Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro de Tecnologia e Ciências
Faculdade de Geologia

Karen Christine Henriques de Andrade

Utilização de imagem do sensor Aster para discriminação espectral de rochas carbonáticas aflorantes na região Noroeste do Estado do Rio de Janeiro

Rio de Janeiro
2014

Karen Christine Henriques de Andrade

Utilização de imagem do sensor Aster para discriminação espectral de rochas carbonáticas aflorantes na região Noroeste do Estado do Rio de Janeiro

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Análise de Bacias e Faixas Móveis, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Tectônica, Petrologia e Recursos Minerais.

Orientador: Prof. Dr. Ronaldo Pereira Melo

Coorientador: Prof. Dr. Francisco Dourado

Rio de Janeiro

2014

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/C

A553 Andrade, Karen Henriques de
Utilização da imagem do sensor Aster para discriminação espectral de rochas carbonáticas aflorantes na região noroeste do estado do Rio de Janeiro / Karen Henriques de Andrade. – 2015.
86f. : il.

Orientador: Ronaldo Pereira Melo
Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Geologia.
Bibliografia.

1. Rochas carbonáticas – Teses. 2. Satélites artificiais em sensoriamento remoto – Rio de Janeiro(Estado) - Teses.. 3. Sensoriamento remoto – Rio de Janeiro(Estado) – Teses. I. Melo, Ronaldo Pereira. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Faculdade de Geologia. III. Título.

CDU 549.74:528.8(815.3)

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

_____ _____

Assinatura Data

Karen Christine Henriques de Andrade

Utilização de imagem do sensor Aster para discriminação espectral de rochas carbonáticas aflorantes na região Noroeste do Estado do Rio de Janeiro

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Análise de Bacias e Faixas Móveis, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Tectônica, Petrologia e Recursos Minerais.

Aprovada em 30 de julho de 2014.

Banca Examinadora:

_____

Prof. Dr. Ronaldo Pereira Melo (Orientador)

Faculdade de Geologia – UERJ

_____

Prof. Dr. Francisco Dourado (Co-orientador)

Faculdade de Geologia – UERJ

_____

Prof.ª Dra. Drª. Nely Palermo

Faculdade de Geologia - UERJ

_____

Prof. Drª. Vivian Castilho.

Faculdade de Geografia - UERJ

Rio de Janeiro

2014

DEDICATÓRIA

À minha família, pelo incentivo e ao Bruno pela compreensão, carinho e amizade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todas as pessoas e instituições que me ajudaram a alcançar mais uma etapa na minha vida.

À Deus por me iluminar durante os momentos de dúvida e apreensão durante esta caminhada.

À minha família, que sempre incentivou para que eu chegasse até esta etapa em minha vida.

Ao meu companheiro Bruno por sua paciência, compreensão e amizade. Sempre me incentivando a seguir em frente, com força e coragem. Amo compartilhar a vida com você. Te amo!

Aos meus amigos, pelo incentivo e apoio constante. Obrigada pelos momentos divertidos na minha vida. Com certeza, foram muito importantes para trilhar esse caminho.

Agradeço também aos professores Ronaldo Melo e Francisco Dourado pela orientação, paciência e incentivo.

Às professoras Vivian Castilho e Nely Palermo, pela paciência e pela ajuda com idéias e sugestões para a elaboração do trabalho.

Ao Laboratório de Geoprocessamento do Instituto de Geografia da UERJ e ao Laboratório de Geotecnologias (Labgis), que permitiu que eu elaborasse parte da minha pesquisa.

À Capes, por possibilitar minha participação no programa de pós-graduação.

À todos os funcionários e colegas do curso de pós-graduação de Geologia da UERJ, pelos momentos de convivência, que foram importantes para minha formação acadêmica.

RESUMO

HENRIQUES, K. *Utilização de imagem do sensor Aster para discriminação espectral de rochas carbonáticas aflorantes na região Noroeste do Estado do Rio de Janeiro*. 2014. 88 f. Dissertação (Mestrado em Geologia)- Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

Este trabalho teve como objetivo geral avaliar o potencial das imagens do sensor ASTER, utilizando a região do infravermelho de ondas curtas (SWIR), para discriminação espectral de rochas carbonáticas aflorantes na região Noroeste do Estado do Rio de Janeiro, complementando produtos existentes de mapeamento geológico. As rochas carbonáticas servem de matéria-prima para produção de cimento, que atualmente apresenta forte demanda dado o crescimento de obras civis devido à expansão da infraestrutura do Estado do Rio de Janeiro. Este crescimento no consumo oferece desafios às companhias produtoras, tornando-se de vital importância a identificação de novas áreas para exploração de insumos para a indústria civil. Neste sentido, o carbonato tem sofrido grande pressão com relação a sua produção pois é a principal matéria-prima utilizada na fabricação do cimento. Imagens do sensor Aster vem sendo utilizadas na área da geologia com êxito, discriminando litologias e minerais como quartzo, óxido de ferro e calcita. Na região do intervalo de ondas entre 2,235-2,285 µm e 2,295-2,365 µm , as bandas 7 e 8 do sensor ASTER na região do SWIR, mostram-se adequadas para a identificação de minerais de calcita e dolomita. Como metodologia, foram aplicadas as técnicas de razões de bandas para separação de calcários e dolomitos e para a classificação espectral, foi utilizada a técnica SAM. Tornou-se como referência para a classificação espectral amostras de áreas de rochas carbonáticas aflorantes e espectros da biblioteca espectral da USGS. As classificações espectrais obtiveram resultados significativos na discriminação espectral das áreas carbonáticas, no entanto as técnicas de razões de bandas não obtiveram resultados suficientes para a discriminação de calcários e dolomitos. Para trabalhos futuros sugere-se a realização de trabalho de campo para a coleta de espectros, através da espectrorradiometria dos afloramentos dos carbonatos.

Palavras-chave: ASTER. Rochas carbonáticas. Técnica SAM.

ABSTRACT

HENRIQUES, K. *Aster image analysis sensor for mineral identification for carbonate rocks in the Central and North West of the State of Rio de Janeiro*. 2014. 88 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

This work had as main objective to evaluate the potential of ASTER images using the region of shortwave infrared (SWIR), for spectral discrimination of carbonate rocks outcropping in the northwestern part of the State of Rio de Janeiro region, complementing existing products geological mapping . The carbonate rocks serve as raw material for cement production, which currently presents strong demand given the growth of civil works due to the expansion of the State of Rio de Janeiro's infrastructure. This growth in consumption offers challenges to production companies, making it vitally important to identify new areas for exploration of inputs for civil industry. In this sense, the carbonate has undergone great pressure with respect to its production as it is the main raw material used in cement production. Aster images sensor is being used in the field of geology successfully discriminating lithologies and minerals such as quartz, iron oxide and calcite. In the interval between waves from 2.235 to 2.285 m and 2.295 to 2.365 μm region, the bands 7 and 8 in the ASTER SWIR region are adequate for identifying minerals calcite and dolomite. As a methodology, techniques of reasons for separation of bands of limestones and dolomites and the spectral classification were applied, the SAM technique was used. Became as reference samples for the spectral classification of areas of outcropping carbonate rocks and spectra from the USGS spectral library. The spectral classifications obtained significant results in the spectral discrimination of the carbonate areas, however the techniques of reasons bands did not achieve sufficient results for the discrimination of limestones and dolomites. For future work is suggested to conduct fieldwork to collect spectra by spectroradiometry outcrops of carbonates

Keywords: ASTER. Carbonate rocks. SAM technique.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Composição colorida 231 RGB ASTER destacando a área de afloramento de mármores em vermelho e áreas de exposição de rochas carbonáticas em amarelo (área piloto) 26
Figura 2 - Rochas carbonáticas e direito minerários no Estado do Rio de Janeiro ...27
Figura 3 - Mapa de uso e ocupação do solo da área de estudo.....29
Figura 4 - Áreas de concessão e requerimento de lavra na área de interesse 33
Tabela 1 - Quantidade de pixels coletados por área piloto na área de interesse.....34
Figura 5 - Áreas de exposição de rochas carbonáticas na área de interesse 35
Figura 6 - Subdivisão do sistema Orogênico Mantiqueira e localização da área de estudo (em preto) 37
Figura 7 - Compartimentação tectônica da Faixa Ribeira entre a borda do Cráton do São Francisco e o litoral fluminense.....38
Figura 8 - Representação da evolução tectônica da Faixa Ribeira 40
Figura 9 - Domínios tectônicos da Faixa Ribeira Setentrional e área de interesse em preto 42
Figura 10 - Mapa e perfil geológico-estrutural do Domínio Italva na região NE do Estado do Rio de Janeiro 45
Figura 11 - Mapa de geologia da área de estudo com destaque para as áreas de exposição de rochas carbonáticas e áreas de concessão e requerimento para lavra. 47
Tabela 2 - Intervalo espectrais das bandas dos sensores ASTER/Terra e ETM+/Landsat-7 e resolução espacial 50
Figura 12 - Representação dos espectros de referência e de teste para uma imagem e com o ângulo formado entre eles 54
Tabela 3 - Posições dos picos de absorção de carbonatos em μm nas bandas ASTER.....57
Figura 13 - Bandas espectrais da região do SWIR referente à área piloto (amostra 3) 59
Figura 14 - Histogramas das bandas ASTER referentes à região do SWIR 61

Figura 15 - Composições coloridas do sensor ASTER utilizando as bandas da região do SWIR referentes às amostras 1 e 3 63
Figura 16 - Resultado do Índice de calcita para as amostras 1 e 3.....64
Figura 17 - Resultado do Índice de calcita para áreas com presença de nuvens 65
Figura 18 - Resultados da aplicação da razão RDB para calcários e dolomitos. 66
Figura 19 - Áreas piloto utilizada para a classificação SAM.. 68
Figura 20 - Curvas espectrais das áreas coletadas diretamente da imagem ASTER.....69
Figura 21 - Resultado da classificação SAM utilizando expectros extraídos da imagem 70
Figura 22 - Resultado da classificação espectral, pelo método SAM, das áreas piloto localizadas na região de interesse 72
Figura 23 - Biblioteca espectral USGS mostrando os minerais selecionados para a classificação SAM 75
Figura 24 - Resultado da classificação SAM utilizando a biblioteca espectral USGS 77
Figura 25 - Resultado da classificação espectral, pelo método SAM, utilizando a biblioteca espectral USGS.....78
Figura 26 - Resultado da classificação espectral, pelo método SAM, das áreas piloto utilizadas como referência.....80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALOS	*Advanced Land Observing Satellite*
ASTER	*Advanced Spaceborne Thermal and Reflection Radiometer*
AVNIR	*Advanced Visible and Near Infrared Radiometer*
AVIRIS	*Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer*
SWIR	*Shortwave Infrared*/Região do Infravermelho de Ondas Curtas
VNIR	*Visible and Near Infrared* /Região do Visível e Infravermelho Próximo
TIR	*Thermal Infrared*/Região do Infravermelho Termal
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DRM	Serviço Geológico do Estado do Rio de Janeiro
Ma	Milhão de anos
Ga	Mil Milhão de anos
PALSAR	*Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar*
PRISM	*Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping* / Instrumento para Mapeamento Estéreo de Sensoriamento Remoto Pancromático
REM	Radiação Eletromagnética
UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro
UFRJ	Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
INEA	Instituto Estadual do Ambiente
TM	Thematic Mapper/ Mapeador Temático

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	17
1	**OBJETIVOS**	20
2	**MATERIAL E MÉTODOS**.....	21
2.1	**Materiais**.....	21
2.2	**Programas**.....	22
2.3	**Métodos**.....	22
3	**LOCALIZAÇÃO DA ÁREA**.....	25
4	**PERFIL DA PRODUÇÃO DE ROCHAS CARBONÁTICAS NO ESTADO DO RIO DE JANEIRO**.....	68 31
5	**CONTEXTO GEOLÓGICO**.....	37
6	**REFERENCIAL TEÓRICO**.....	49
6.1	**O sensor ASTER**.....	49
6.2	**Tipos de classificação e classificadores multiespectrais**.....	52
6.3	**Comportamento espectral dos carbonatos**.....	55
7	**ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS OBTIDOS**.....	58
7.1	**Processamento digital da Imagem ASTER**.....	58
7.2	**Aplicação da técnica SAM na imagem ASTER**.....	67
	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	82
	REFERÊNCIAS	85

INTRODUÇÃO

O uso de dados de Sensoriamento Remoto na área de Geociências tem sido bastante utilizado em diversas finalidades como, por exemplo, para o planejamento ambiental e territorial, pesquisa mineral, mapeamento geológico entre outras aplicações. Estas técnicas estão cada vez mais sofisticadas e utilizadas como alternativa para diminuição de custos financeiros e de tempo em pesquisas.

