas regiões do visível e do infravermelho.

A Figura 42 apresenta os gráficos de correlação entre os dados das imagens 1, 2 e 3 e os dados de campo, adquiridos com o sensor ASD. Os alvos selecionados para a geração dos gráficos foram as lonas verde, amarela, vermelha e a placa de BaSO₄. Os gráficos demonstraram a alta correlação obtida entre os dados de campo e os dados adquiridos a partir das imagens corrigidas pelo método LE com lonas.

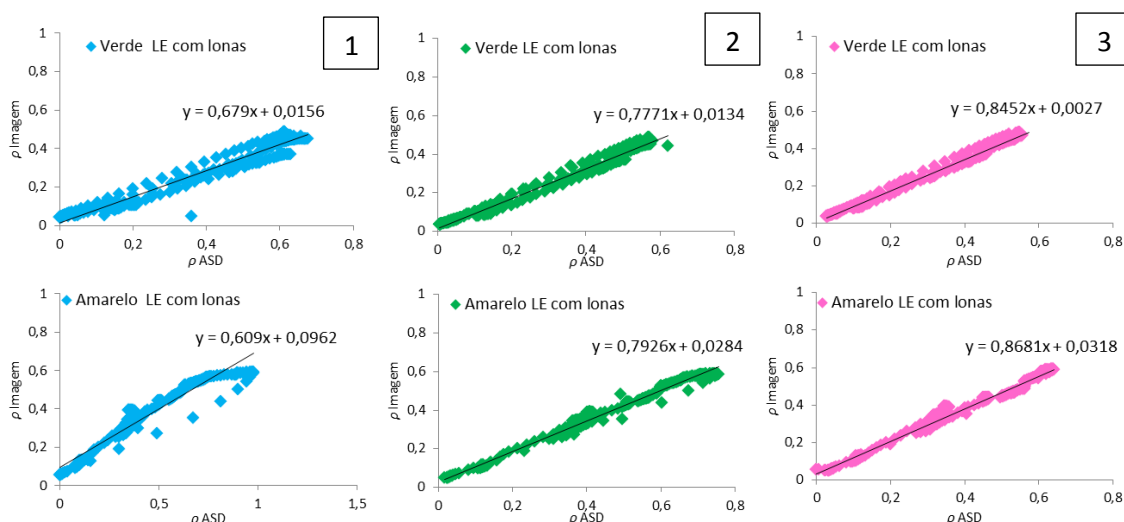


Figura 42 – Gráficos da correlação do coeficiente de Pearson entre as imagens 1, 2 e 3 corrigidas pelo método LE com lonas, e os dados de campo, coletados com o sensor ASD.

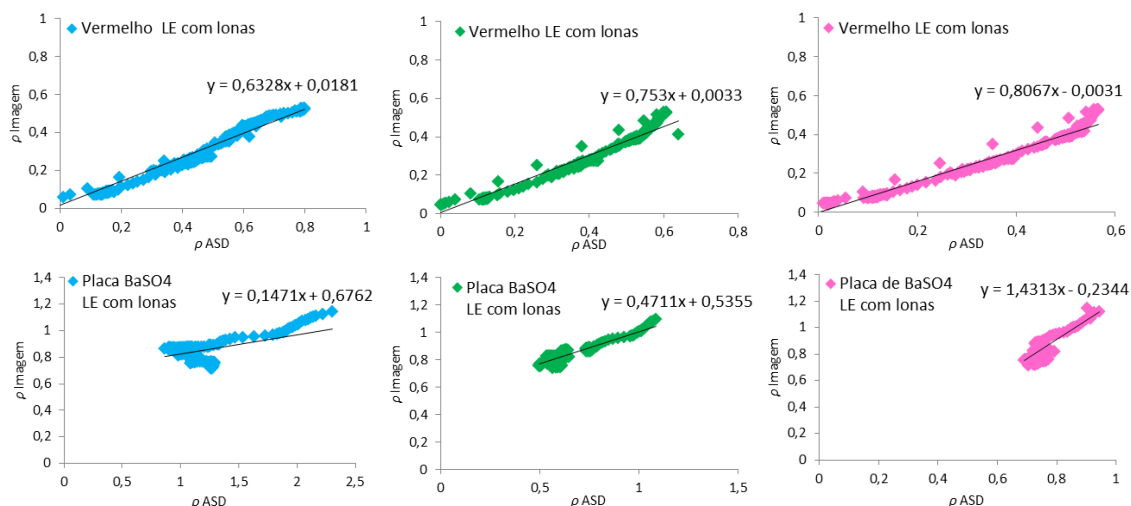


Figura 42 – Continuação.

Os coeficientes de correlação de Pearson, coeficientes de determinação e os testes de hipótese, entre os dados das imagens 1, 2 e 3 corrigidas pelo método LE sem lonas e os dados coletados no campo, são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12- Resultados do coeficiente de correlação de Pearson, coeficiente de determinação e teste de hipótese das imagens 1, 2 e 3, corrigidas pelo método LE sem lonas.

ALVOS	R		R ²		Teste t	
1	VIS	NIR/SWIR	VIS	NIR/SWIR	VIS	NIR/SWIR
Lona Azul	0,706	0,029	0,499	0,001	6,763*	0,497 ^{NS}
Lona Verde	0,832	0,948	0,692	0,898	10,169*	50,164*
Lona Vermelha	0,9996	0,920	0,999	0,847	237,693*	39,710*
Lona Cinza Claro	0,013	0,706	0,0002	0,498	0,085 ^{NS}	16,806*
Lona Cinza Escuro	0,905	0,273	0,819	0,075	14,410*	4,796*
Lona Amarela	0,999	0,954	0,998	0,910	136,840*	53,64*
Placa de BaSO ₄	0,990	-0,125	0,980	0,016	47,408*	-2,123*
2	VIS	NIR/SWIR	VIS	NIR/SWIR	VIS	NIR/SWIR
Lona Azul	0,728	0,328	0,530	0,107	7,198*	5,741*
Lona Verde	0,885	0,989	0,784	0,978	12,908*	111,005*
Lona Vermelha	0,995	0,971	0,991	0,943	70,501*	67,580*
Lona Cinza Claro	0,232	0,940	0,054	0,883	1,616 ^{NS}	45,459*
Lona Cinza Escuro	0,853	0,563	0,728	0,317	11,087*	11,288*
Lona Amarela	0,996	0,985	0,992	0,970	75,610*	94,431*
Placa de BaSO ₄	0,996	0,923	0,992	0,851	73,363*	39,579*
3	VIS	NIR/SWIR	VIS	NIR/SWIR	VIS	NIR/SWIR
Lona Azul	0,683	0,297	0,467	0,088	6,349*	5,141*
Lona Verde	0,981	0,988	0,963	0,976	34,397*	104,944*

ALVOS	R		R ²		Teste t	
Lona Vermelha	0,995	0,956	0,989	0,914	65,789*	53,831*
Lona Cinza Claro	0,692	0,879	0,479	0,772	6,509*	30,482*
Lona Cinza Escuro	0,960	0,607	0,922	0,369	23,391*	12,650*
Lona Amarela	0,997	0,960	0,994	0,921	85,855*	56,469*
Placa de BaSO₄	0,990	0,892	0,981	0,796	48,699*	32,676*

* Correlação considerada significativa através do Teste t com $p > 0,005$.

NS - Correlação não significativa através do Teste t com $p > 0,005$.

A ausência das lonas no processo de correção da imagem 1, apresentou correlações satisfatórias, principalmente na região do visível onde a correlação da lona vermelha foi considerada alta com 0,9996, assim como, a lona amarela que apresentou 0,999 de correlação. Na região do infravermelho a maior correlação encontrada, também foi a da lona amarela e a menor a da lona azul com 0,954 e 0,029, respectivamente.

Assim como, na imagem 1, a correção da imagem 2 utilizando o método LE sem lonas, apresentou na região do visível, altas correlações, como a da lona vermelha, com valor igual a 0,995 e a lona amarela com 0,996. A menor correlação encontrada nesta região foi a da lona cinza claro com 0,232. Na região do infravermelho a maior correlação encontrada foi a da lona verde com 0,989 e a menor a da lona azul com valor igual a 0,328.

As correlações entre a imagem 3 corrigida e os dados de campo, apresentaram resultados satisfatórios, assim como, os resultados da imagem 3 corrigida pelo método LE com lonas (Tabela 11). A correlação da lona amarela foi considerada a mais alta com 0,997, na região do visível. Já a menor correlação encontrada nesta região foi a da lona azul com 0,683. Na região do infravermelho a maior correlação encontrada foi a da lona verde com 0,988 e a menor a da lona azul com 0,297.

Os testes de significância demonstram que a correlação dos alvos, que não foi considerada significativa, foi a da lona cinza claro na região visível, nas imagens 1 e 2. Já na região do infravermelho, na imagem 1, a lona azul não apresentou correlação significativa.

A Figura 43 apresenta os gráficos de correlação entre os dados das imagens 1, 2 e 3 e os dados de campo, adquiridos com o sensor ASD. Os alvos selecionados para a geração dos gráficos foram as lonas verde, amarela, vermelha e a placa de BaSO₄. Assim como, na Figura 42 os gráficos demonstraram alta correlação obtida entre os dados de campo e os dados adquiridos a partir das imagens corrigidas pelo método LE sem lonas.

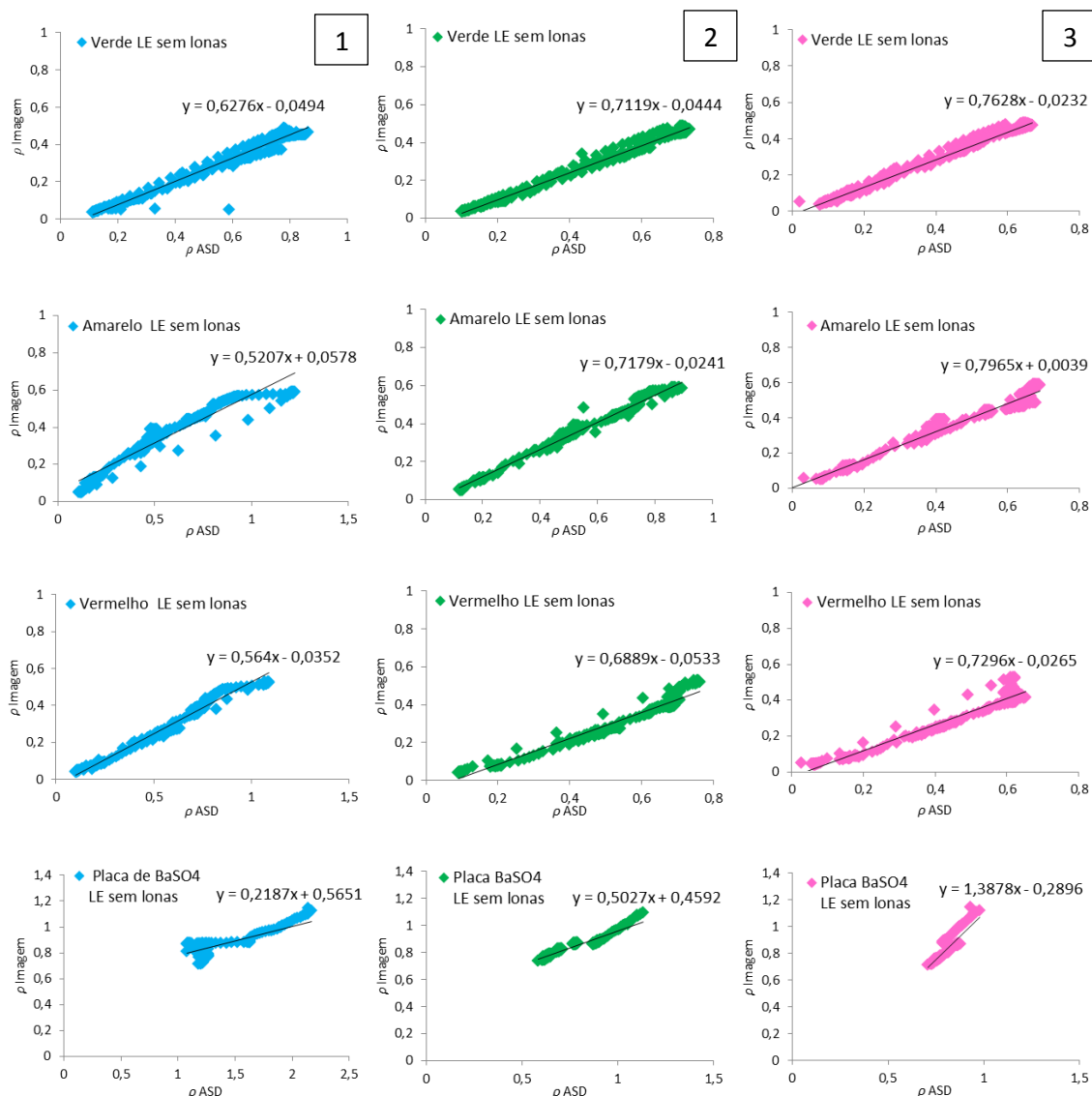


Figura 43 - Gráficos da correlação do coeficiente de Pearson entre as imagens 1, 2 e 3 corrigidas pelo método LE sem lonas, e os dados de campo, coletados com o sensor ASD.

A utilização de um número maior de alvos, com diferentes características espectrais, além dos alvos escuros e brilhantes necessários na calibração, podem melhorar a qualidade da correção atmosférica, como demonstram Ben dor et. al. (2004) e Smith e Milton et. al. (1999).

Em estudos realizados utilizando o método Linha Empírica, como o de Staben et. al. (2012) que realizou as correções nas imagens de satélite WorldView-2, utilizando sete alvos para a geração das equações de predição, e posteriormente, para uma avaliação de precisão foram comparadas as assinaturas espectrais obtidas na imagem com as coletadas no campo de 19 alvos independentes. Os resultados foram satisfatórios e demonstraram que o método Linha Empírica calibrou adequadamente as imagens do satélite WorldView-2.

Karpouzli e Malthus et. al. (2003) usaram os métodos de Linha Empírica para corrigir os efeitos atmosféricos nas imagens obtidas através do satélite IKONOS, usando nove alvos de calibração e relataram resultados altamente satisfatórios.