Com o advento do imageamento da Terra por satélites, ampliou-se a análise de grandes áreas em escalas regionais e estudos de detalhe, com a geração de produtos de boa qualidade visual, com grande precisão cartográfica. Os sensores ópticos multiespectrais, permite a identificação e análise do comportamento espectral de materiais da superfície terrestre, como por exemplo rochas e minerais. (INPE, 2002)

Estes sensores possuem cobertura global e uma variedade de possibilidades entre os que operam no espectro da energia refletida e emitida, no qual a escolha levará em conta o tipo de aplicação e a tecnologia disponível. Os dados quantitativos produzidos por esses sensores podem ser processados através de métodos computacionais específicos, com aplicação de técnicas de realce e classificação que permite a distinção entre alvos.

A partir no lançamento do sensor ASTER, do satélite TERRA novas perspectivas para aplicações geológicas foram desenvolvidas diante a grande aplicabilidade desse sensor. Existem outros satélites que foram lançados recentemente e possuem sensores multiespectrais como o ALOS 3 e SPOT 7 e também possuem grande aplicabilidade nos estudos na área de Geociências.

O satélite ALOS foi lançado em 24 de janeiro de 2006 pela *Japan Aerospace Exploration Agency* – JAXA e possui três instrumentos de sensoriamento remoto: o PRISM capaz de adquirir imagens tridimensionais da superfície terrestre, AVNIR-2 para cobertura terrestre precisa e o PALSAR capaz de obter imagens diurnas e noturnas sem a interferência de nebulosidade. (http://www.globalgeo.com.br/satelite/alos-pt/)

O programa SPOT (Satellite Pour Observation de la Terre, Satélite Para Observação da Terra) é um programa Francês de satélites de sensoriamento remoto projetado pela Agência Espacial Francesa e é operado por sua subsidiária Spot Image. O primeiro da série foi lançado em 22/2/1986 e atualmente foi lançado o SPOT-7. (INPE, 2002)

O sensor ASTER atualmente é o único sensor multiespectral com uma função geológica voltada para a exploração mineral. É constituído por três subsistemas independentes de imageamento: 1) VNIR, com três bandas espectrais de resolução espacial de 15 m; 2) SWIR, com seis bandas espectrais e resolução espacial de 30 m; e 3) TIR, com cinco bandas e com resolução espacial de 90 m.(https://lpdaac.usgs.gov/about/citing_lp_daac_and_data)

No intervalo do comprimento de onda entre 1,6 μm e 2,5 μm, o sensor ASTER possui seis bandas que são referentes à região do SWIR. Este intervalo espectral é o mais importante para o estudo de carbonatos, pois há feições de absorção que aumentam de intensidade neste intervalo (Gaffey, 1986). Como consequência, o sensor ASTER possui uma boa resolução espectral para a identificação de rochas carbonáticas.

No território brasileiro, o Estado do Rio de Janeiro é local onde está ocorrendo o maior número de investimentos devido à realização de grandes eventos mundiais, como a Copa das Confederações de Futebol (2013), a Copa do Mundo de Futebol (2014) e as Olimpíadas (2016), além da expansão de projetos sociais como o Programa de Aceleração do Crescimento e o Programa Social Minha Casa Minha Vida.

O crescimento no consumo de areia, argila e cimento devido à realização desses eventos oferece desafios às companhias produtoras na identificação de novas áreas para exploração de insumos para a indústria civil. Neste sentido, as rochas carbonáticas, matéria-prima fundamental na indústria cimenteira, tem sofrido grande pressão com relação a sua produção.

O noroeste do Estado do Rio de Janeiro é a região onde se concentra o polo cimenteiro do estado e onde afloram as rochas carbonáticas, que ocorrem como mármores calcíticos e dolomíticos.

Diante deste contexto, este trabalho pretende utilizar técnicas de processamento digital de imagens para a identificação de novas áreas estratégicas para exploração mineral. A área de interesse se situa nas regiões Centro-Norte e Noroeste do Rio de Janeiro onde se encontra a maior concentração de ocorrências de rochas carbonáticas do estado, aparecendo sob a forma de mármores calcíticos e dolomíticos.

1 **OBJETIVOS**

O presente trabalho teve como objetivo geral avaliar o potencial das imagens do sensor ASTER para discriminação espectral de rochas carbonáticas, complementando produtos existentes de mapeamento geológico.

Os objetivos específicos foram:

a) Demonstrar a aplicabilidade de um método de mapeamento geológico não convencional como indicação inicial de baixo custo e alta rapidez ao mapeamento clássico de carbonatos;

b) Geração de um produto onde seja possível a identificação das ocorrências de carbonato na Região Noroeste Fluminense;

c) Avaliar o uso das técnicas de processamento digital de imagens na discriminação espectral utilizando o mapeador de ângulo espectral (Spectral Angle Mapper – SAM);

2 **MATERIAL E MÉTODOS**

Neste capítulo serão apresentados os materiais, procedimentos de aquisição dos dados e as técnicas de processamento e análise digital que foram utilizados para o desenvolvimento do trabalho.

2.1 **Materiais**

Foram utilizados os arquivos vetoriais na projeção UTM e datum WGS 84 disponíveis na base de dados de formato digital .shp* do site INEA, referentes à geologia, uso e ocupação do solo do Estado do Rio de Janeiro. Os dados cartográficos referentes à localização de estados, municípios e rodovias foram obtidos na malha digital disponíveis no site do IBGE. Os dados cartográficos referentes à concessão de lavras e requerimento de pesquisa de rochas carbonáticas foram obtidos na base de dados no site do DNPM.

Para o processamento digital foi utilizada uma imagem do sensor multiespectral ASTER obtidas em 27/03/2001, com nível de processamento 2b, que possui correção radiométrica e geométrica. A imagem foi processada e ortorretificada pela empresa Engesat Imagens de Satélites.

Para a elaboração dos mapas, foi utilizada a composição colorida da imagem ASTER 231 RGB, que possui uma melhor discriminação dos alvos como vegetação, água, área urbana, pastagens e áreas de exposição de rochas carbonáticas.

Para a realização da classificação espectral foram utilizadas as bandas 4 a 9 do *Shortwave Infrared* (SWIR), posteriormente serão descritos em detalhes os comprimentos de onda dessa faixa espectral. As bandas possuem correções dos efeitos da atmosfera, de *crosstalk* e ortorretificada na projeção UTM e datum WGS 84.

Para a coleta das áreas de interesse (área piloto) para utilizar como espectro de referência para a classificação, foi utilizado à composição RGB 678 por possuir uma maior discriminação das áreas expostas de rochas carbonáticas. As demais composições utilizadas como comparação RGB 469, 468, 568 e 678 não foram tão eficientes na discriminação do alvo de interesse.

2.2 **Programas**

Os programas de processamento de dados e de imagens disponíveis no Laboratório de Geotecnologias (LabGis) e Laboratório de Geoprocessamento do Instituto de Geografia (LAGEPRO)/UERJ utilizados no processamento das informações foram:

- ENVI 4.7 (*The Environment for Visualizing Images):* programa de processamento de imagens utilizado para correções geométricas, classificação de imagens e geração de DEM.

- ArcGis 10.2.1, distribuído pela *Environmental System Research Institute* (ESRI): programa que possui ferramentas para realizar análise espacial, armazenamento e processamento de dados geográficos.

2.3 **Métodos**

O trabalho foi desenvolvido em quatro etapas:

a) Levantamento bibliográfico sobre a geologia da área de estudo, características espectrais de rochas carbonáticas e técnicas para classificação multiespectral;

b) Compra da imagem do sensor ASTER, compreendendo bandas 4 a 9 do *Shortwave Infrared* (SWIR) em nível 2b com projeção UTM e datum WGS 84;

c) Processamento digital das imagens ASTER;

d) Análise e interpretação dos produtos gerados;

Para a etapa de levantamento bibliográfico de dados sobre a temática foi feito um levantamento bibliográfico da temática e da área de estudo, principalmente em bibliotecas de universidades (UERJ e UFRJ).

Foi realizada a busca de informações a partir de distintos sites na Internet, principalmente de órgão públicos como o IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais), DRM-RJ (Departamento de Recursos Minerais), INEA (Instituto Estadual do Ambiente) entre outros.

Para o processamento digital das imagens, foram utilizadas as técnicas de razão entre bandas *Relative Absorpton-Band Depth* (RBD), utilizando a razão RDB=(banda7+banda9)/banda8 para calcários e a razão RDB=(banda6+banda8)/banda7 para os dolomitos com o objetivo de separar os calcários dos dolomitos.

Essa técnica tem como objetivo diferenciar rochas que contém em sua composição hidróxidos de alumínio ou magnésio e íons de carbonato.(Crowley,1986). Para identificar a presença de composições químicas de carbonato, foi utilizado o índice de calcita utilizando as razões das bandas (6*9)/(8*8) descritas por Ninomiya (2004).

Para o processamento da classificação espectral utilizando a técnica SAM (*Spectral Mapping Wizard)*, que é uma ferramenta inserida no program ENVI, foi comparado dois conjuntos de dados de entrada: a) curvas de reflectância de minerais carbonáticos (calcita e dolomita) obtidas a partir da biblioteca espectral do *United States Geological Survey* (USGS) e b) espectros de reflectância referentes às áreas de mineração que representa rochas carbonáticas aflorantes extraídas diretamente da imagem.

Para os espectros de reflectância obtidas da própria imagem ASTER, foram utilizadas quatro áreas piloto (amostras) que foram utilizadas como dado de entrada para a classificação com a técnica SAM.

Esta classificação determina a similaridade espectral entre esses espectros, que são convertidos em vetores num espaço n-dimensional (n=número de bandas), com base na distância entre os mesmos, medida em radianos.

Para cada um dos espectros de referência, o classificador SAM gera uma imagem-produto, denominada *rule image,* cujos pixels, representam individualmente tais ângulos e quanto menor é o valor do pixel maior é a similaridade entre o espectro do pixel e da amostra referencia, em outras palavras, maior a probabilidade do pixel ser composto pela amostra de referência. (Pedrosa, 2010)

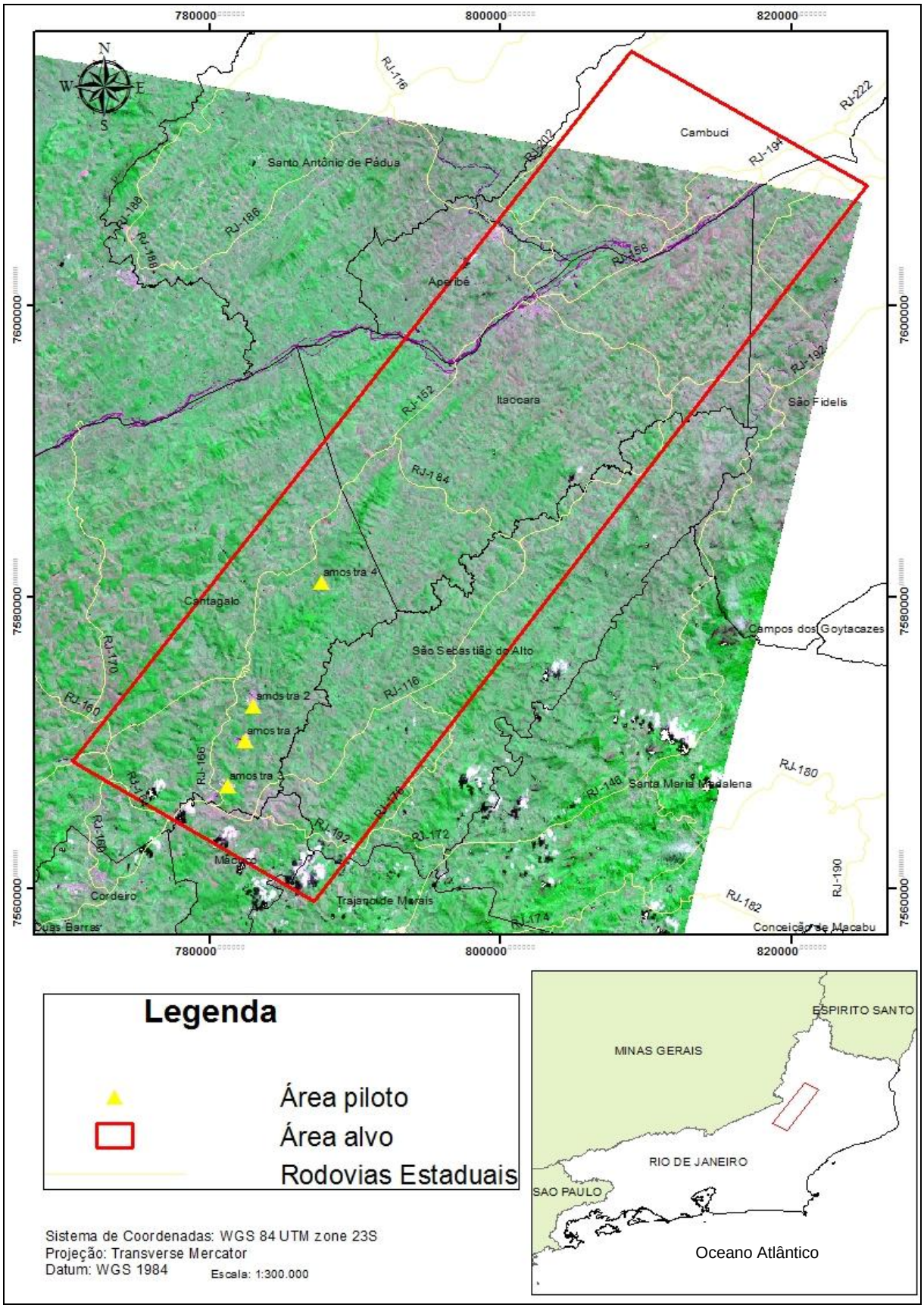
A técnica SAM neste trabalho foi aplicada para as seis bandas do sensor ASTER da região do SWIR com valor de ângulo de entrada 0.05 para a classificação utilizando como referência espectros retirados da imagem e 0.1 radianos para a classificação utilizando como referência espectros da biblioteca USGS.

Para a análise e interpretação dos produtos gerados foi realizada comparação e análise dos dados geológicos e cartográficos utilizando os programas ArcGis 10.2.1 e ENVI 4.7, a análise dos resultados da classificação e elaboração da dissertação. Já existe uma versão mais recente do programa ENVI (ENVI 5.0), no entanto, a licença disponível nos laboratórios não contava com a versão mais recente.

3 **LOCALIZAÇÃO DA ÁREA**

As áreas de trabalho, onde há a exposição de rochas carbonáticas estão inseridas na faixa de direção NE-SW com aproximadamente 100 km de comprimento por 30 km de largura e estende-se desde a mesorregião Centro-Norte Fluminense, englobando os municípios Macuco, Cantagalo, São Sebastião do Alto, até a mesorregião Noroeste Fluminense, com os municípios de Itaocara, Aperibé, Cambuci e São Fidélis (Figura 1).

Figura 1: Composição colorida 231 RGB ASTER destacando a área de afloramento de mármores em vermelho e áreas de exposição de rochas carbonáticas em amarelo (área piloto)

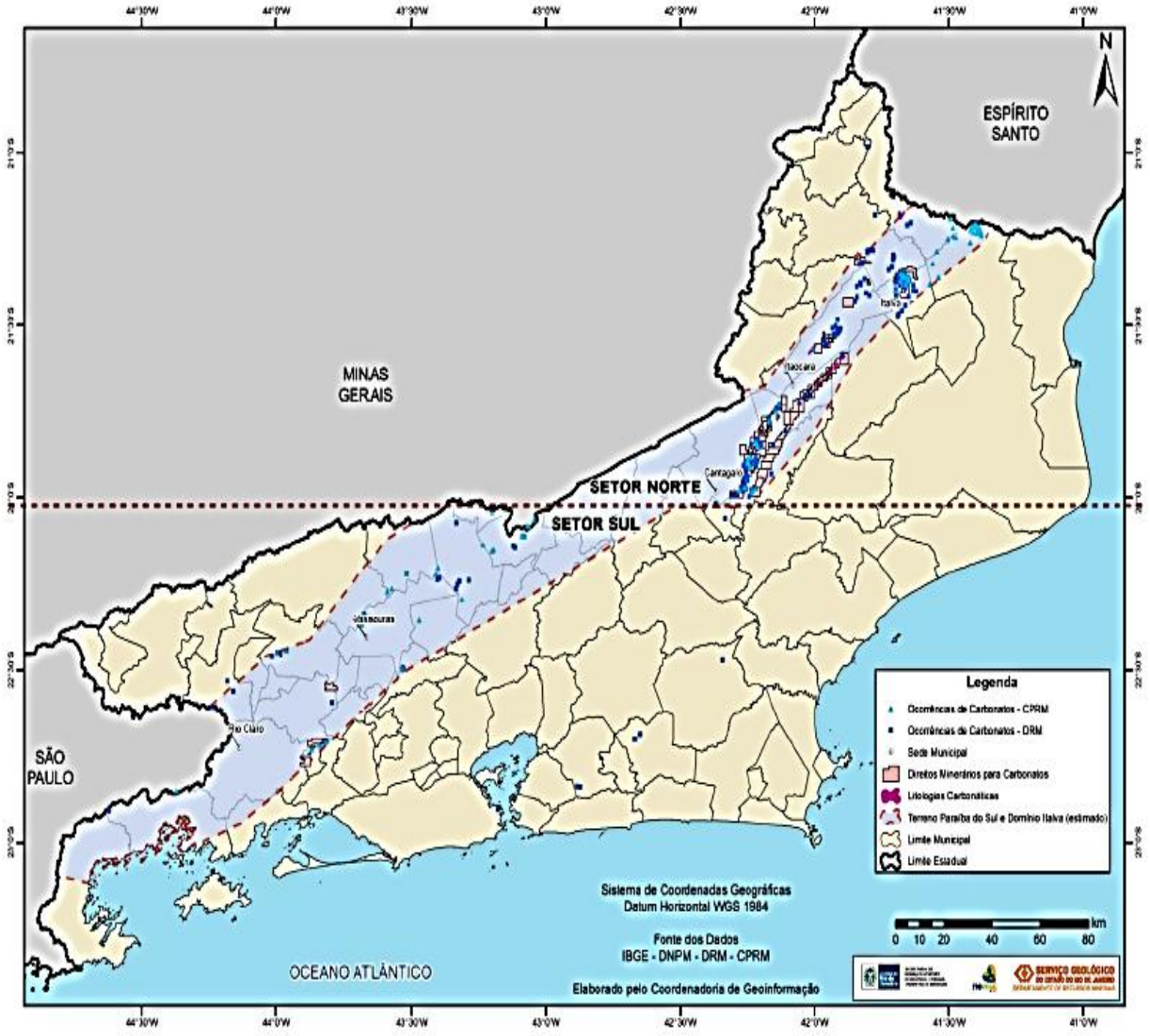


Fonte: IBGE, 2014.

A ocorrência de rochas carbonáticas no Estado do Rio de Janeiro está, de maneira geral, restrita as sequências metassedimentares do Terreno Paraíba do Sul (setor Sul, Figura 2 e Domínio Italva (setor norte, figura 2). O setor Norte tem início na região de Cantagalo se estendendo até Bom Jesus do Itabapoana, ocorrem lentes de mármores, na escala de quilômetros e enriquecidas em calcitas.

No Sul, as lentes de mármores são menores, mais dispersas e com química mineral menos favorável ao aproveitamento industrial. (DRM, 2012)

Figura 2: Rochas carbonáticas e direito minerários no Estado do Rio de Janeiro



Fonte: DRM. Disponível em: http://www.drm.rj.gov.br/index.php/downloads/category/20-outros?download=295%3Apanorama-mineral-do-estado-do-rio-de-janeiro-2012

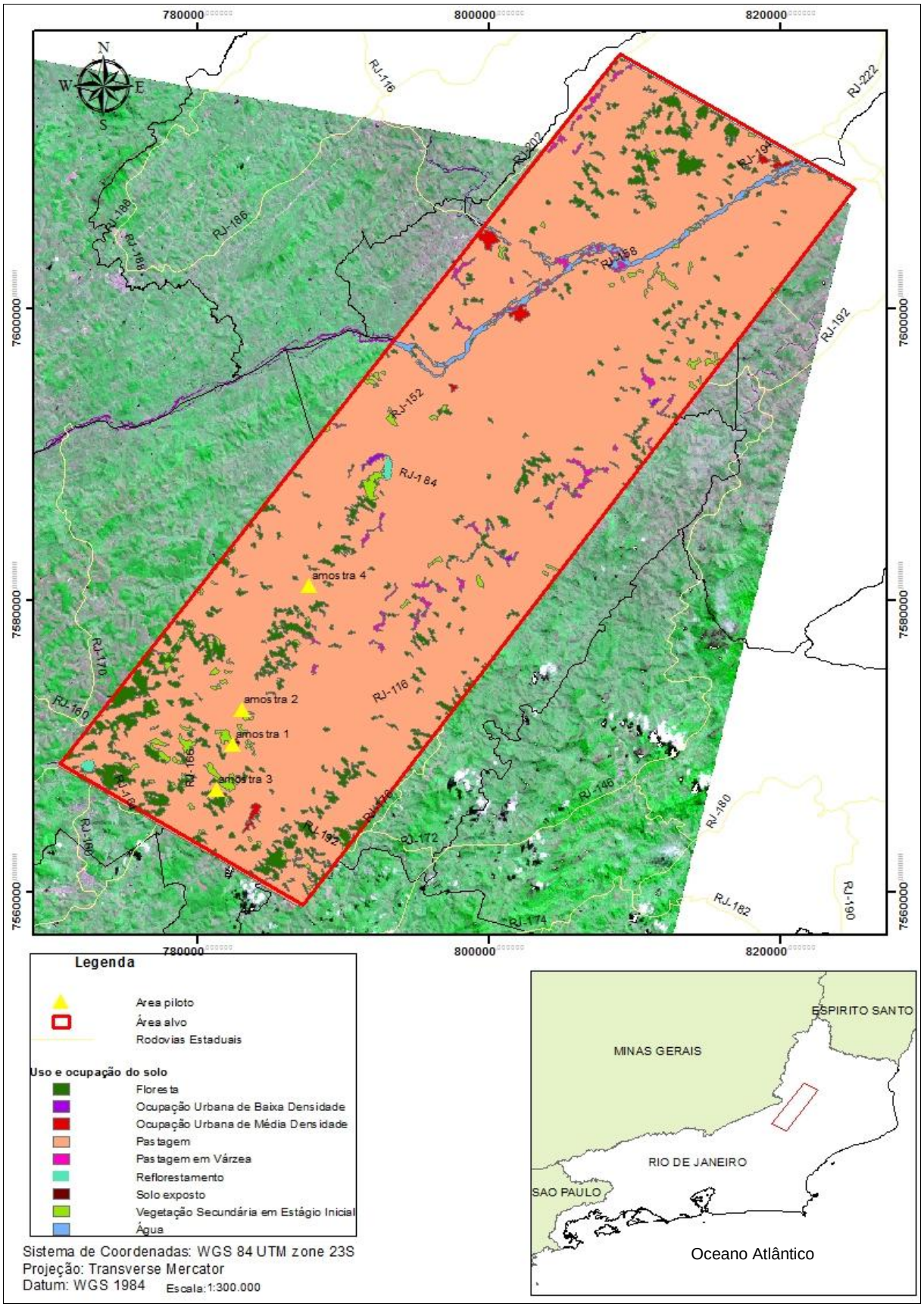
A Região do município de Cantagalo, conhecida como Polo Cimenteiro, o mármore (calcário) lavrado para suprir a indústria cimenteira tem mantido sua importância com 8 % da produção nacional devido à existência de grandes reservas, ao seu alto teor de calcita e, principalmente, à demanda crescente. (DRM, 2012)

As amostras de exposição de rochas carbonáticas utilizadas como referência para a classificação espectral estão todas localizadas no município de Cantagalo. (Figura 1)

A geomorfologia da região é composta por colinas e morros baixos apresenta, em geral, a presença de argissolos vermelho-amarelos e vermelhos eutróficos, com moderada fertilidade natural. Esse contexto favorece para uma utilização em sistemas silvipastoris, agroflorestais e pastagens.