A correção de imagens hiperespectrais utilizando o método Linha Empírica pode ser aprimorada, determinando alvos que possam influenciar na melhoria das correções. Algumas lonas utilizadas neste trabalho, como foram demonstradas, podem melhorar a qualidade da correção, como as lonas verde, vermelha e amarela. Já a lona azul influenciou negativamente as correções de algumas imagens, demonstrando não ser um bom alvo para a calibração do método.

4.5 TESTE DE COMPARAÇÃO DE MÉDIAS DAS IMAGENS HIPERESPECTRAIS

Para a avaliação de possíveis diferenças, entre as imagens corrigidas pelo mesmo método, foi realizado o teste de comparação de médias Scott-Knott. As lonas que apresentaram os melhores resultados nos testes estatísticos anteriores foram os alvos escolhidos para a comparação de médias, sendo as lonas vermelha, amarela e verde, nas imagens 1, 2 e 3 como é apresentado nas Figuras 44, 45, 46, 47, 48, 49 e 50, sendo que em cada figura são demonstradas as respostas espectrais de cada lona obtidas a partir das imagens corrigidas pelos métodos ATCOR-4, QUAC, LE com lonas e LE sem lonas, e a resposta espectral coletada no campo com o sensor ASD.

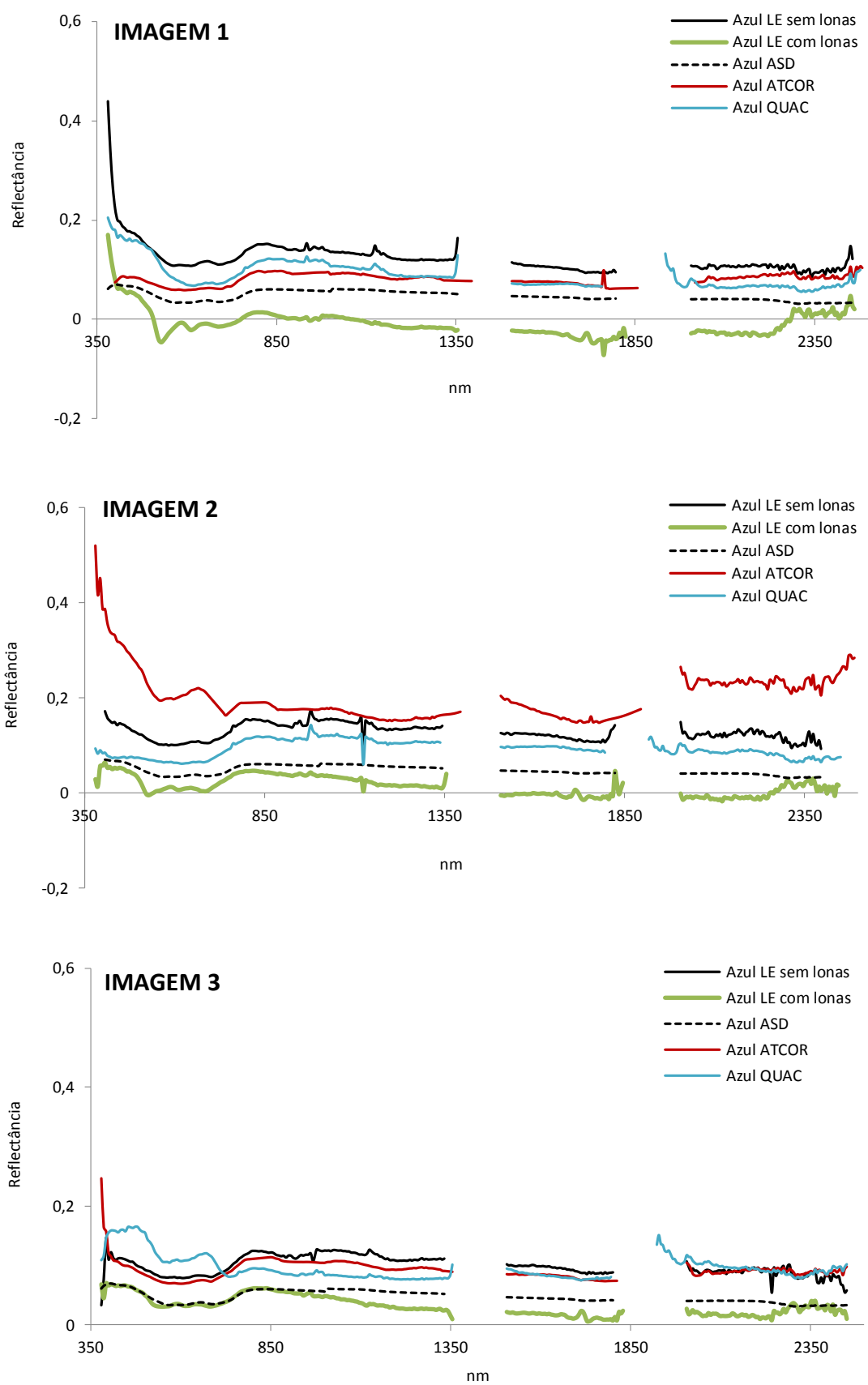


Figura 44 – Assinaturas espectrais da lona azul, das imagens 1, 2 e 3 corrigidas pelo ATCOR-4, QUAC, LE com lonas e LE sem lonas, e a assinatura espectral coletada no campo com o sensor ASD.

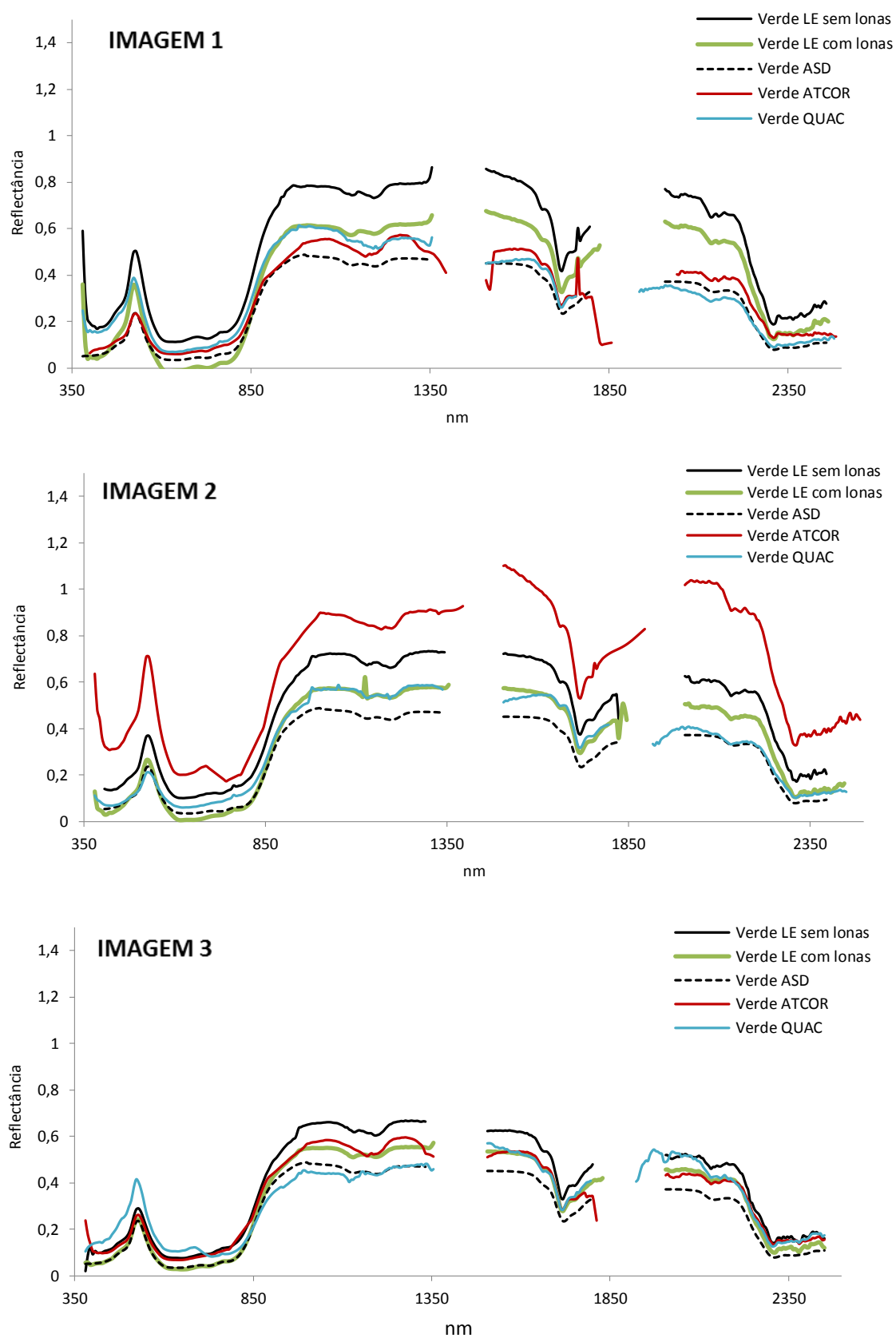


Figura 45 - Assinaturas espectrais da lona verde, das imagens 1, 2 e 3 corrigidas pelo ATCOR-4, QUAC, LE com lonas e LE sem lonas, e a assinatura espectral coletada no campo com o sensor ASD.

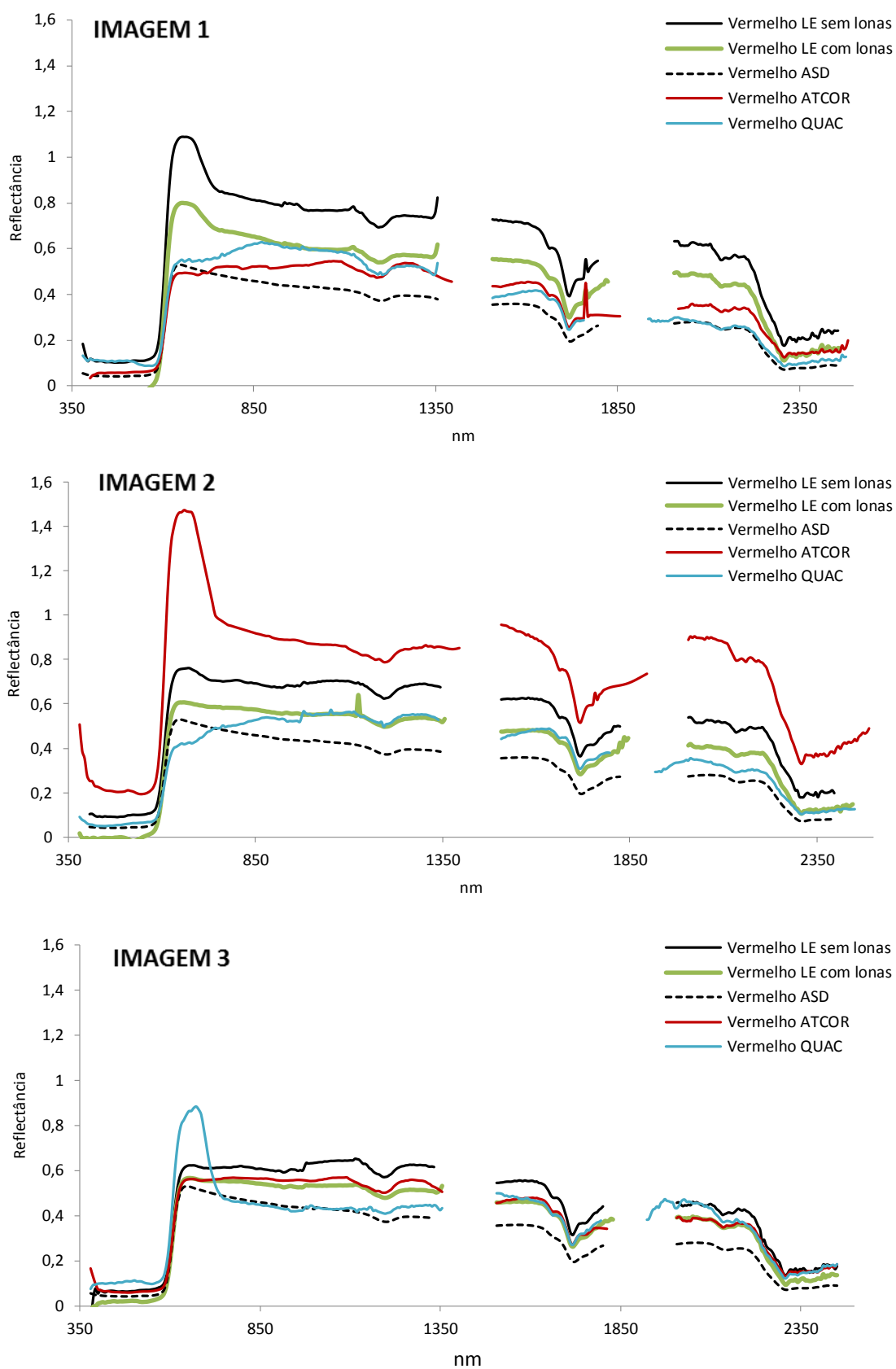


Figura 46 - Assinaturas espectrais da lona vermelha, das imagens 1, 2 e 3 corrigidas pelo ATCOR-4, QUAC, LE com lonas e LE sem lonas, e a assinatura espectral coletada no campo com o sensor ASD.

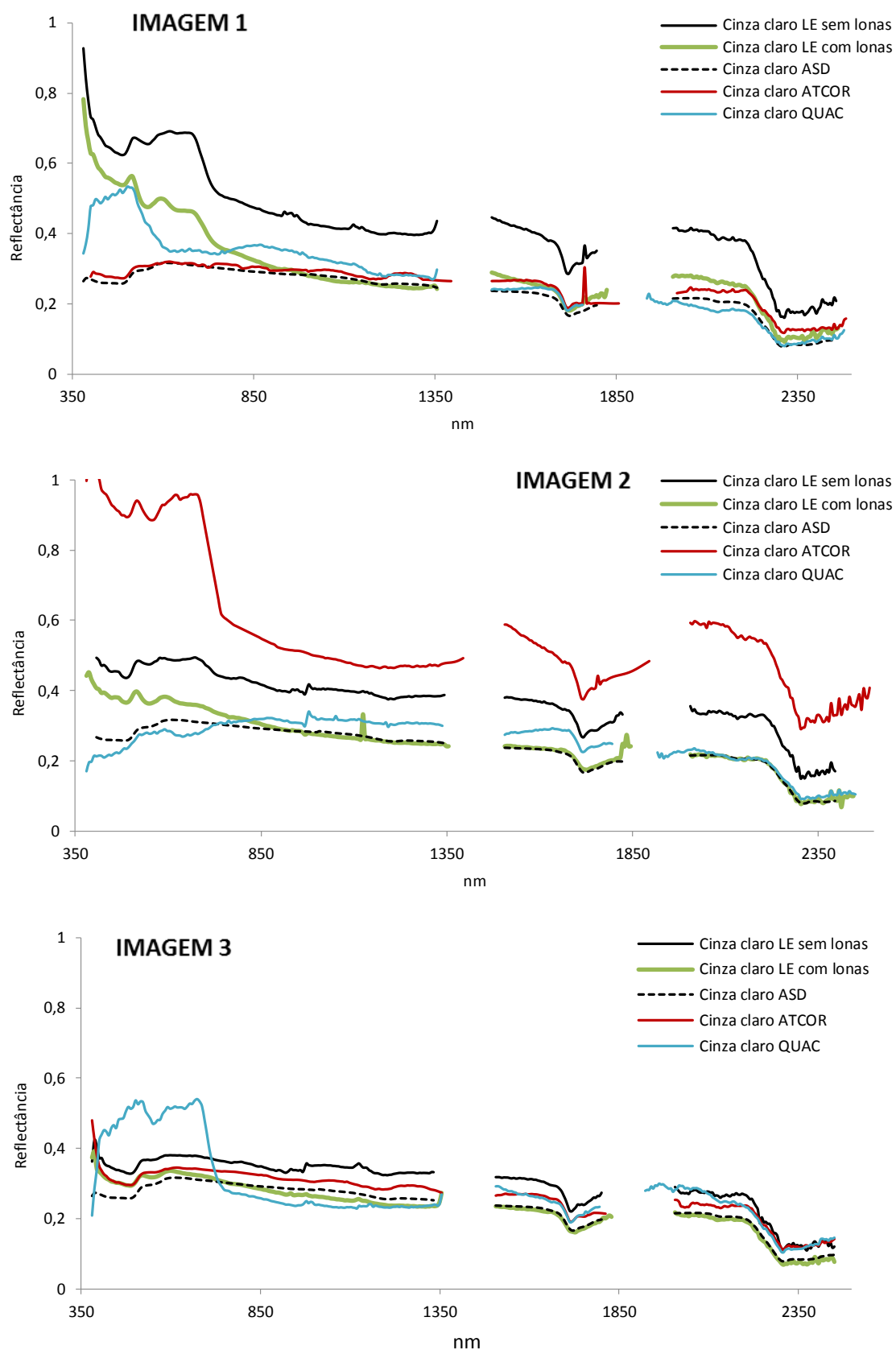


Figura 47 - Assinaturas espectrais da lona cinza claro, das imagens 1, 2 e 3 corrigidas pelo ATCOR-4, QUAC, LE com lonas e LE sem lonas, e a assinatura espectral coletada no campo com o sensor ASD.

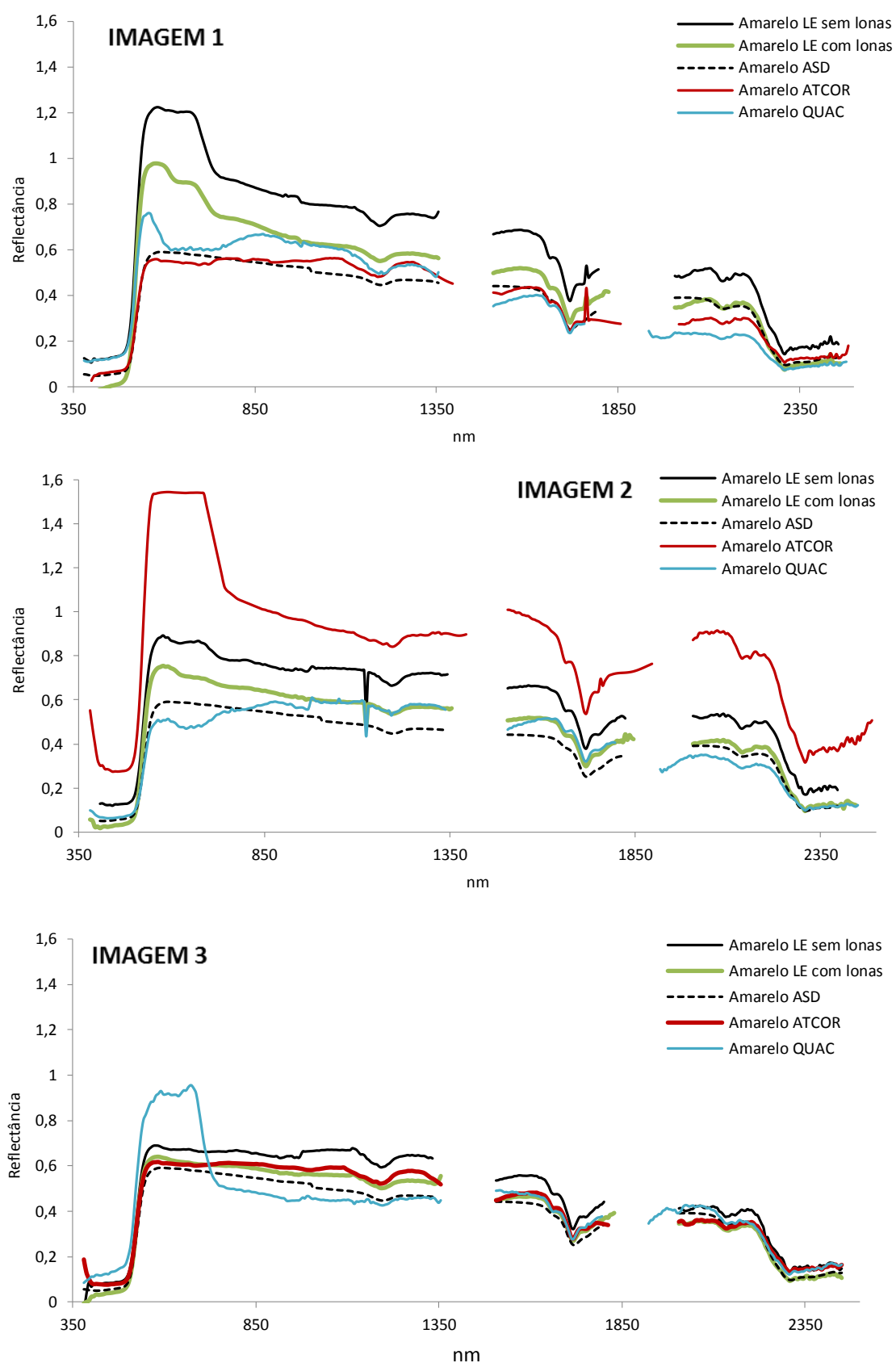


Figura 48 - Assinaturas espectrais da lona amarela, das imagens 1, 2 e 3 corrigidas pelo ATCOR-4, QUAC, LE com lonas e LE sem lonas, e a assinatura espectral coletada no campo com o sensor ASD.

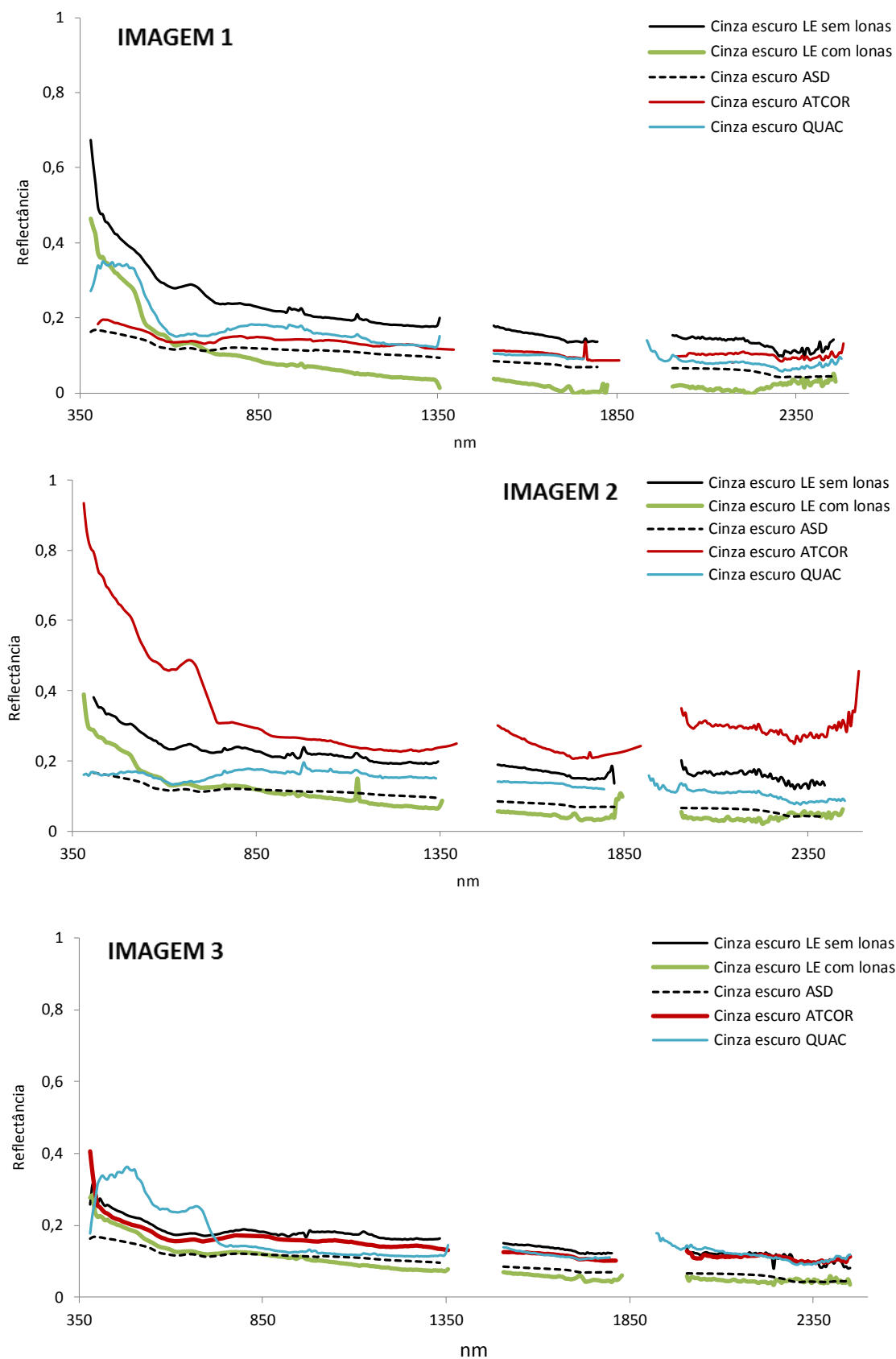


Figura 49 - Assinaturas espectrais da lona cinza escuro, das imagens 1, 2 e 3 corrigidas pelo ATCOR-4, QUAC, LE com lonas e LE sem lonas, e a assinatura espectral coletada no campo com o sensor ASD.

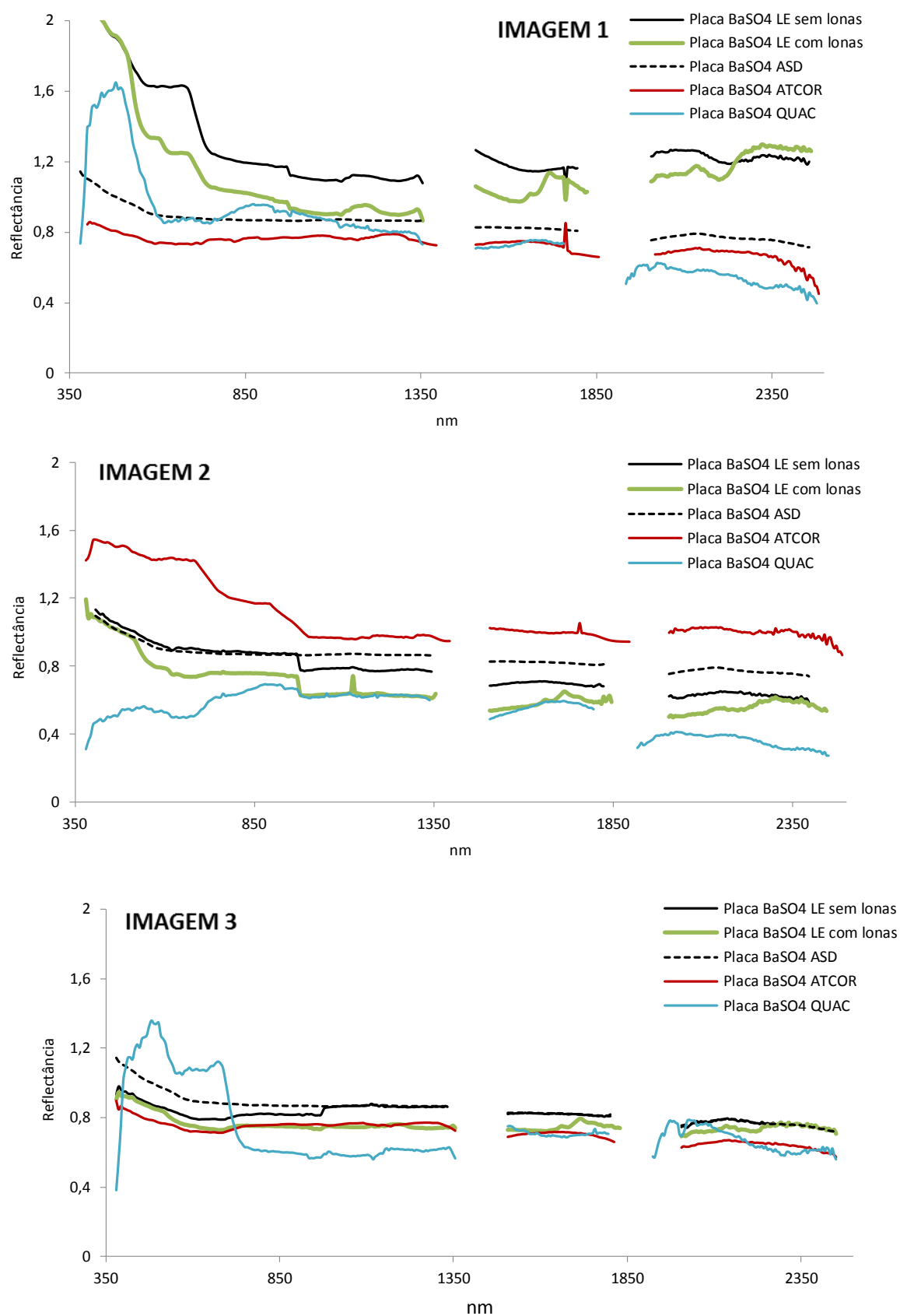


Figura 50 - Assinaturas espectrais da placa de BaSO₄, das imagens 1, 2 e 3 corrigidas pelo ATCOR-4, QUAC, LE com lonas e LE sem lonas, e a assinatura espectral coletada no campo com o sensor ASD.