A Figura 3 apresenta o uso e ocupação do solo da área de interesse, podendo observar que as áreas piloto utilizadas estão localizadas em áreas de pastagens.

Figura 3: Mapa de uso e ocupação do solo da área de estudo



Fonte: INEA, 2010.

A partir da análise da figura 3, podemos observar que a maior parte das amostras se localizam em área de solo exposto. A amostra 1, 2 e 3 estão localizadas em áreas de solo exposto, com a presença, no seu entorno, de pastagem, vegetação secundária e floresta. A amostra 4 está localizada em área de pastagem, rodeada com áreas de floresta.

4 PERFIL DA PRODUÇÃO DE ROCHAS CARBONÁTICAS NO ESTADO DO RIO DE JANEIRO

Os insumos base necessários para a fabricação do cimento são: rochas carbonáticas com baixo teor de magnésio (calcários calcíticos ou mármores calcíticos), argila e gipsita (gesso), sendo as rochas carbonáticas as que apresentam maior participação na combinação de substâncias exigidas para a produção de cimento.

O carbonato de cálcio ($CaCO_3$) desempenha um papel importante na maioria dos setores na indústria por suas diversas aplicações: na indústria de cimento, papel, plásticos, tintas, cerâmica, na agricultura entre outros. É o principal constituinte mineralógico dos calcários e mármores com elevada pureza. Assim, o calcário, notadamente o calcítico, é de longe a rocha carbonatada mais comum, seguida do dolomito e do mármore, este um produto metamórfico.

A maior parte do calcário existente hoje é de origem orgânica. Estruturas de vidas marinhas como corais, foraminíferos, moluscos e equinodermos são formadas praticamente de carbonato de cálcio puro e são, frequentemente, encontradas intactas em calcários como greda e marga. Os calcários magnesianos ou dolomíticos foram formados pela substituição, no próprio calcário calcítico, do cálcio pelo magnésio oriundo de águas com elevado teor de sais de magnésio. (Almeida & Sampaio; 2005)

O Estado do Rio de Janeiro possui uma grande concentração populacional, um importante e diversificado parque industrial e vem passando por um momento de desenvolvimento econômico, aumentando a importância das rochas carbonáticas como principal insumo para o consumo da indústria civil.

O parque industrial cimenteiro do Brasil é formado por 12 grupos, onde se destacam: Votorantim, João Santos, Cimpor, Holcim, Camargo Correa, Lafarge, Ciplan, Itambé etc. Na indústria do cimento observa-se a presença de oligopólios naturais, com poucos grupos produtores dominantes no mercado regional: João-Santos (Norte-Nordeste) e Votorantim (Sudeste-Sul). Estes dois grupos são os responsáveis por cerca de 50% da produção nacional. (DNPM, 2009)

A Região Sudeste possui a maior concentração de fábricas de cimento e é responsável por cerca de 50% da produção brasileira. (DNPM, 2012). Em 2010 o Estado do Rio de Janeiro ocupava a terceira posição no consumo de cimento, atrás somente de São Paulo e Minas Gerais (SNIC, 2010).

No Estado do Rio de Janeiro destacam-se a Holcim Brasil S.A., Votorantim Cimentos Brasil S.A. e Lafarge Brasil S.A. A argila produzida para a indústria cimenteira no Estado do Rio de Janeiro é proveniente do polo cimenteiro de Cantagalo.

Durante o século XVIII, a região Noroeste do Estado Rio de Janeiro, especificamente o município de Cantagalo, foi favorecida pela descoberta de extensas jazidas de mármores da ordem de bilhões de toneladas e com altos teores de calcita ideais para a produção de cimento.

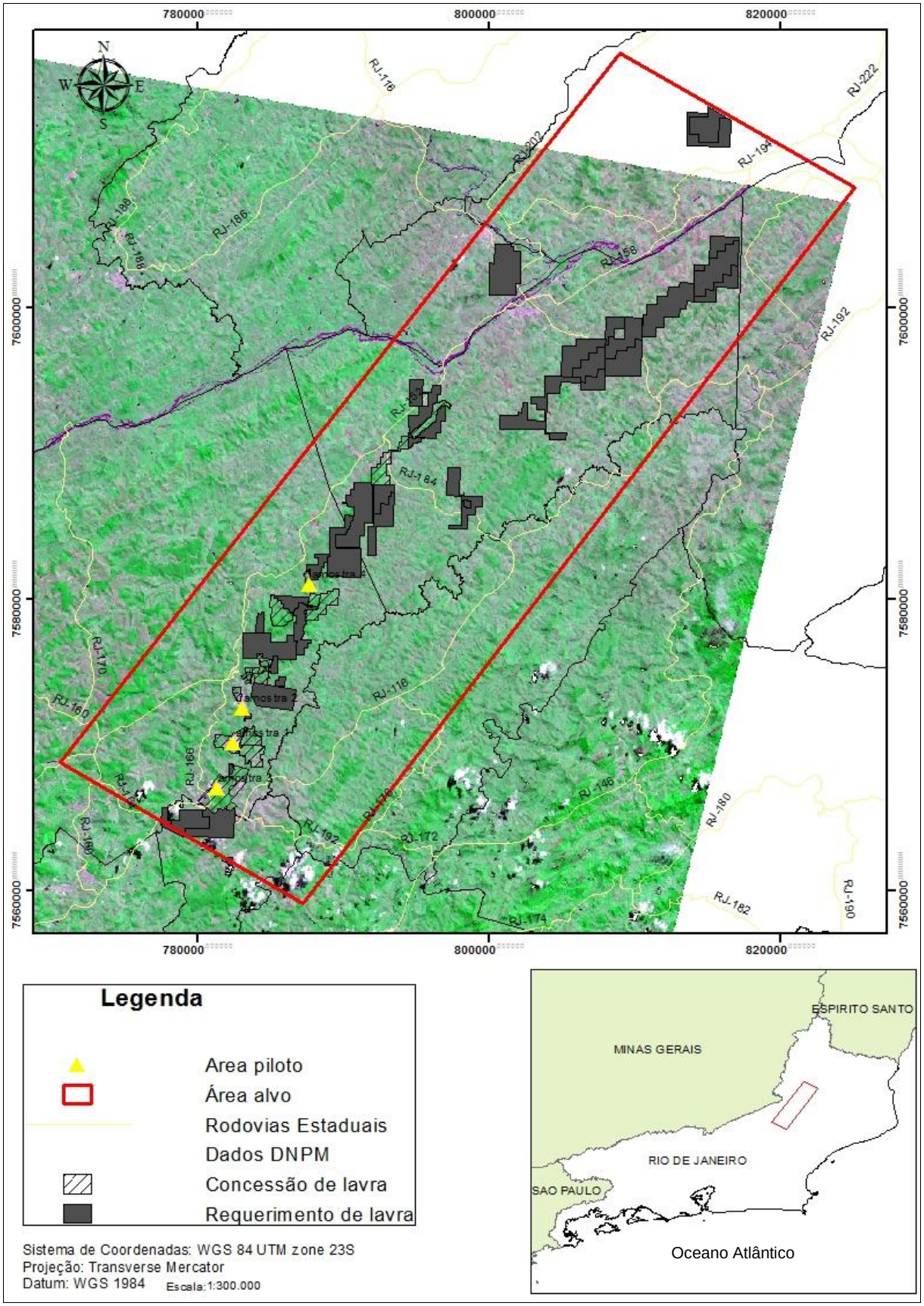
Diante deste contexto, há uma confluência entre a existência de empresa consolidada do setor cimenteiro em busca de nova área para obtenção de matéria-prima e a viabilização econômica dos depósitos da região de Cantagalo. Todo esse cenário favoreceu o município e a região se tornarem o principal Polo Cimenteiro do Estado do Rio de Janeiro e responsável por 8% da produção nacional.

Na região de Italva localizada no Noroeste Fluminense, a exploração de mármore teve seu início em 1917 com a indústria de calcinação para obtenção de cal virgem. O município de Italva já foi célebre pro seu mármore. Existem processos minerários no Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) que remontam à década de 1940, o que ilustra a sua importância para a localidade.

As reservas de rochas carbonáticas no Estado são muito importantes pois 100% da sua produção são consumidas no próprio território. A demanda é tão grande que a produção só consegue atender 75% do mercado, enquanto os outros 25% são provenientes de outros estados (Minas Gerais e São Paulo). (DRM, 2012). Na figura 4, as áreas de concessão e requerimento de lavra para rochas carbonáticas estão localizadas na área de interesse representadas, respectivamente, pelas simbologias de cor vermelha e amarela.

A lavra é um conjunto de operações que tem como objetivo o aproveitamento industrial da jazida, desde a extração de substâncias minerais úteis até o beneficiamento das mesmas. A autorização, concessão e ou extração no território brasileiro é de responsabilidade do DNPM.

Figura 4: Áreas de concessão e requerimento de lavra na área de interesse



Fonte: DNPM, 2009.

Grande parte das concessões para lavra de rochas carbonáticas inseridas na área de interesse estão presentes no Setor Norte, referente ao Domínio Italva (Figura 2). As áreas piloto utilizadas para a classificação espectral estão localizadas na sua maioria na área de concessão de lavra do DNPM no município de Cantagalo.

A figura 5 apresenta as composições RGB 231 das áreas de exposição de rochas carbonáticas utilizadas como referência espectral para a classificação SAM.

As áreas pilotos (amostras) escolhidas localizam-se no município de Cantagalo, polo cimenteiro do Estado do Rio de Janeiro. A escolha das áreas piloto teve como critério o cruzamento de dados de geologia, principalmente mármores, obtidos no site do INEA e concessão de lavra, obtidos no site do DNPM.

A partir da análise dos dados, foram escolhidas áreas pilotos (Tabela 1) de exposição de garimpos de rochas carbonáticas (pixels claros) presente na área de interesse, sendo todas as áreas testes localizadas no município de Cantagalo.

Tabela 1: Quantidade de pixels coletados por área piloto na área alvo

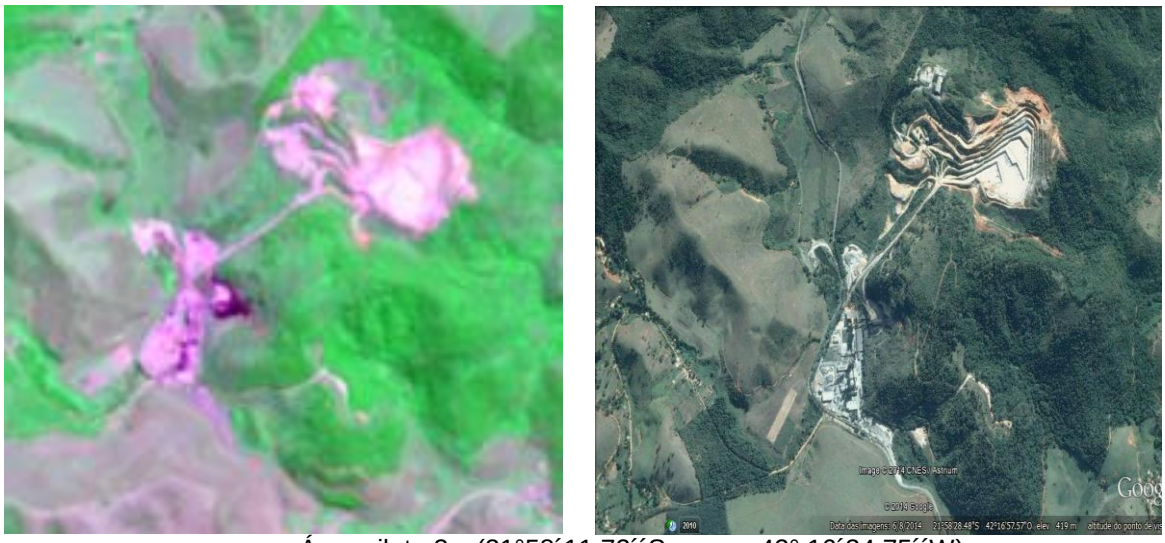
Área piloto	Pixels
1	19
2	82
3	59
4	8

Fonte: A autora; 2014.