Quando a média das amostras, no caso as lonas, não são consideradas estatisticamente iguais, pela análise de variância, realiza-se o teste de comparação de médias para avaliar qual das médias tiveram diferenças consideradas significativas. As diferenças nas médias demonstram que distintas imagens corrigidas pelo mesmo método podem apresentar diferenças na resposta espectral de um alvo, portanto, um mesmo método pode ter corrigido de maneiras diferentes as três imagens, caso as médias apresentem diferenças significativas.

A Tabela 13 apresenta os resultados do teste Scott-Knott para as imagens 1, 2 e 3. As imagens corrigidas pelo FLAASH não foram analisadas, devido aos resultados insatisfatórios apresentados anteriormente.

Tabela 13 – Teste de comparação de médias Scott-Knott, para as imagens 1, 2 e 3, e métodos ATCOR-4, QUAC, LE com lonas e LE sem lonas.

Tratamentos	Média dos tratamentos Lona Vermelha		Média dos tratamentos Lona Amarela		Média dos tratamentos Lona Verde	
	VIS	NIR/SWIR	VIS	NIR/SWIR	VIS	NIR/SWIR
ATCOR-4						
Imagem 1	0,183 ND	0,385 ND	0,323 ND	0,381*	0,105*	0,335*
Imagem 2	0,562*	0,754*	0,937*	0,796*	0,353*	0,750*
Imagem 3	0,213 ND	0,414 ND	0,370 ND	0,407*	0,122*	0,365*
QUAC						
Imagem 1	0,233*	0,362 ND	0,423*	0,358 ND	0,168*	0,349*
Imagem 2	0,161*	0,371 ND	0,292*	0,387 ND	0,097*	0,365 ND
Imagem 3	0,318*	0,370 ND	0,561*	0,374 ND	0,182*	0,365 ND
LE com lonas						
Imagem 1	0,265*	0,510*	0,534*	0,484*	0,145*	0,509*
Imagem 2	0,171 ND	0,412 ND	0,412*	0,436 ND	0,072*	0,413 ND
Imagem 3	0,176 ND	0,404 ND	0,359*	0,410 ND	0,082*	0,398 ND
Le sem lonas						
Imagem 1	0,396*	0,630*	0,716*	0,611*	0,226*	0,628*
Imagem 2	0,284*	0,537*	0,506*	0,554*	0,174*	0,533*
Imagem 3	0,225*	0,487*	0,408*	0,489*	0,130*	0,483*

*Apresentou diferença na média do tratamento para $p > 0,005$.

NS – Não apresentou diferença na média para $p > 0,005$.

Na correção realizada pelo ATCOR-4, a imagem 2 apresentou diferenças nas médias de todas as lonas, na região do visível e infravermelho, em relação as imagens 1 e 3. Em todas as imagens, a lona amarela, apresentou diferenças nas médias, na região do infravermelho, assim como, na lona verde, nas regiões do visível e infravermelho.

As imagens corrigidas pelo QUAC apresentaram diferenças nas médias em todas as lonas na região do visível, porém na região do infravermelho, apenas a imagem 1 apresentou diferença na lona verde.

A imagem 1 corrigida pelo método LE com lonas apresentou diferenças em todas as lonas, na região do visível e infravermelho. Já as imagens 2 e 3 apresentaram comportamentos semelhantes neste tratamento, com diferenças entre si apenas na região do visível, nas lonas amarela e verde.

As imagens corrigidas pelo método LE sem lonas apresentaram diferenças em todas as lonas, na região do visível e infravermelho.

Nenhum método de correção apresentou o mesmo comportamento nas regiões do visível e infravermelho. Os melhores resultados adquiridos foram na região do infravermelho. As imagens corrigidas pelo QUAC não apresentaram diferenças na região do infravermelho, nas lonas vermelha e amarela, assim como, as imagens 2 e 3 corrigidas pelo método LE com lonas, não apresentaram diferenças em nenhuma das lonas na região do infravermelho.

4.6 ANÁLISES DOS MÉTODOS DE CORREÇÃO ATRAVÉS DOS ÍNDICES SAM E ASDS

A Figura 51 apresenta o índice SAM para todos os alvos coletados na imagem 1 corrigida por todos os métodos analisados. O SAM analisa o ângulo espectral formado entre as assinaturas espectrais coletadas a partir da imagem corrigida e do campo, sendo que, quanto menor o valor deste ângulo, dado em radianos, melhor é a semelhança entre eles como apresentado na seção (3.3.6).

O alvo que obteve os maiores ângulos demonstrando diferenças significativas entre os dados da imagem e do campo, foi a lona azul. Os maiores ângulos espectrais foram observados nas correções utilizando o LE com lonas e o FLAASH. No método LE com lonas em alguns alvos, como nas lonas verde e vermelha os valores de SAM foram baixos, o que não ocorreu com o FLAASH não gerando resultados satisfatórios em nenhum dos alvos.

A lona cinza escuro, assim como a lona azul, demonstrou diferenças em relação aos dados da imagem e do campo, principalmente nas imagens corrigidas pelo método LE com

lonas e FLAASH, apresentando valores maiores de ângulo espectral, em relação aos outros métodos, como pode ser observado na Figura 51.

Considerando todos os alvos, o método que obteve os menores ângulos espectrais, nas correções da imagem 1 foi o ATCOR-4, seguido do LE sem lonas e do QUAC.

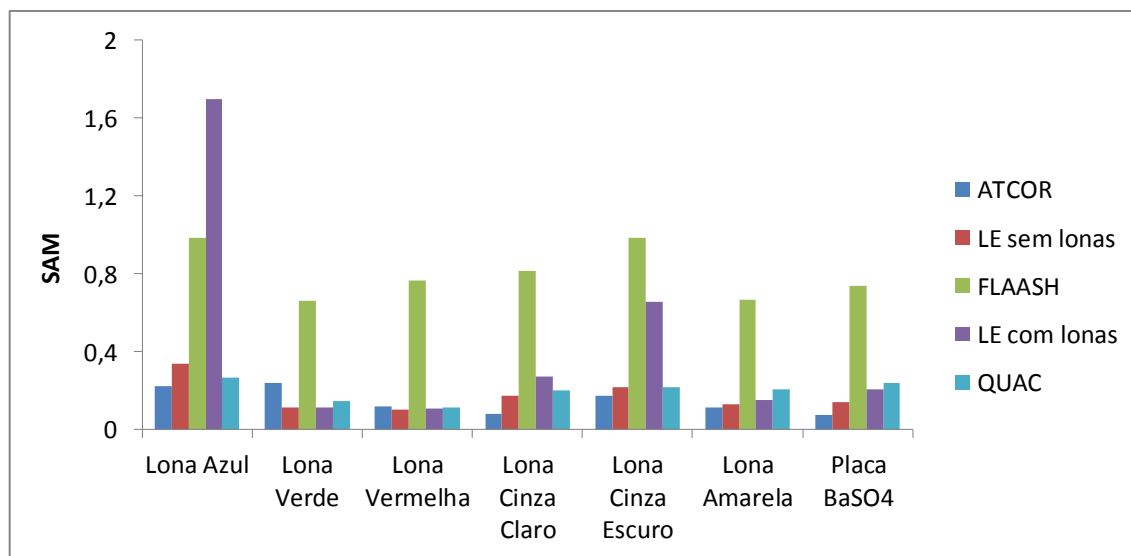


Figura 51 – Índice SAM para a Imagem 1.

A Figura 52 apresenta o índice SAM, gerado entre os dados coletados a partir da imagem 2, corrigida pelos métodos analisados e os espectros de referência coletados no campo.

O método de correção FLAASH, assim como, nas correções da imagem 1 apresentou resultados insatisfatórios, com altos valores de ângulos espectrais, demonstrando que não houve uma correção atmosférica adequada na imagem.

O índice SAM da lona azul no método LE com lonas, também foi considerado alto, muito próximo do valor obtido pelo FLAASH, apresentando diferenças significativas entre as assinaturas espectrais, da imagem e do campo. Os valores de reflectância negativos da lona azul, na correção da imagem 2 pelo método LE com lonas, resultou nos altos valores de índice SAM apresentados na Figura 52.

Os métodos de correção ATCOR-4, LE sem lonas e LE com lonas, apresentaram os melhores resultados em relação ao índice SAM, com exceção das lonas azul e cinza escuro, que no LE com lonas, apresentou valores de reflectância negativos.

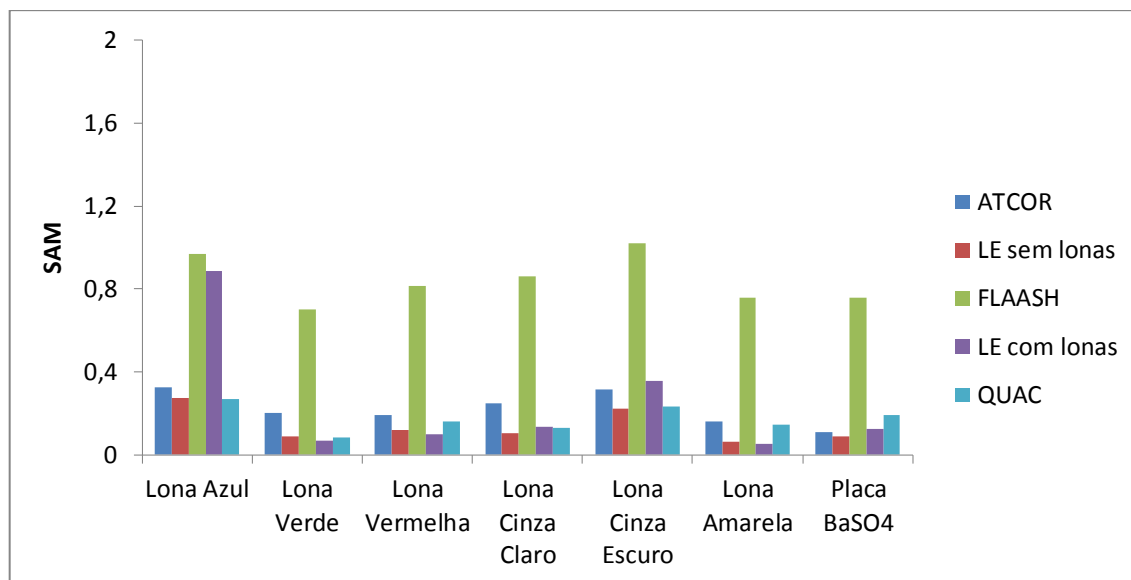


Figura 52 – Índice SAM para análise da imagem 2.

A Figura 53 apresenta o índice SAM para todos os alvos coletados, em todos os métodos de correção da imagem 3.

As correções realizadas pelo FLAASH na imagem 3 apresentaram resultados ruins, assim como, as correções realizadas nas imagens 1 e 2.

O índice SAM das lonas azul, cinza claro, cinza escuro e da placa de BaSO₄, na imagem 3, foram menores a partir da correção realizada pelo ATCOR-4. Já os menores valores de índice SAM das lonas verde, vermelha e amarela, foram adquiridos a partir da imagem 3 corrigida pelo método LE com lonas.

Os métodos de correção LE sem lonas e o QUAC, de modo geral, também tiveram baixos valores de índice SAM.

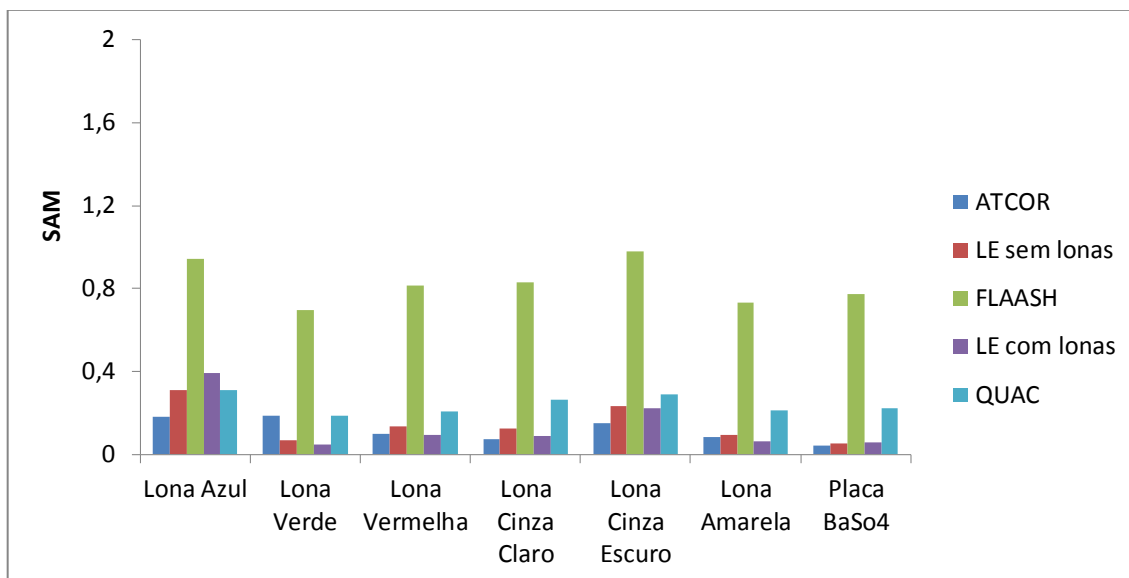


Figura 53 - Índice SAM para análise da imagem 3.