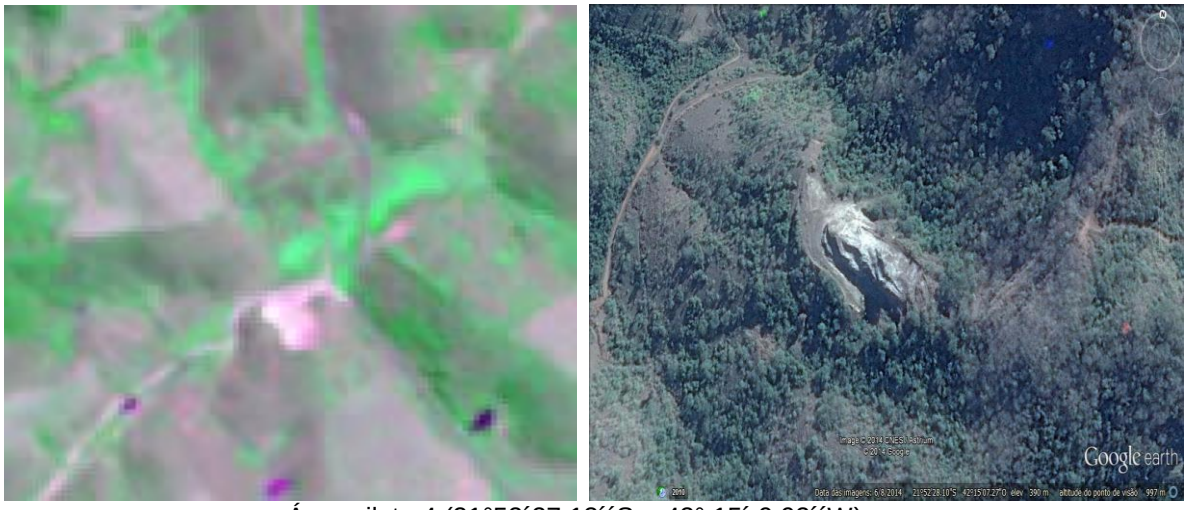
Figura 5: Áreas de exposição de rochas carbonáticas na área de interesse

Área piloto 1 (21°56´31.14´´S 42°15´55.92´´W)

Área piloto 2 (21°58´42.76´´S 42° 9´15.16´´W)



Área piloto 3 (21°58´11.72´´S 42° 16´34.75´´W)



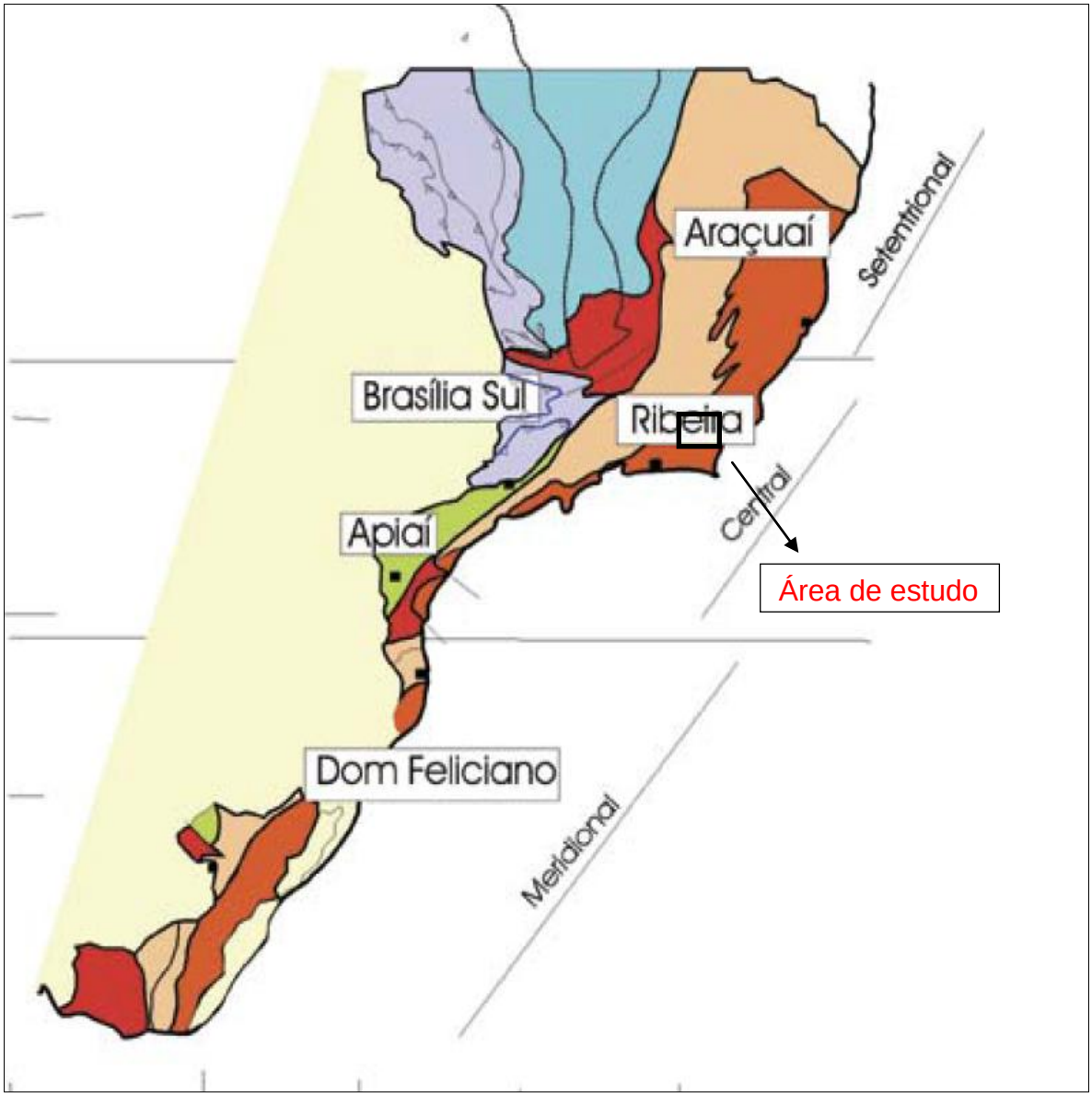
Área piloto 4 (21°52´27.13´´S 42° 15´ 9.92´´W)

Fonte: Composição RGB 231 bandas do sensor ASTER e imagem do Google Earth de cada área piloto.

5 CONTEXTO GEOLÓGICO

A área de estudo (Figura 6) encontra-se inserida no contexto da Faixa de dobramentos Ribeira, que está contida na denominada Província Tectônica Mantiqueira com idade aproximadamente de 900 Ma. (Heilbron e Machado; 2003)

Figura 6: Subdivisão do sistema Orogênico Mantiqueira e localização da área de estudo (em preto)



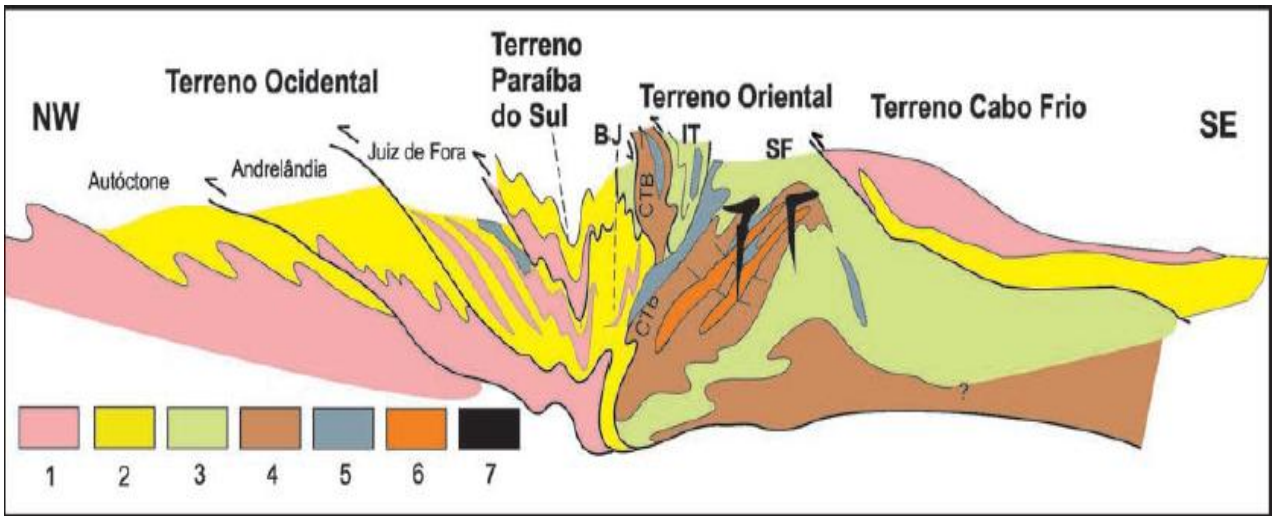
Fonte: HEILBRON et al, 2004.

Segundo os

autores Valladares et al. (2000), Heilbron & Machado (2003) e Peixoto & Heibron (2010), a faixa Ribeira é produto da convergência entre a placa São Francisco e outras placas e/ou microplacas e/ou arcos de ilhas situadas a S-SE. Esta faixa pode ser subdivida em quatro terrenos tectono-estratigráficos (Figura 8) imbricados para NW-W em direção ao Cráton São Francisco: 1)Terreno Ocidental: compreende os Domínios Autóctone, Andrelândia e Juiz de Fora; 2) Kipple ou Terreno Paraíba do Sul: representado por um estrutura sinformal composta por ortognaisses Paleoproterozóicos e granitoides intrusivos; 3) Terreno Oriental: representado pelos domínios estruturais relacionados ao arco magmático da faixa; 4) Terreno Cabo Frio: produto de uma amalgamação tardia que gerou deformação de baixo ângulo e metamorfismo de pressão media a alta.

Os três primeiros foram amalgamados há 580 Ma e o Terreno Cabo Frio há ca 520 Ma. Na figura 7 podemos analisar a compartimentação tectônica da Faixa Ribeira entre a borda do Cráton do São Francisco e o litoral fluminense.

Figura 7: Compartimentação tectônica da Faixa Ribeira entre a borda do Cráton do São Francisco e o litoral fluminense