A Figura 54 apresenta os índices ASDS para a imagem 1 corrigida pelos cinco métodos analisados. O índice ASDS avalia a qualidade da correção atmosférica através de uma equação que relaciona as assinaturas espectrais coletadas após a correção das imagens e as assinaturas espectrais coletadas no campo com o espectrorradiômetro, com visto anteriormente na seção (3.3.6).

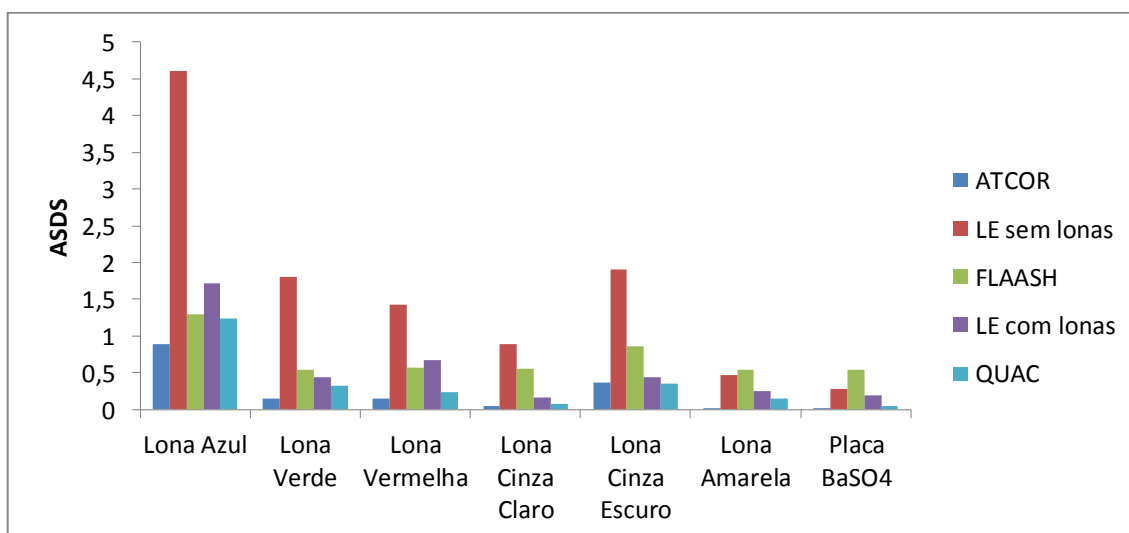


Figura 54 - Índice ASDS para a Imagem 1.

Na correção da imagem 1, o método LE sem lonas foi considerado o pior método de correção na maioria dos alvos, exceto para a lona amarela e para a placa de BaSO₄ que tiveram como pior método de correção o FLAASH.

As lonas azul e cinza escuro, assim como, citado anteriormente no índice SAM, apresentaram altos índices ASDS, demonstrando falta de similaridade entre os dados da imagem corrigida e do campo.

Os menores índices ASDS, apresentados foram para os métodos QUAC e ATCOR-4 na lona cinza claro e na placa de BaSO₄. O ATCOR-4 em comparação aos outros métodos foi o que apresentou os melhores resultados em todos os alvos, no desempenho da correção da imagem 1.

Na imagem 2, a correção atmosférica realizada pelo ATCOR-4 não apresentou resultados satisfatórios, como pode ser visto na Figura 55. Os índices ASDS dos alvos adquiridos a partir da correção do ATCOR-4 foram considerados altos em todos os alvos, principalmente nas lonas azul e cinza escuro. Os índices ASDS para o FLAASH também foram considerados altos, mostrando uma má correção atmosférica da imagem 2 utilizando este método.

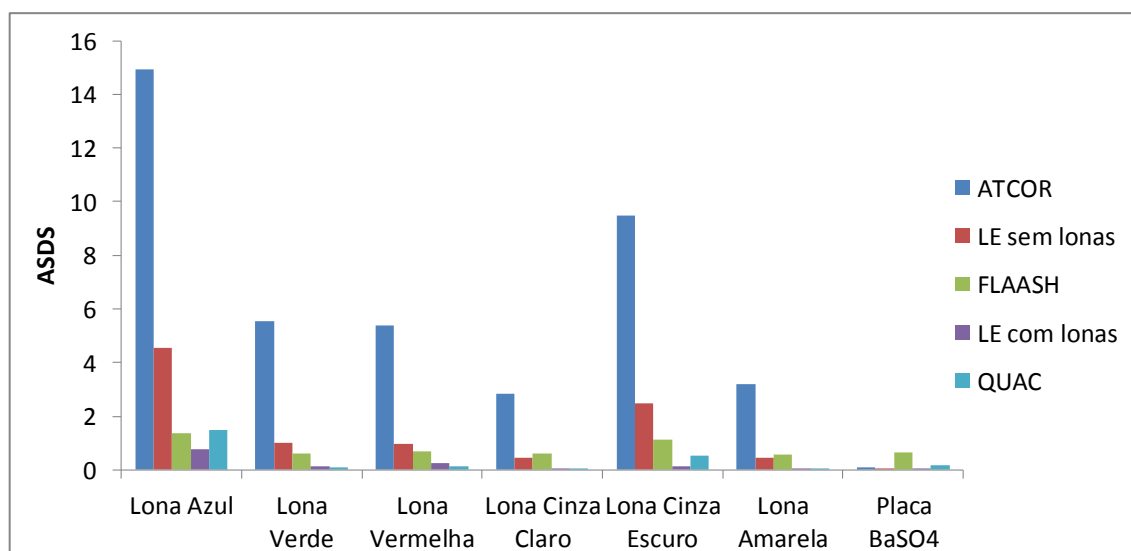


Figura 55 – Índice ASDS para análise da correção atmosférica da imagem 2.

O método LE com lonas foi considerado o método de correção mais adequado para as lonas azul, cinza claro e cinza escuro. Já o QUAC foi considerado o melhor método de

correção das lonas verde, vermelha e amarela. Para a placa de BaSO₄ o menor índice ASDS apresentado foi utilizando o método LE sem lonas. Os resultados notáveis da placa de BaSO₄ pelo método LE sem lonas, possivelmente foram influenciados, devido a utilização da placa de BaSO₄ no processamento dos dados, já que para os outros alvos este método não obteve avaliação satisfatória.

Os altos valores do índice ASDS para o ATCOR-4 na Figura 55, podem ser devido aos dados coletados na imagem 2 que apresentaram superestimação em relação aos dados de campo, principalmente na região do visível, possibilitando os altos valores no índice ASDS neste método.

Os resultados apresentados do índice ASDS, para todos os métodos de correção da imagem 3, podem ser observados na Figura 56.

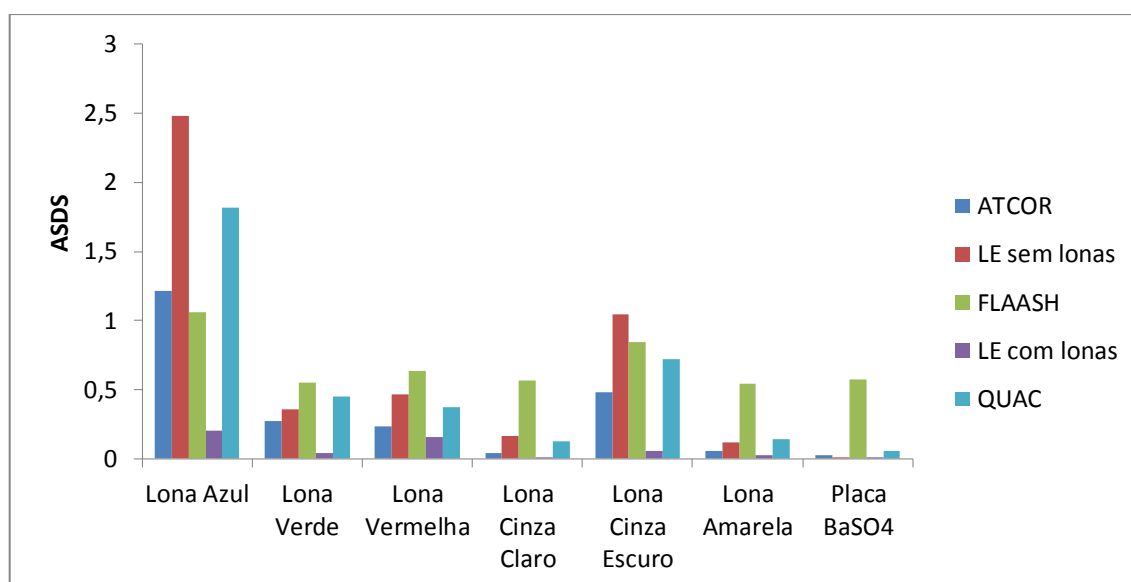


Figura 56 - Índice ASDS para análise da correção atmosférica da imagem 3.

Na Figura 56 em todos os métodos, os índices ASDS da lona azul foram considerados altos, com exceção, dos resultados obtidos através do método LE com lonas. A lona cinza escuro também apresentou resultados insatisfatórios em relação aos métodos de correção citados anteriormente, exceto no método LE com lonas.

O FLAASH não apresentou resultados satisfatórios na correção da imagem 3, da mesma forma que não apresentou nas imagens 1 e 2 em nenhum dos alvos.

O método que apresentou o melhor desempenho na correção da imagem 3, com os menores valores de índice ASDS foi o LE com lonas, considerado, portanto, o melhor método de correção desta imagem, em relação aos alvos lonas. Já para a placa de BaSO₄, o menor índice ASDS apresentado foi o do método LE sem lonas, assim como, ocorreu na imagem 2 (Figura 55).

4.7 TESTE DA CORREÇÃO ATMOSFÉRICA NA IMAGEM 4

Nas Figura 57 e 58 são apresentadas as curvas espectrais das espécies arbóreas coletadas no campo com o sensor ASD e a partir da imagem 4 corrigida utilizando diferentes metodologias.

A curva espectral do Ipê Roxo coletada a partir da imagem corrigida pelo ATCOR-4 não calibrado e do QUAC tiveram características espectrais muito semelhantes. A curva espectral obtida a partir do ATCOR-4 calibrado apresentou características similares em relação à curva espectral coletada com o sensor ASD no campo.

A curva espectral do Ipê Roxo adquirida a partir da imagem corrigida pelo método Linha Empírica, apresentou valores negativos em algumas regiões do espectro eletromagnético, demonstrando erros na correção atmosférica da imagem, como já era esperado, devido aos valores negativos na resposta espectral das lonas azul e cinza escuro que ocorreram na correção na imagem 2 e que podem ter influenciado a correção da imagem 4.

Os resultados para as curvas espectrais da Mangueira foram semelhantes ao do Ipê Roxo, com uma diferença apenas nos dados do ATCOR-4 calibrado que, na região entre 800nm e 1200nm, a curva espectral coletada a partir da imagem apresentou algumas diferenças de amplitude com relação à curva espectral coletada com o sensor ASD.

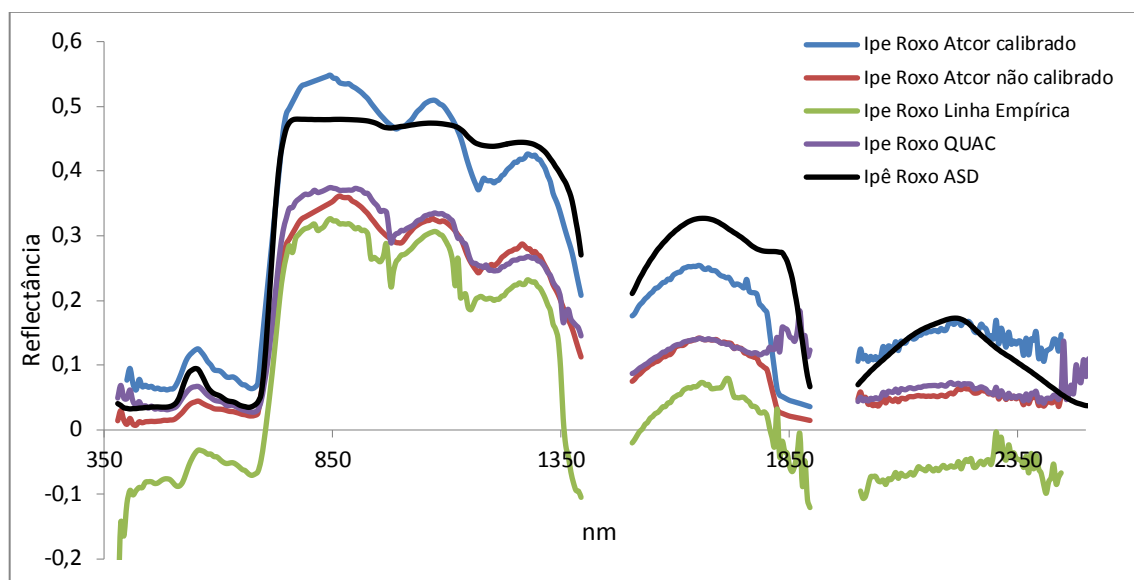


Figura 57 - Comparação entre as assinaturas espectrais do Ipê Roxo geradas a partir da imagem 4 corrigida pelos métodos ATCOR-4, Linha Empírica e QUAC e as geradas pelo espectrorradiômetro FieldSpec-3.

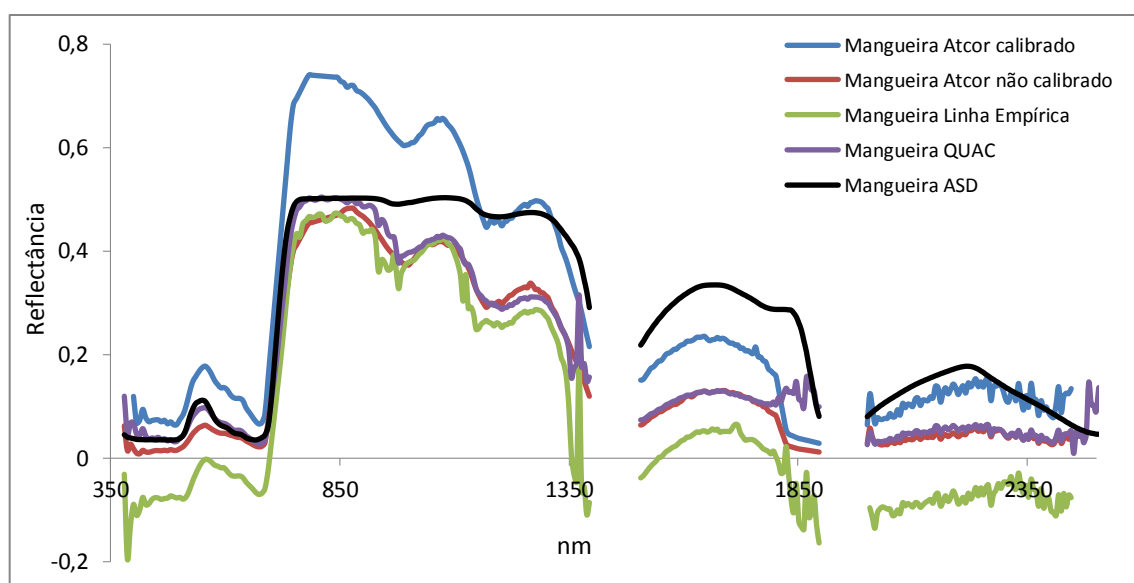


Figura 58 - Comparação entre as assinaturas espectrais da Mangueira geradas a partir da imagem 4 corrigida pelos métodos ATCOR-4, Linha Empírica e QUAC e as geradas pelo espectrorradiômetro FieldSpec-3.

A Tabela 14 apresenta os testes realizados comparando as curvas espectrais do Ipê Roxo coletadas a partir das imagens corrigidas e do campo. O método que obteve o maior coeficiente de correlação na região do visível foi o do ATCOR-4 calibrado. Já na região do infravermelho a maior correlação foi a do método ATCOR-4 não calibrado, porém em todos os outros métodos as correlações também foram significativas com valores superiores a 0,9.

No teste de significância todas as correlações foram consideradas significativas na região do visível e do infravermelho. No Apêndice A são apresentados os gráficos de correlação de Pearson descritos na Tabela 14.

Tabela 14 - Resultados do coeficiente de correlação de Pearson, coeficiente de determinação e teste de hipótese para o Ipê Roxo.

Ipê Roxo						
	R		R ²		Teste t	
	VIS	NIR/SWIR	VIS	NIR/SWIR	VIS	NIR/SWIR
ATCOR calibrado	0,903	0,927	0,815	0,859	13,751*	40,169*
ATCOR não calibrado	0,811	0,944	0,657	0,892	9,391*	46,803*
LE calibrado	0,467	0,935	0,218	0,875	3,583*	42,973*
QUAC	0,774	0,928	0,599	0,862	8,293*	41,475*

* Correlação considerada significativa através do Teste t com $p > 0,005$.

A Tabela 15 apresenta os resultados dos testes realizados comparando as curvas espectrais da Mangueira coletadas a partir das imagens corrigidas e do campo. Assim, como nas correlações do Ipê Roxo, o método ATCOR-4 calibrado apresentou a maior correlação na região do visível. No entanto, na região do infravermelho a maior correlação foi a do método ATCOR-4 não calibrado, sendo que, em todos os outros métodos analisados as correlações também foram altas, com valores superiores a 0,9.

No teste de significância todas as correlações foram consideradas significativas na região do visível e do infravermelho. No Apêndice A são apresentados os gráficos de correlação de Pearson descritos na Tabela 15.

Tabela 15 - Resultados do coeficiente de correlação de Pearson, coeficiente de determinação e teste de hipótese para a Mangueira.

Mangueira						
	R		R ²		Teste t	
	VIS	NIR/SWIR	VIS	NIR/SWIR	VIS	NIR/SWIR
ATCOR calibrado	0,920	0,914	0,846	0,835	15,382*	36,610*
ATCOR não calibrado	0,818	0,927	0,669	0,860	9,645*	40,292*
LE calibrado	0,691	0,922	0,478	0,851	6,488*	38,786*
QUAC	0,829	0,905	0,687	0,820	10,039*	35,426*

* Correlação considerada significativa através do Teste t com $p > 0,005$.

A Figura 59 apresenta o índice SAM para as espécies arbóreas Ipê Roxo e Mangueira. Os métodos analisados foram o ATCOR-4 calibrado, ATCOR-4 não calibrado, LE calibrado e o QUAC. Os resultados entre os métodos ATCOR-4 calibrado, ATCOR-4 não calibrado e QUAC foram muito semelhantes, porém o ATCOR-4 calibrado apresentou entre os três métodos, os menores índices SAM, seguido dos métodos QUAC e ATCOR-4 sem calibração, respectivamente.

O método LE calibrado apresentou os piores resultados do índice SAM, demonstrando a pouca eficiência do método, na correção desta imagem.

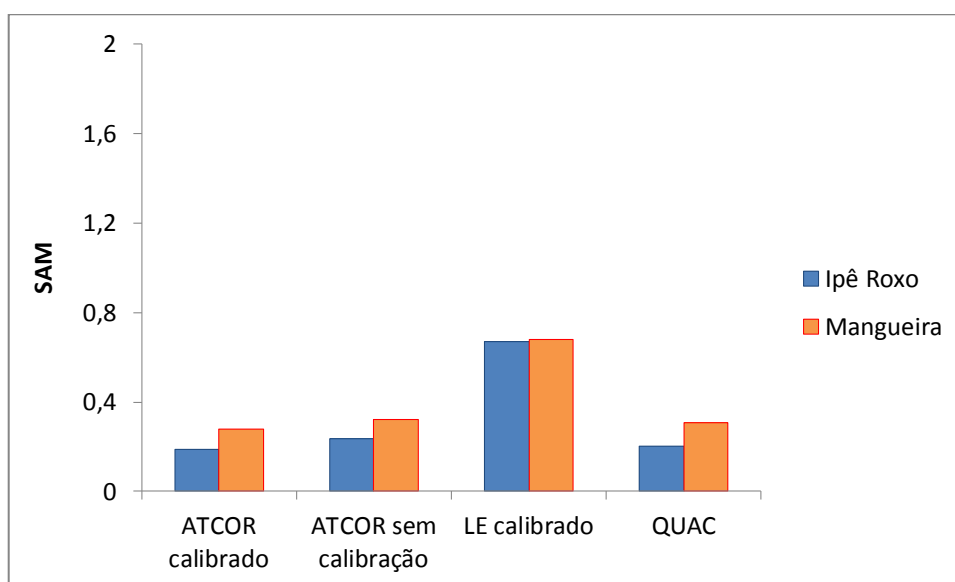


Figura 59 - Índice SAM para análise da correção atmosférica da imagem 4.

A Figura 60 apresenta o índice ASDS para as espécies arbóreas Ipê Roxo e Mangueira, analisando o desempenho da correção atmosférica realizada na imagem 4. Como observado, o ATCOR-4 calibrado foi o método com menores valores do índice ASDS, seguido do método QUAC e ATCOR-4 sem calibração.

O método LE calibrado, assim como, no índice SAM apresentou resultados insatisfatórios, demonstrando que a metodologia foi incapaz de corrigir a imagem 4 de maneira adequada.

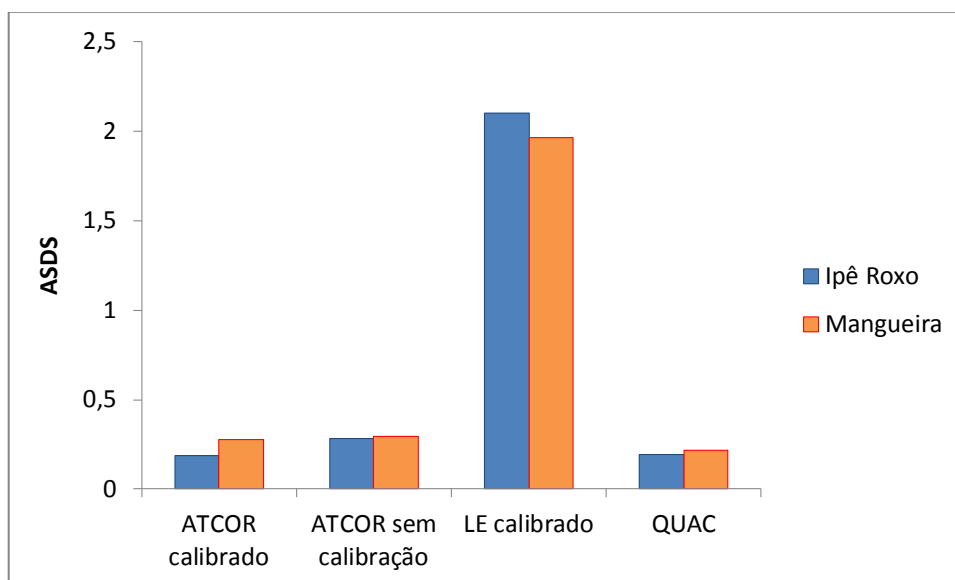


Figura 60 - Índice ASDS para análise da correção atmosférica da imagem 4.

Muitas influências no método LE podem proporcionar erros nas correções realizadas por este método como, por exemplo, horários diferentes da tomada as imagens e em condições atmosféricas diferentes. As diferenças, em relação à umidade de cada região, também podem ter provocado erros na correção da imagem pelo método LE calibrado. Na região da imagem 4 há áreas florestais úmidas com alta capacidade de evapotranspiração, além da presença de cursos de água, que influenciam na quantidade de vapor de água presente na região. Todos estes fatores podem ter influenciado os resultados insatisfatórios apresentados pelo LE calibrado.

Estudos realizados por Ben dor et. al. (2004) demonstraram que ao utilizar o método LE para a correção de imagens do sensor AVIRIS, verificou-se que a seleção de alvos de calibração em regiões com um teor reduzido de vapor de água melhoram a qualidade das correções. Em análises temáticas usando um classificador SAM, mesmo em condições não ideais, a correção LE produziu uma capacidade de mapeamento espacial razoável, dessa forma, concluiu-se que o método LE deve ser usado sobre regiões com baixas quantidades de vapor de água, para fornecer informações de reflectância mais precisas. Além disso, constatou-se a não obrigatoriedade em selecionar alvos de calibração sem características espectrais ou caracterizados por baixa ou alta resposta espectral.

5. CONCLUSÃO

A lona azul, de modo geral, apresentou em todos os processamentos resultados não satisfatórios ou valores inferiores aos encontrados para as outras lonas, principalmente na região do infravermelho. Uma das possíveis causas para estes resultados deve-se, ao fato do azul sofrer muita influência dos efeitos de espalhamento atmosférico, provocando, consequentemente, o aumento de ruídos na curva espectral.

As lonas amarela, verde e vermelha apresentaram as melhores correlações em todas as imagens e na maioria dos métodos, demonstrando serem alvos eficazes para a calibração do método Linha Empírica, além dos alvos escuros e brilhantes, necessários na equação de predição da correção atmosférica.

A placa de BaSO_4 contribuiu para a melhoria na correção atmosférica, como foi apresentado nas correções realizadas na imagem 4, onde as correlações, os índices SAM e ASDS demonstraram qualidade superior na correção utilizando o ATCOR-4 calibrado.

O algoritmo de correção FLAASH com os parâmetros utilizados, não gerou resultados satisfatórios em nenhuma das imagens, demonstrando não ser o algoritmo mais adequado para realização de correções atmosféricas, nas condições adotadas neste trabalho.

O algoritmo QUAC apesar de não utilizar-se de parâmetros externos para realizar o processo de correção atmosférica, gerou resultados satisfatórios, com boas correlações, e baixos índices SAM e ASDS na maioria das lonas.

O ATCOR-4 não apresentou na maioria dos alvos, as maiores correlações, mas obteve resultados homogêneos em relação à correção das três imagens (1, 2, 3).

O teste de comparação de médias apresentou divergências entre as imagens corrigidas pelo mesmo método. Os métodos que se destacaram foram o QUAC, que não apresentou diferenças entre as imagens na região do infravermelho, nas lonas vermelha e amarela, e o método LE com lonas, que não apresentou diferenças entre as três imagens na região infravermelho, em nenhuma das lonas.

As metodologias aplicadas na imagem 4 demonstraram que a calibração radiométrica do ATCOR-4 melhorou as correções realizadas, mesmo o arquivo de calibração não sendo da

própria imagem. Já o LE calibrado não apresentou resultados satisfatórios, demonstrando não ser uma metodologia adequada para a correção atmosférica, em condições climáticas diversas, como nas imagens 4 e 2. Novos estudos devem ser realizados, com o LE calibrado, em diferentes imagens com condições climáticas semelhantes.

A hipótese apresentada neste trabalho pode ser validada, pois o método Linha Empírica utilizando lonas no processo de calibração apresentou altas correlações na maioria dos alvos estudados. A utilização das lonas no processo de calibração proporcionou a diminuição de alvos com valores superestimados, ocasionadas no método Linha Empírica sem lonas, exceto nas lonas azul e cinza escuro, que apresentaram valores de reflectância negativos, na correção pelo método LE com lonas.

O método Linha Empírica pode ser aprimorado, melhorando-se a qualidade dos dados inseridos, na geração da equação de correção atmosférica. A aplicação de filtros como o filtro de média móvel (TSAI; PHILPOT, 1998) e o filtro Savitzky-Golay (SAVITZKY; GOLAY, 1964), podem aprimorar a metodologia e melhorar a qualidade dos resultados. Para trabalhos posteriores recomenda-se a aplicação destes filtros, minimizando possíveis ruídos grosseiros e aleatórios na coleta dos dados, e processamento dos mesmos.

Os estudos realizados neste trabalho poderão auxiliar em trabalhos futuros utilizando as imagens do sensor AisaFENIX, já que não existiam estudos até o momento, para a correção atmosférica das imagens adquiridas do sensor AisaFENIX em condições tropicais, como no Brasil. A escolha do melhor método de correção atmosférica torna-se essencial para a caracterização adequada de diferentes tipos de vegetação, superfícies aquáticas, tipos de solos e de minerais. Trabalhos como o de Campos (2017) que utilizou imagens do sensor AisaFenix na discriminação de espécies arbóreas nativas e exóticas, tiveram como contribuição os estudos de correção atmosférica, com o intuito de melhorar a qualidade das imagens e consequentemente os resultados do trabalho.

REFERÊNCIAS

ABREU, L.W.; ANDERSON, G.P. **The MODTRAN 2/3 Report and LOWTRAN7 MODEL**. 1996. Disponível em: <<http://www.gps.caltech.edu/~vijay/pdf/modrept.pdf>>. Acesso em: 29.jan.2017.

ACORNTM. **Atmospheric Correction Now. Analytical Imaging and Geophysics LLC** Version 4.2002.