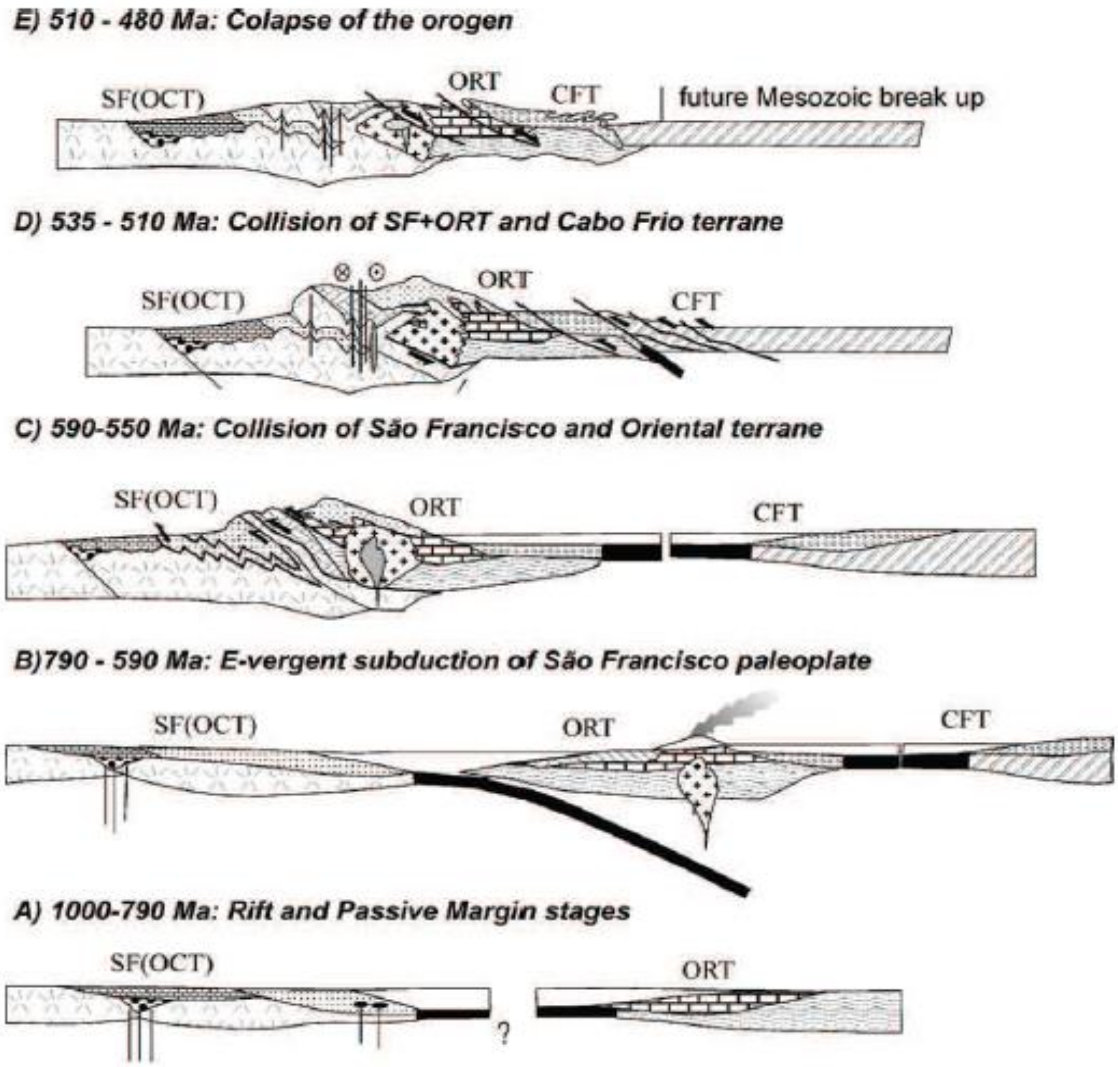


Legenda: 1 - embasamento Paleoproterozoico; 2- cobertura metassedimentar pós-1,8 Ga; 3 – sequências metassedimentar à volta do arco magmático, ITV, Grupo Italva; BJ, Grupo Bom Jesus do Itabapoana; SF, Grupo São Fidélis; 4 – Complexo Rio Negro, ortognaisses do Arco Magmático; 5 – leucognaisses graníticos da Suíte Cordeiro; 6 – Gnaisses metaluminosos da Suíte Serra dos Órgãos; 7 – granitos da Suíte Nova Friburgo.
Fonte: TUPINAMBÁ et al, 2012.

O *trend* estrutural da Faixa Ribeira (NE-SW), é resultado do empilhamento dos terrenos, no qual a colisão entre eles foi oblíqua e os limites entre os compartimentos tectônicos representados por empurrões com mergulhos maiores que trinta graus, ou por zonas de cisalhamento oblíqua transpressivas. (Peixoto, 2010).

Baseado em dados geocronológico, Heilbron & Machado (2003) propõe um modelo evolucional para o Terreno Oriental: 1) Magmatismo do tipo MORB entre o Cráton São Francisco e o Terreno Oriental em cerca de 850 Ma representando a quebra de um Super Continente em cerca de 900 Ma (figura 8a); 2) Subducção com vergência para leste representada por magmatismos começando em cerca de 790 Ma gerando complexos de arco no terreno Oriental (figura 8b); 3) Colisão do terreno oriental em cerca de 590 Ma gerando as principais estruturas deformacionais (Figura 8c); 4) Continuação da deformação e colisão do Terreno Cabo Frio, marcado pela orogenia Búzios entre 530 e 495 Ma (Figura 8d); 5) Colapso do edifício vulcânico e geração de granitos (Figura 8e).

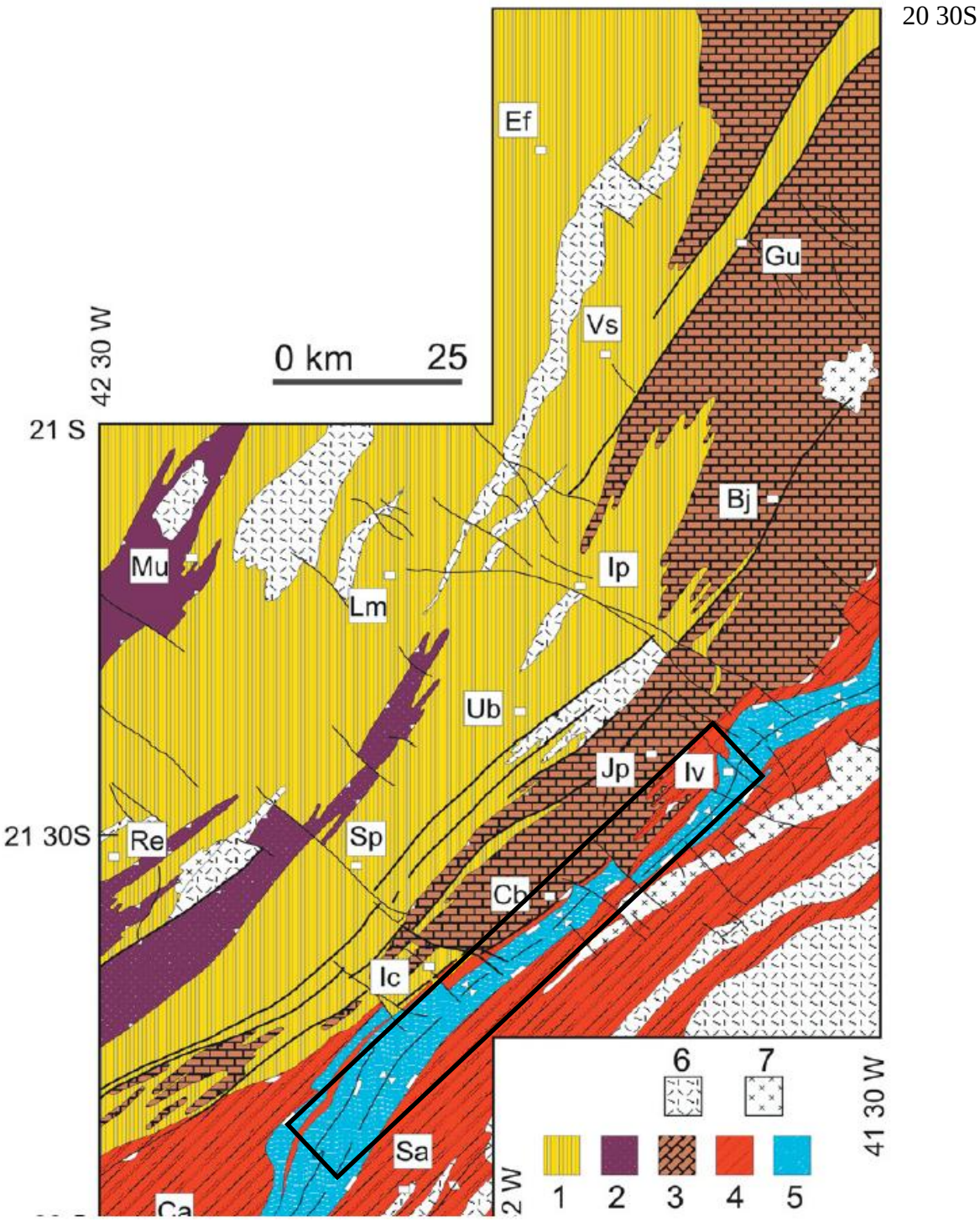
Figura 8: Representação da evolução tectônica da Faixa Ribeira



Fonte: Adaptado Heilbron et al., 2000.

A área de interesse está mais precisamente inserida no contexto do Terreno Oriental. Este terreno pode ser definido como um arco magmático maduro alojado em uma cobertura sedimentar de margem passiva sendo subdividido em três domínios: Domínio Cambuci, Domínio Costeiro e Domínio Italva. (Tupinambá et al; 2007) (Figura 9).

Figura 9: Domínios tectônicos da Faixa Ribeira Setentrional e área de interesse em preto



Legenda: 1 – Terreno Ocidental, Domínio Juiz de Fora; 2 – Klippe Paraíba do Sul; Terreno Oriental, 3 a 5: 3 – Domínio Costeiro; 4 – Domínio Cambuci; 5 – Klippe de Italva; 6 a 8 - Rochas plutônicas mais ou menos gnaissificadas: 6 – Granitóides tipo-S ou híbridos meta a peraluminosos; 7 – Granitóides Tipo-I metaluminosos. Cidades mencionadas: Ca, Cantagalo; Sa, São Sebastião do Alto; Ic, Itaocara; Cb, Cambuci; Sp, Santo Antônio de Pádua; Re, Recreio; Iv, Italva; Jp, São João do Paraíso; Ub, São José de Ubá; Lm, Laje do Muriaé; Mu,Muriaé; Ip, Itaperuna; Bj, Bom Jesus do Itabapoana; Vs, Varre-Sai; Gu, Guaçuí; Ef, Espera Feliz.
Fonte: TUPINAMBÁ et al, 2007.

Os Domínios Cambuci e Italva representam as bacias ante-arco e retro-arco, respectivamente, enquanto o Domínio Costeiro aloja o Arco Magmático Rio Negro. O Domínio Cambuci aflora como uma *klippe* sinformal sobre o Domínio Juiz de Fora do Terreno Oriental e se estende da região central do Rio de Janeiro até o Estado do Espírito Santo.

Compreende uma sucessão metavulcano-sedimentar metamorfizada em fácies anfibolito alto a granulito, invadida por diversas gerações de rochas granitoides, no qual o embasamento apresenta idades superiores a 1,7 Ga.

O Domínio Costeiro compreende sucessões metassedimentares, intrudidas por ortognaisses tonalíticos, dioríticos e gabros do Arco Magmático Rio Negro e granitoides mais recentes.

A estrutura interna do Domínio Costeiro é representada por dobras de grande escala, associadas a uma xistosidade de mergulho suave, além de zonas de cisalhamento subverticais relacionadas a dobras abertas com *trends* NE e NW.

O contato com Domínio Juiz de Fora do Terreno Ocidental é caracterizado por uma zona de cisalhamento definida como CTB – *Central Tectonic Boundary*. (Tupinambá & Heilbron, 2002; Heilbron & Machado, 2003; Peixoto & Heilbron, 2010; Peixoto, 2010)