ADLER-GOLDEN, S., BERK, A.; BERNSTEIN, L. S., RICHTSMEIER, S., ACHARYA, P.K., MATTHEW, M. W., ANDERSON, G. P., ALLRED, C. L., JEONG, L. S. & CHETWYND, J. H. (1998), Flaash a MODTRAN4 Atmospheric Correction Package for Hyperspectral Data Retrievals and Simulations. **Summaries of the Seventh JPL Airborne Earth Science Workshop**, JPL Publ. 97-21, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA, Vol. 1, p.9-14.

ATCOR-4. **ATCOR-4 User Guide**. Versão 6.2 Beta. 2012. Disponível em: <http://www.rese.ch/pdf/atcor4_manual.pdf>. Acesso em: 30.jan.2017.

BARNESLEY, M. J.; SETTLE, J.J.; CUTTER, M. A.; LOBB, D.R.; TESTON, F. The PROBA/CHRIS MISSION: A low-cost smallsat for hyperspectral multiangle observations of the earth surface and atmosphere. **IEEE Transactions On Geoscience and Remote Sensing**. 42, 1512–1520. 2004.

BEN DOR, E., KINDEL, B., & GOETZ, A. F. H. Quality assessment of several methods to recover surface reflectance using synthetic imaging spectroscopy data. **Remote Sensing of Environment**, 90, 389–404. 2004.

BEN DOR, E.; KINDEL, B. C.; PATKIN, K. A comparison between six model-based methods to retrieve surface reflectance and water vapor content from hyperspectral data: A case study using synthetic AVIRIS data. **Á Presented at International Conference on Optics and Optoelectronics Á ICOL**. 2005.

BERNSTEIN L.; ADLER GOLDEN, S.M.; SUNDBERG, R.L.; LEVINE, R.Y.; PERKINS, T.C.; BERK, A.; RATKOWSKI, A.J.; FELDE,G.; HOKE, M.L.Validation of the Quick Atmospheric Correction (QUAC) algorithm for VNIR-SWIR multi-and hyperspectral imagery. **Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery XI**. doi: 10.1117/12.603359. 2005.

BORENGASSER, M.; HUNGATE, W. S.; WATKINS, R. **Hyperspectral Remote Sensing: Principles and Applications**. Taylor & Francis Group. 119p. 2008.

BOVO, M. C.. **Áreas verdes urbanas, imagem e uso: um estudo geográfico sobre a cidade de Maringá** – PR. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade Ciências e Tecnologia, 324f. 2009.

BROOK, A.; BEN DOR, E. Supervised vicarious calibration (SVC) of hyperspectral remote-sensing data. **Remote Sensing of Environment**, 115, 1543-1555. 2011.

CALIGEO-PRO. **SPECIM Caligeo PRO 2.2 User Guide**. SPECIM. 2013.

CAMPOS, T. L de L. **Discriminação de espécies arbóreas nativas da Floresta Estacional Semidecidual e da exótica *Eucalyptus urograndis* W. Hill ex Maiden utilizando dados hiperespectrais**. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade Estadual de Maringá (UEM), Maringá, 121f, 2017.

CRÓSTA A. P.; SOUZA FILHO C. R. de. Evaluating AVIRIS hyperspectral remote sensing data for geological mapping in laterized terranes, Central Brazil. **Twelfth International Conference on Applied Geologic Remote Sensing**, Denver, *Proceedings*, 2: 430-437. 1997.

CRÓSTA, A. P.; SOUZA FILHO, C. R. de. Hyperspectral remote sensing for mineral mapping: a case-study at Alto Paraíso de Goiás, Central Brazil. **Revista Brasileira de Geociências**. 30(3): 551-554. 2000.

D'ALGE, Júlio César Lima. **Geoprocessamento - Teoria e Aplicações** - Parte I - Cap. 6 - Cartografia para Geoprocessamento. INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2001. Disponível em: <www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/> Acesso em 28 jan. 2017.

DE JONG, S. M.; VAN DER MEER, F. D. **Remote Sensing Image Analysis**. Springer. 360p. 2005.

ENVI. **Guia do ENVI em português**. 2012. Disponível em: <<http://www.envi.com.br/index.php/downloads>>. Acesso em: 15 fev. 2016.

FELDE, G. W.; ANDERSON, G.P.; GARDNER, J.A.; ADLER-GOLDEN, S.M.; MATTHEW M. W.; BERK, A. Water vapor retrieval using FLAASH atmospheric correction algorithm. **Proceedings of the spie defense and security symposium**, Orlando, Florida, 12-16 abril, 2004.

FLAASH e QUAC. **Atmospheric Correction Module: QUAC and FLAASH User's Guide**. ENVI. 2009.

GAO, B.C., HEIDEBRECHT, K. B., GOETZ, A. F. H.. Derivation of scaled surface reflectances from AVIRIS data. **Remote Sensing of Environment**, 44, 165- 178. 1993.

GAO, B. C.; MONTES, M. J.; AHMAD, Z.; DAVIS, C. O. Atmospheric correction algorithm for hyperspectral remote sensing of ocean color from space. **Optical Society of America**. Vol. 39, nº 6. 2000.

GAO, B.; MONTES, M. J.; DAVIS, C. O.; GOETZ, A. F.H. Atmospheric correction algorithms for hyperspectral remote sensing data of land and ocean. **Remote Sensing of Environment**, 113, S17-S24. 2009.

GOETZ, A. F. H. Three decades of hyperspectral remote sensing of the Earth: a personal view. **Remote Sensing of Environment**, 113, S5-S16. 2009.

GOETZ, A. F. H.; VANE, G.; SOLOMON, J.; ROCK, B. N. Imaging spectrometry for Earth remote sensing. **Science**, 228, 1147–1153. 1985.

GREEN, R. O. **Summaries of the Seventh JPL Airborne Earth Science Workshop January 12-16**. Volume 1, AVIRIS Workshop. JPL Publication 97-21, 1998.

HADJIMITSIS, D. G.; CLAYTON, C. R. I.; HOPE, V. S. An assessment of the effectiveness of atmospheric correction algorithms through the remote sensing of some reservoirs. **International Journal of Remote Sensing**. Vol. 25, nº 18, 3651-3674. 2004.

JABLONSKI, J.; DURELL, C.; SLONECKER, T.; WONG, K.; SIMON, B.; EICHELBERGER, A.; OSTERBERG, J. Best Practices in Passive Remote Sensing VNIR Hyperspectral System Hardware Calibrations. **Hyperspectral Imaging Sensors: Innovative Applications and Sensor Standards**. doi: 10.1117/12.2224022. 2016.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. Tradução de José Carlos N. Epiphânio, Antonio R. Formagio, Athos R. Santos, Bernardo F. T. 138 Rudorff, Cláudia M. Almeida e Lênio S. Galvão. 2. ed. São José dos Campos, SP: Editora Parêntese, 598 p. 2009.

KARPOUZLI, E.; MALTHUS, T. The empirical line method for the atmospheric correction of IKONOS imagery. **International Journal of Remote Sensing**, 24, pp. 1143–1150. 2003.

KAUFMAN, YORAM J. The atmospheric effect on remote sensing and its correction. **Theory and applications of optical remote sensing**, Ed. G Asrar, New York, John Wiley & Sons, p. 336-428, 1989.

KAWISHWAR, P. **Atmospheric Correction Models for Retrievals of Calibrated Spectral Profiles from Hyperion EO-1 Data**. 2007. Dissertação (Mestrado em Geoinformática). International Institute For Geo-Information Science And Earth Observation Enschede, The Netherlands And Indian Institute Of Remote Sensing, National Remote Sensing Agency (Nrsa), Department Of Space, Government Of India, Dehra Dun, India.

KRUSE, F. A.; LEFKOFF, A. B.; BOARDMAN, J. W.; HEIDEBRECHT, K. B.; SHAPIRO, A. T.; BARLOOM, P. J.; GOETZ, A. F. H. The spectral image processing system (SIPS) - interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data. **Remote Sensing of Environment**, 44:145-163.1993.

KRUSE, F.A., BOARDMAN, J.W. AND HUNTINGTON, J.F. **Final Report: Evaluation and Geologic Validation of EO-1 Hyperion**, NASA. 2003.

KRUSE, F. A. Comparison of ATREM, ACORN, and FLAASH atmospheric corrections using low-altitude AVIRIS data of Boulder. **Summaries of 13th JPL Airborne Geoscience Workshop**, Jet Propulsion Lab, Pasadena, CA. 2004.

LATORRE, M; JÚNIOR, O. A. de C.; CARVALHO, A. P. F. de; SHIMABUKURO, Y. E. **Correção Atmosférica: Conceitos e Fundamentos**. **Espaço & Geografia**, Vol.5, Nº1, 153:178. ISSN: 1516-9375.2002.

LENOT, X; ACHARD, V.; POUTIER, L. SIERRA: A new approach to atmospheric and topographic corrections for hyperspectral imagery. **Remote Sensing of Environment**. 113, 1664-1677. doi:10.1016/j.rse.2009.03.016. 2009.

LILLESAND, T.M.; KIEFER, R.W.; CHIPMAN, J. W. **Remote Sensing and Image Interpretation**. Ed. 4º. New York. John Wiley & Sons. 2007.

ROTTA, L. H. S.; ALCÂNTARA, E. H.; WATANABE, F. S. Y.; RODRIGUES, T. W. P.; IMAI, N. I. Atmospheric correction assessment of SPOT-6 image and its influence on models to estimate water column transparency in tropical reservoir. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**. 4, 158-166. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rsase.2016.09.001>. 2016.

MAACK, R. **Geografia Física do Estado do Paraná**. Rio de Janeiro, José Olímpio, 1981.

MARKELIN, L.; SIMIS, S.G.H.; HUNTER, P.D.; SPYRAKOS, E.; TYLER, A.N.; CLEWLEY, D.; GROOM, S. Atmospheric Correction Performace of Hyperspectral Airbone Imagery over a Small Eutrophic Lake under Changing Cloud Cover: **Remote Sensing**. 9, 2; doi:10.3390/rs9010002. 2016.

MATTHEW, M. W.; ADLER-GOLDEN, S. M.; BERK, A.; FELDE, G.; ANDERSON, G. P.; GORODETZKY, D; PASWATERS, S.; SHIPPERT, M. **Atmospheric Correction of Spectral Imagery: Evaluation of the FLAASH Algorithm with AVIRIS Data**. IEEE Applied Imagery Pattern Recognition Workshop (AIPR.02). 0-7695-1863-X/02. 2002.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. de. (Org.). **Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Ed. 1. v 1. Brasília: UnB/CNPq. 2012.

MILTON, E. J. Review Article Principles of field spectroscopy. **International Journal of Remote Sensing**. 8:12, 1807-1827. 1987.

MIYOSHI, G. **Caracterização espectral de espécies de mata atlântica de interior em nível foliar e de copa**. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas). Universidade Estadual Paulista (UNESP), Campus de Presidente Prudente, 143f, 2016.

MORAN, M. S., BRYANT, R., THOME, K., NI, W., NOUVELLON, Y., GONZALEZ-DUGO, M. P., QI, J. & CLARKE, T. R. A refined empirical line approach for reflectance factor retrieval from Landsat-5 TM and Landsat-7 ETM+. **Remote Sensing of Environment**. 78:71–82. 2001.

MOSES, W.J.; GITELSON, A.A.; PERK, R.L.; GURLIN, D.; RUNDQUIST, D.C.; LEAVITT, B.C.; BARROW, T.M.; BRAKHAGE, P. Estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters using airborne hyperspectral data. **Water Research**. 46, 993–1004. 2012.

NOGUEIRA, J. L. M.; MORAES E. C.; BASTOS, E. J. B.; ESPOSITO, E. S. C.; FREIRE, M. L. F. Reflectância de uma superfície vegetada em função da geometria de aquisição. **VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Salvador, Brasil, p. 941-949. 1996.

NOVO, E. M. L. de M. **Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações**. 4ª edição, Blucher, 2010.

O'NEILL, N.T.; ROYER A.; NGUYN M.N. **Canadian Advanced Modified 5S (CAM5S) Internal Report**. Centre d'application et de recherches en teledetection (CARTEL), CARTEL-1996-0202, Universite Sherbrooke, Quebec Canada. 1966.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento remoto da vegetação**. Oficina de Textos, 2015.

QU, Z.; KINDEL, B. C.; GOETZ, A. F. H. The high accuracy atmospheric correction for hyperspectral data (HATCH) model. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, Vol. 41, p.1223–1231, 2003.

RICHTER, R. Atmospheric correction of dais hyperspectral image data. **Computers & Geosciences**. Vol. 22, nº7, pp. 785-793. 1996.

RICHTER, R.; SCHLÄPFER, D. Geo-atmospheric processing of airborne imaging spectrometry data. Part 2: atmospheric/topographic correction. **Int. J. Remote Sensing**. 23:2631-2649. 2002.

SAVITZKY, A.; GOLAY, M. J. E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. **Analytical chemistry**, v. 36, n. 8, p. 1627-1639, 1964.

SCOTT, A. J.; KNOTT, M. A cluster analysis method for grouping means in the analysis of variance. **Biometrics**. Vol. 30, pp. 507-512. 1974.

SLATER, P. N. **Remote sensing: optics and optical systems**. Reading: Addison-Wesley, 575p. 1980.

SLATER, P. N.; JACKSON, R. D. Atmospheric effects on radiation reflected from soil and vegetation as measured by orbital sensors using various scanning directions. **Applied Optics**. Vol. 21, nº 21. 1982.

SMITH, G.M.; MILTON, E. J. The use of the empirical line method to calibrate remotely sensed data to reflectance. **International Journal of Remote Sensing**. v. 20, n. 13, p. 2653-2662, 1999.

SOARES, A. R. **Avaliação da correção atmosférica em imagens orbitais utilizando dados de modelo de PNT**. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação). Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Recife, 115f, 2014.

SOUZA FILHO C.R. de. **Sensoriamento Remoto Hiperespectral**. Disponível em: <<http://mundogeo.com/blog/2004/08/23/sensoriamento-remoto-hiperespectral/>> Acesso em: 23 de fevereiro de 2016.

SPECIM. **AisaFENIX hyperspectral sensor**. Disponível em: <<http://www.specim.fi/index.php/products/airborne/aisafenix>>. Acesso em: 27 dez. 2016.

STABEN, G.W.; PFITZNER, K.; BARTOLO, R.; LUCIEER, A. Empirical line calibration of WorldView-2 satellite imagery to reflectance data: using quadratic prediction equations. **Remote Sensing Letters**, 3:6, 521-530. 2012.

TSAI, F.; PHILPOT, W. Derivative Analysis of Hyperspectral Data. **Remote Sensing of Environment**, v. 66, p. 41–51, 1998.

UNGAR, S. G.; PEARLMAN, J. S.; MENDENHALL, J. A.; REUTER, D. Overview of the Earth Observing One (EO-1) Mission. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, Vol. 41, nº 6. pp. 1149–1153. 2003.

VAN DER MEER, F. Analysis of spectral absorption features in hyperspectral imagery. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**. 5, 55–68. 2004.

VIEWSPEC-PRO. **ViewSpec Pro™ User Manual**. ASD. 2008. Disponível em: <www.asd.com>. Acesso em: 30.jan.2017.

YUAN, J.; NIU, Z. Evaluation of atmospheric correction using FLAASH. **Earth Observation and Remote Sensing Applications, EORSA 2008**. June 30 2008-July 2 2008. p. 1 – 6. E-ISBN : 978-1-4244-2394-1. 2008.

APÊNDICES

APÊNDICE A

A Figura 61 apresenta os gráficos dos coeficientes de correlação de Pearson gerados no *software R*, a partir das curvas espectrais do Ipê Roxo e da Mangueira, coletadas na imagem 4 corrigida com o ATCOR calibrado, e as curvas espectrais coletas no campo com o espectrorradiômetro, nas regiões do visível (VIS), infravermelho próximo (NIR) e infravermelho médio (SWIR).

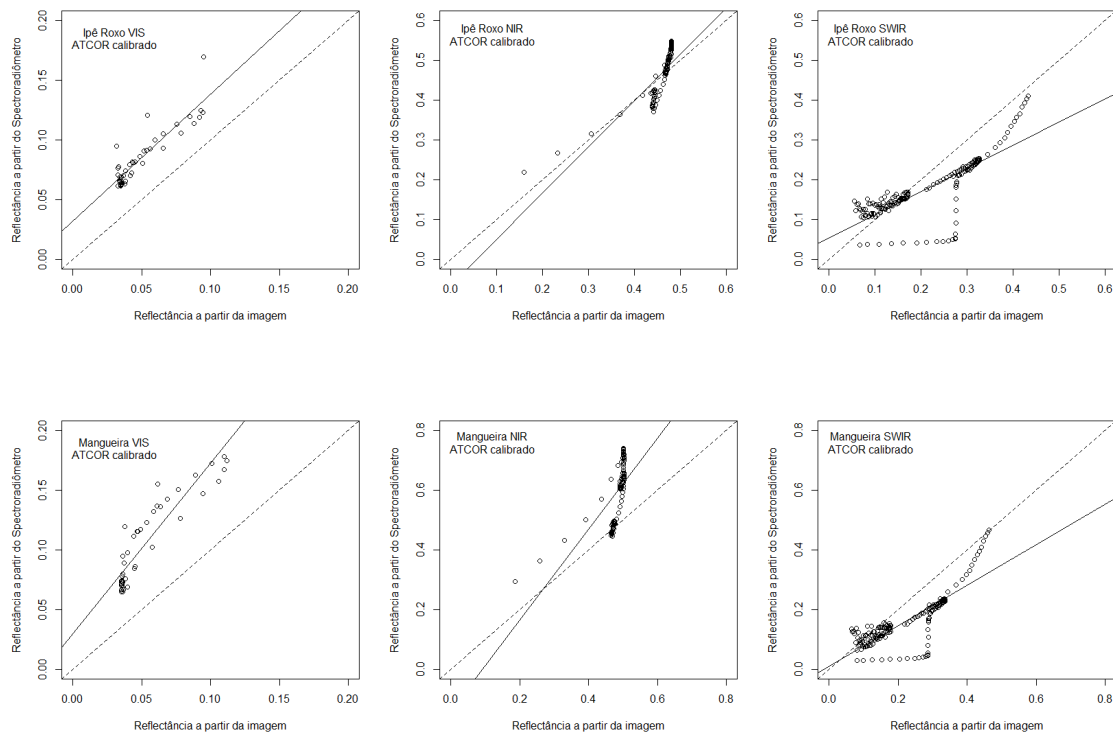


Figura 61 – Correlação de Pearson entre as assinaturas espectrais do Ipê Roxo e da Mangueira coletadas na imagem corrigida pelo ATCOR-4 calibrado e as assinaturas espectrais coletadas no campo com o sensor ASD, nas regiões do VIS, NIR e SWIR.

A Figura 62 apresenta os gráficos dos coeficientes de correlação de Pearson gerados no *software R*, a partir das curvas espectrais do Ipê Roxo e da Mangueira, coletadas na imagem 4 corrigida com o ATCOR não calibrado, e as curvas espectrais coletas no campo com o espectrorradiômetro, nas regiões do visível (VIS), infravermelho próximo (NIR) e infravermelho médio (SWIR).

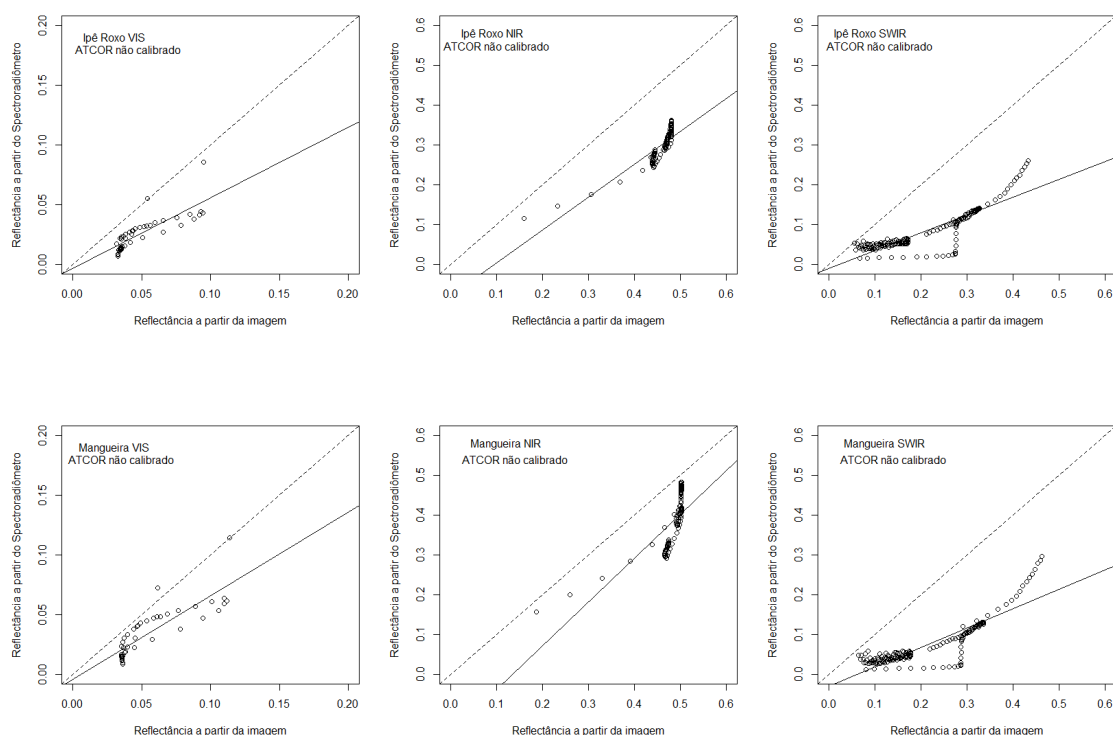


Figura 62 - Correlação de Pearson entre as assinaturas espectrais do Ipê Roxo e da Mangueira coletadas na imagem corrigida pelo ATCOR-4 não calibrado e as assinaturas espectrais coletadas no campo com o sensor ASD, nas regiões do VIS, NIR e SWIR.

A Figura 63 apresenta os gráficos dos coeficientes de correlação de Pearson gerados no *software R*, a partir das curvas espectrais do Ipê Roxo e da Mangueira, coletadas na imagem 4 corrigida com o LE calibrado, e as curvas espectrais coletas no campo com o espectrorradiômetro, nas regiões do visível (VIS), infravermelho próximo (NIR) e infravermelho médio (SWIR).

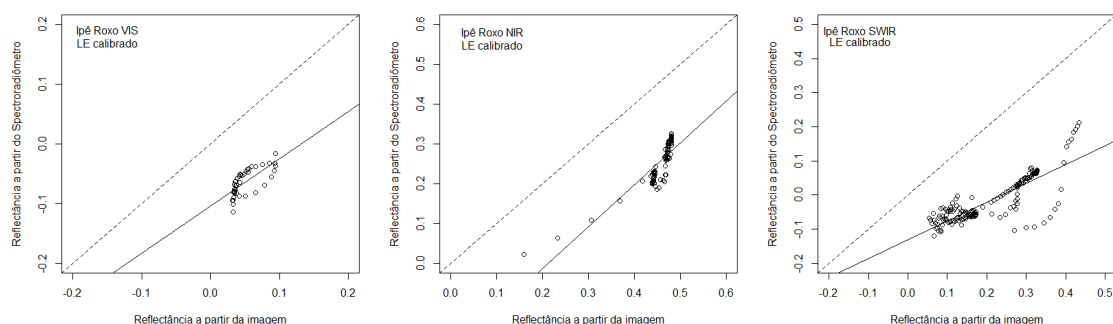


Figura 63 - Correlação de Pearson entre as assinaturas espectrais do Ipê Roxo e da Mangueira coletadas na imagem corrigida pelo LE calibrado e as assinaturas espectrais coletadas no campo com o sensor ASD, nas regiões do VIS, NIR e SWIR.

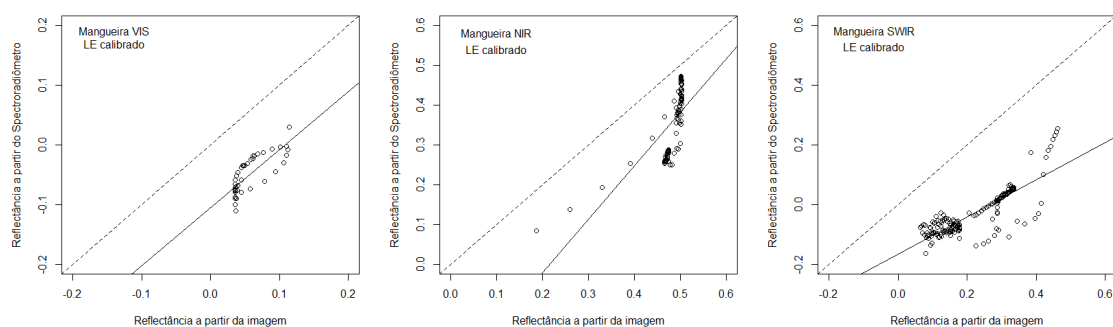


Figura 63 – Continuação.

A Figura 64 apresenta os gráficos dos coeficientes de correlação de Pearson gerados no *software R*, a partir das curvas espectrais do Ipê Roxo e da Mangueira, coletadas na imagem 4 corrigida com o QUAC, e as curvas espectrais coletadas no campo com o espectrorradiômetro, nas regiões do visível (VIS), infravermelho próximo (NIR) e infravermelho médio (SWIR).

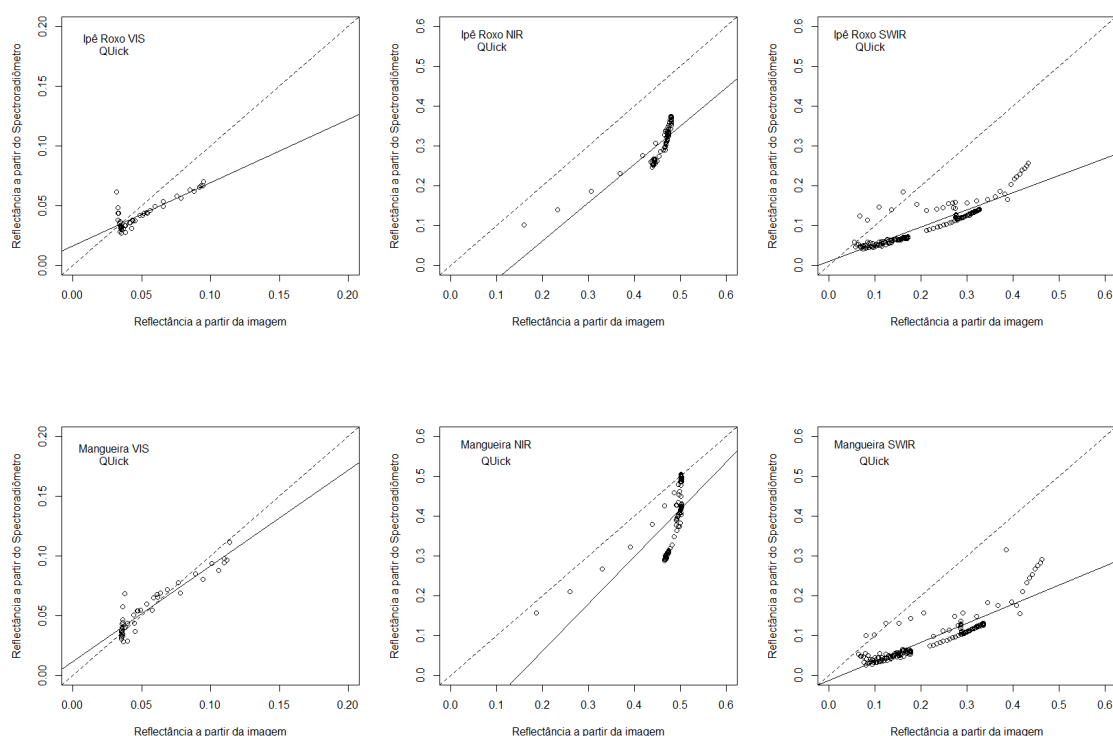


Figura 64 - Correlação de Pearson entre as assinaturas espectrais do Ipê Roxo e da Mangueira coletadas na imagem corrigida pelo QUAC e as assinaturas espectrais coletadas no campo com o sensor ASD, nas regiões do VIS, NIR e SWIR.