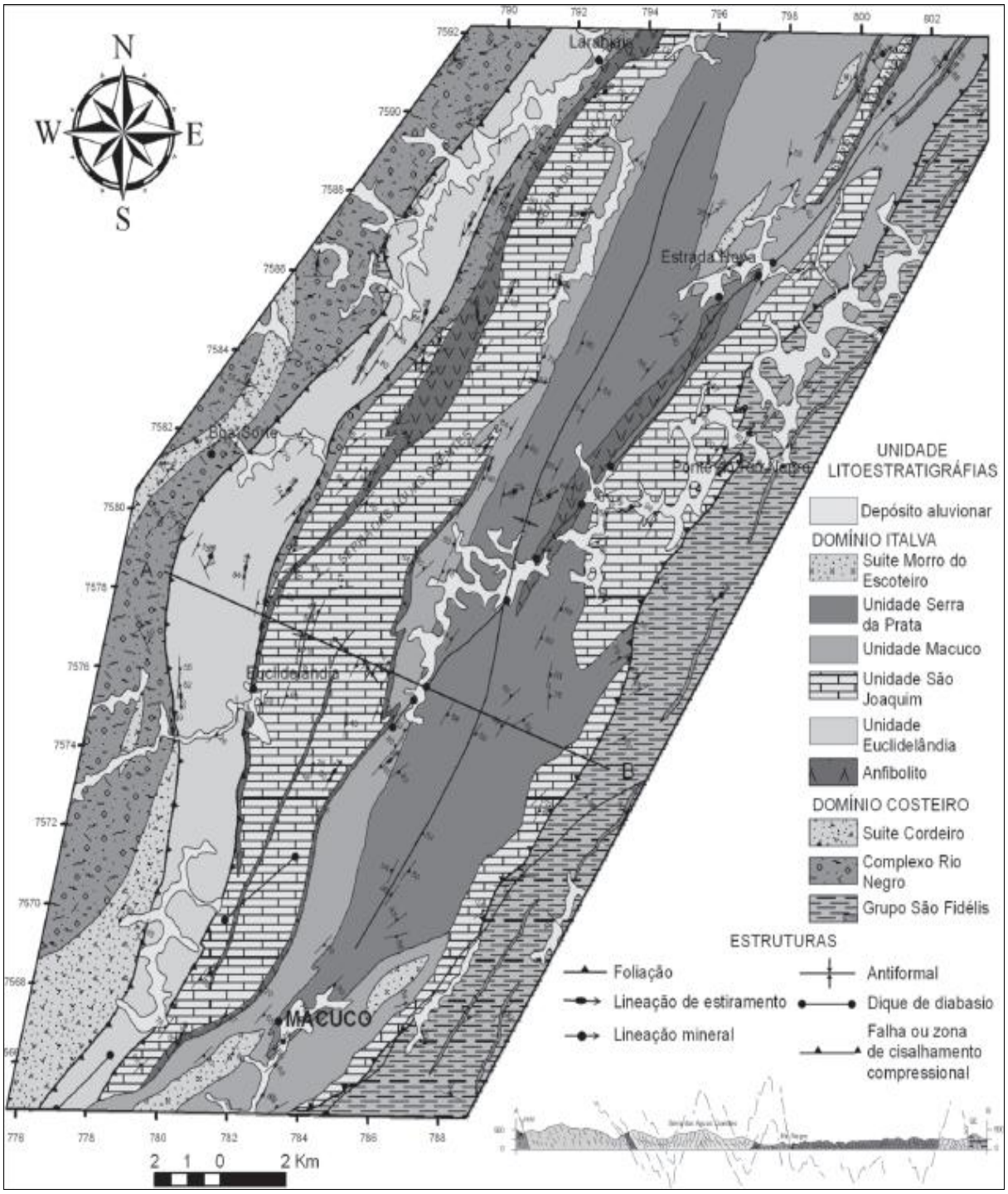
O Domínio Italva, unidade de interesse, está localizado nas regiões Centro e Noroeste Fluminense, se estendendo desde Cantagalo até o sul do Estado de Espírito Santo. É uma klippe sinformal sobre o Domínio Costeiro e na sua base encontram-se dioritos, gabros e tonalitos do Complexo Rio Negro e o restante é composta por rochas do Grupo Italva.

O ambiente tectônico é caracterizado, a partir de dados geoquímicos, como de retroarco onde a depressão gerada durante a subducção foi entulhada por grauvacas derivadas de granitóides provenientes de zonas continentais montanhosas.

Desde a década de 1950 as rochas do Domínio Italva foram denominadas de: Conjunto de Série Paraíba-Desengano, Grupo Paraíba do Sul, Formação Euclidelândia e atualmente Grupo Italva. (Matos et.al, 1980)

É dividido (Figura 10): 1) Suíte Morro do Escoteiro: composta por (granada) biotita muscovita leucognaisse; 2) Anfibolito: está associado tanto ao mármore quanto aos gnaisses do Domínio Italva; 3) Unidade Serra da Prata: composta por gnaisses migmatíticos; 4) Unidade Macuco: representada por granada biotita gnaisse graníticos e tonalíticos; 5)Unidade São Joaquim (unidade de interesse no estudo): representada por mármores, faixas gnáissicas e anfibolíticas; 6) Unidade Euclidelândia: representada por biotita muscovita gnaisse granítico a tonalítico; (Peixoto e Heilbron, 2010).

Figura 10: Mapa e perfil geológico-estrutural do Domínio Italva na região NE do Estado do Rio de Janeiro



Fonte: PEIXOTO e HEILBRON, 2010.

A unidade São Joaquim, onde está localizada a área de interesse, é representada por mármores que compõem o relevo mais escarpado da região representado pelas principais serras a W da área: Serra das Águas Quentes, Serra do Cândido e Serra Vermelha.

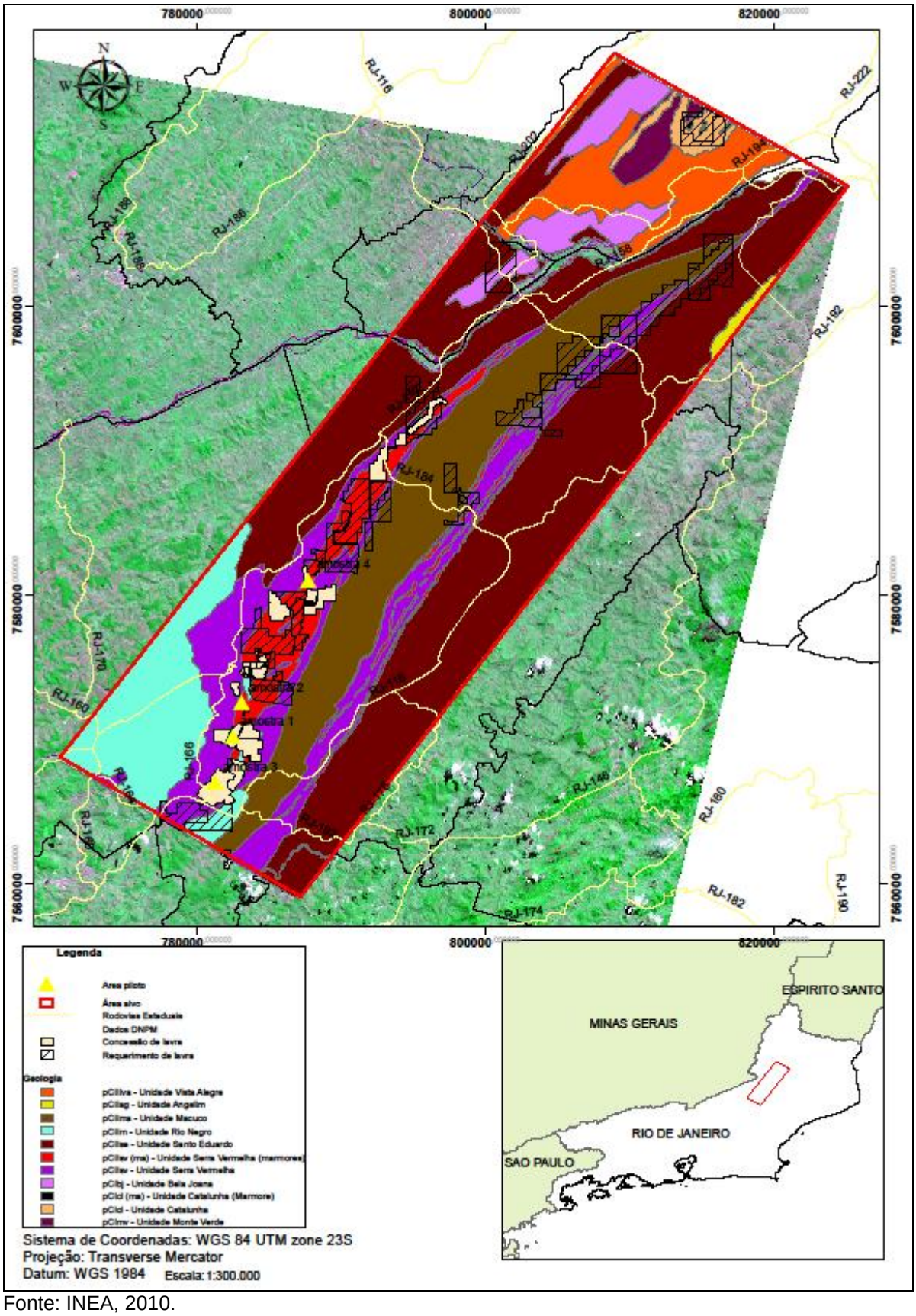
De coloração variada desde branca, amarelada, cinza azulada de aspecto leitoso e azul. A granulometria varia de média a muito grossa com cristais de carbonatos romboédricos bem desenvolvidos que chegam a 3 cm. Faixas gnáissicas (não mapeáveis) e anfibolíticas (mapeáveis ou não) estão inclusas nesta unidade. Os anfibolitos são boudinse camadas centimétricas a métricas contínuas, paralelas à foliação. Em geral apresentam granulometria fina a média, são anisotrópicos e ricos minerais opacos, pirita.

O contado da Unidade São Joaquim com as unidades adjacentes é dado por uma intercalação marcada por contatos bruscos desde escala centimétrica a métrica. Camadas pouco espessas de anfibolito podem marcar esse contato. A leste da área o contato, embora não observado, é dado com rochas do Grupo São Fidélis do Domínio Costeiro. (Peixoto & Heilbron, 2010)

A figura 11 apresenta a geologia da área de interesse. As rochas carbonáticas estão localizadas nas unidades Serra Vermelha (mármores), representada pela cor vermelha no mapa e unidade Catalunha (mármores), representados pela cor preta. (INEA, 2010)

Observa-se que grande parte da concessão e requerimento de lavra para rochas carbonáticas na Região Noroeste Fluminense estão localizadas na unidade Serra Vermelha, que possui a presença da maior parte dos mármores da área de estudo.

Figura 11: Mapa de geologia da área de estudo com destaque para as áreas de exposição de rochas carbonáticas e áreas de concessão e requerimento para lavra.



Fonte: INEA, 2010.

Diante da diversidade de litologias, as regiões Centro-Norte e Noroeste Fluminense, no qual está inserida a área de estudo, foi alvo de diversos mapeamentos geológicos, sendo um dos primeiros o Projeto Carta Geológicos do Estado do Rio de Janeiro realizado pelo DRM na década de 80 onde as ocorrências foram mapeadas nas folhas Cantagalo, Santa Maria Madalena, Santo Antônio de Pádua, Cambuci e Italva em escala 1:50.000.

6 **REFERENCIAL TEÓRICO**

6.1 **O sensor ASTER**

O sensor multiespectral ASTER foi lançado em dezembro de 1999, a bordo do satélite Terra como parte do programa *Earth Observation System*. É um projeto de cooperação entra a *National Aeronautics and Space Administration* – NASA e o Ministério do Comércio Internacional e Indústria do Japão (NASA, 2008) (https://lpdaac.usgs.gov/about/citing_lp_daac_and_data).

O ASTER é um sistema multiespectral que possui características de sensores hiperespectrais possuindo três subsistemas independentes de imageamento. Estes subsistemas que abrangem faixas do espectro eletromagnético do visível ao termal, sendo: 1) três bandas espectrais com resolução espacial de 15 m no VNIR (região do visível e infravermelho próximo; 2) seis bandas espectrais com resolução de 30 m no SWIR (região do infravermelho de ondas curtas); 3) cinco bandas, com resolução de 90 m no TIR (região do infravermelho termal) (Tabela 2).

O sensor ASTER é considerado como um sistema multiespectral melhorado quando comparado com sistemas multiespectrais mais comuns, como o Landsat - 7 e o SPOT 5, lançado em 2002. A plataforma do SPOT operam com três satélites (4, 5 e 6) que atuam em conjunto. As imagens SPOT possuem aplicações nas mais diversas áreas científicas e comerciais, no monitoramento de fenômenos e recursos naturais, acompanhamento do uso agrícola das terras, apoio ao monitoramento e definição de áreas de preservação, atualização de mapas e cartas, entre outros.

Na tabela 2, o intervalo espectral referente à banda 7 do sensor ETM+ (2,08-2,35μm) foi subdividido em cinco bandas da região SWIR no sensor ASTER.

Tabela 2: Intervalo espectral das bandas dos sensores ASTER/Terra e ETM+/Landsat-7 e resolução espacial

ASTER/Terra					**ETM+/Landsat-7**		
Subsistema	N°de bandas	Faixa espectral (μm)	Resolução Espacial, m	Resolução radiométrica	Banda	Faixa espectral (μm)	Resolução Espacial, m
VNIR					1	0,45-0,52	30
	1	0.52-0.60	15	8 bits	2	0,52-0,60	30
	2	0.63-0.69			3	0,63-0,69	30
	3	0.78-0.86			4	0,76-0,90	30
SWIR	4	1.60-1.70	30	8 bits	5	1,55-1,75	30
	5	2.145-2.185			7	2,08-2,35	30
	6	2.185-2.225					
	7	2.235-2.285					
	8	2.295-2.365					
	9	2.360-2.430					
TIR	10	8.125-8.475	90	12 bits	6	10,4-12,5	90
	11	8.475-8.825					
	12	8.925-9.275					
	13	10.25-10.95					
	14	10.95-11.65					
PAN	-	-	-	-	8	0,52-0,90	15

Fonte: Adaptado ABRAMS et al., 2008.

As bandas da região do VNIR, que estão compreendidas entre 0.52-0.86 μm, são importantes na determinação de vegetação e minerais de óxido de ferro em solo e rochas.

O subsistema SWIR (1,60-2,43 μm) é composto por seis bandas, sendo as bandas 5-9 úteis na identificação de minerais como os filossilicatos e carbonatos. O subsistema TIR é composto por cinco bandas na região do infravermelho termal que são utéis na identificação de sílica no conteúdo das rochas, a partir da avaliação de emissividade espectral dos materiais. (Yamaguchi et al., 1998)

Assim, técnicas inicialmente desenvolvidas para análise de dados hiperespectrais podem ser utilizadas com dados ASTER a fim de reconstituir feições de absorção mineral, como vem sendo utilizado com sucesso em estudos geológicos. (Lima, 2004)

Rowan & Mars (2003) mapearam unidades litológicas na região Mountain Pass, Califórnia, utilizando técnicas de sensoriamento remoto em dados dos subsistemas VNIR, SWIR e TIR do sensor ASTER. Obteve bons resultados, para a identificação de rochas carbonáticas expostas como calcita, dolomita e mámores

Lima (2004) utilizou imagens ASTER para discriminação espectral de variações faciológicas no granito Serra Branca, GO. Os resultados para a identificação de granitos não foram tão satisfatório quanto a discriminação entre rocha-solo-vegetação. O autor apresenta a influência da vegetação fotossinteticamente ativa e/ou não-ativas (gramíneas) no substrato, dificultando o processo de detecção mineral.

Ducart (2004) caracterizou alteração hidrotermal em depósitos auríferos no distrito de Los Menucos, Argentina utilizando imagens do sensor ASTER e técnicas se sensoriamento remoto e espectrorradiometria de reflectância. Os resultados foram satisfatórios, utilizando os dados do sensor ASTER para produzir informação geológica/mineralógica para a exploração mineral.

Markoski (2006) utilizou imagens ASTER para caracterização e mapeamento de rejeito de garimpos de ametistas no Rio Grande do Sul e demonstrou que as imagens ASTER são eficazes para caracterização mineral. No entanto, a presença de áreas de vegetação ao lado dos garimpos influenciou sobre o processo de extração de espectros de referência.

Pedrosa (2010) utilizou imagens ASTER e espectrorradiometria para discriminar variações faciológicas de carbonatos na região da Serra do Ramalho-BA. O autor obteve bons resultados para o mapeamento de rochas carbonáticas utilizando a espectrorradiometria e a técnica de classificação espectral SAM.

Pode-se observar que a presença de solo árido ou completamente exposto é fundamental para obter bons resultados das respostas espectrais dos minerais. A presença de vegetação no solo pode interferir significantemente o processo de identificação mineral.

6.2 **Tipos de classificação e classificadores multiespectrais**

A classificação digital de imagens consiste no agrupamento de *pixels* das imagens com as mesmas características espectrais a um número de classes que descrevem um objeto real (vegetação, água, solo etc.) com base nos seus valores digitais (níveis de cinza). É um processo estatístico e probabilístico que tenta ao máximo ter um resultado próximo à realidade.

Alguns fatores influenciam nos resultados de uma classificação, como por exemplo, a interferência da atmosfera na redução dos contrastes espectrais dos alvos e da topografia, que interfere na reflectância, com adição de sombras e ruídos que frequentemente estão presentes na imagem.

As técnicas de classificação utilizadas apenas para uma banda da imagem são conhecidas como classificações unidimensionais. Quando são utilizadas técnicas que dependem da distribuição de níveis de cinza em várias bandas espectrais, são definidas como classificação multiespectral. (Meneses & Almeida, 2011)

Os classificadores podem ser divididos em "pixel a pixel" que usam de forma individual a informação espectral de cada pixel na busca por regiões homogêneas e classificadores por regiões, que utilizam a informação espectral de cada pixel e a relação espacial de vizinhança entre pixels (áreas homogêneas espectrais e espaciais da imagem).

Os métodos de classificação se dividem basicamente em duas categorias: a classificação supervisionada e a não supervisionada. Na não supervisionada não há qualquer conhecimento prévio do classificador sobre os atributos das classes pertinentes a cena. Podemos dizer que, neste caso, quanto maior a heterogeneidade das amostras, maior a certeza de que todas as classes possíveis estarão representadas.

Os "pixels" dentro de uma área de treinamento são submetidos a um algoritmo de agrupamento ("clustering") que determina o agrupamento do dado, numa feição espacial de dimensão igual ao número de bandas presentes. Este algoritmo assume que cada grupo ("cluster") representa a distribuição de probabilidade de uma classe.

Exemplos de métodos de classificação não supervisionada inseridas no programa ENVI são o ISODATA e K-means.

Na classificação supervisionada, o classificador orienta sua busca de classes a partir de amostras de treinamento feitas anteriormente com as classes de interesse da cena. É a mais utilizada na análise quantitativa dos dados de sensoriamento remoto. (INPE, 2014)

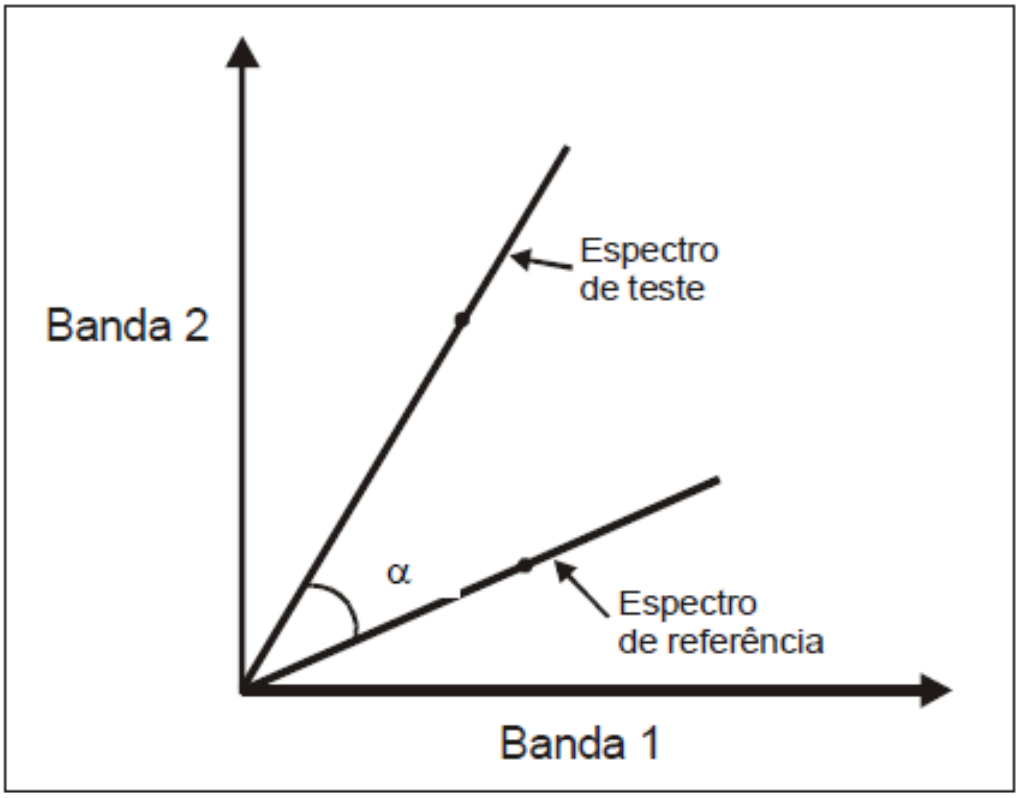
As etapas de uma classificação supervisionada ocorrem com a definição das classes, escolhas de amostras de treinamentos e aplicação de um algoritmo de classificação (por exemplo, Métodos do Paralelepípedo, Mínima Distância, Mapeador de Ângulo Espectral ("Spectral Angle Mapper", SAM).

A técnica Mapeador de Ângulo Espectral (*Spectral Angle Mapper – SAM*) é uma ferramenta que permite o mapeamento rápido da similaridade entre o espectro de um pixel e o de um material de referência. (Kruse et al. 1993). O espectro de referência pode ser tanto de laboratório quanto de campo, de uma biblioteca espectral ou extraído da própria imagem.

O algoritmo determina a similaridade espectral entre dois espectros através do cálculo do ângulo formado entre eles, tratando-os como vetores em um espaço de dimensionalidade correspondente ao número de bandas (nb).

A figura 12 apresenta uma representação simplificada desta operação. Considerando um espectro de referência e outro de teste, a partir de duas bandas representadas bidimensionalmlente como dois pontos, quanto menor for o ângulo determinado entre os dois vetores (espectros de reflectância), maior será a sua similaridade. O algoritmo SAM generaliza essa interpretação geométrica para o espaço nb-dimensional.

Figura 12: Representação dos espectros de referência e de teste para uma imagem e com o ângulo formado entre eles



Fonte: LIMA (2004).

A técnica SAM determina a similaridade de um espectro teste *t* para um espectro de referência *r.* Esta medida de similaridade é insensível aos fatores de ganho já que o ângulo entre dois vetores é invariante em relação aos comprimentos dos vetores.

Assim, espectros de laboratório podem ser diretamente comparados aos espectros de reflectância de superfície dos *pixels,* os quais inerentemente apresentam um fator de ganho desconhecido relacionado a efeitos de iluminação devidos à topografia. (Lima, 2004; Pedrosa, 2010)

Como resultado, obtem-se uma imagem classificada, apresentando o melhor ajuste para cada pixel. Adicionalmente, são fornecidas imagens-produto (*rule*) que mostram a distância angular (em radianos) entre cada espectro da imagem e cada espectro de referência.

Os pixels escuros na imagem "*rule*" representam ângulos espectrais de valor baixo e, portanto, mais similares aos espectros de referência (endmembers). Para uma melhor visualização, estas imagens são invertidas para que os melhores ajustes (representados pelos menores ângulos) apareçam em tom claro.

Na técnica SAM utilizado neste trabalho foi comparado dois dados distintos de entrada: 1) curvas de reflectância da calcita e dolomita obtidas a partir da biblioteca espectral do *United States Geological Survey* (USGS) presente no programa ENVI 4.7 e 2) espectros de reflectância representativos das unidades litológicas presentes na área dos carbonatos, obtidos a partir das imagens.

6.3 **Comportamento espectral dos carbonatos**

A radiação eletromagnética (REM) é capaz de penetrar num fina camada da superfície dos objetos, entre 10 a 50 micrometros de espessura, que é suficiente para a interação da REM em nível microscópico com os elétrons ou moléculas do material. Essas interações da composição ou constituição dos materiais em nível de átomos e moléculas têm importância para o sensoriamento remoto, pois todos os materiais diferem entre si em função de seu arranjo atômico molecular.

As transições eletrônicas e moleculares ocorrem quando a REM é absorvida, que ocorrem somente quando houver energia suficiente para proporcionar a transição de um nível energético para outro de energia superior. Assim, a curva espectral desse material mostrará para esse nível energético uma forte feição de absorção em determinado comprimento de onda.

Como a distribuição dos níveis energéticos difere de um material para outro, a quantidade de energia a ser absorvida em determinado comprimento de onda é função da composição dos materiais.

Assim, a intensidade e a posição que as feições de absorção ocupam numa curva espectral são uma “assinatura espectral” daquele mineral. Os minerais de composição carbonática como a calcita, dolomita, rodocrosita e siderita apresentam cinco feições de absorção, no qual duas dessas absorções ocorrem em comprimentos de onda maiores, em 2,50-2,55 μm e em 2,30-2,35 μm, são mais intensas e exibem uma feição dupla devido à estrutura mineral.

As outras três bandas de absorção em 2,160 μm, 2,00 μm e 1,850 μm apresentam como características a presença de pequenas saliências ou ombros laterais a banda de absorção.

Esses diferentes comprimentos de onda em que as bandas de absorção ocorrem são função das diferenças de massas dos cátions, da mineralogia primária, da estrutura do cristal e do seu sítio de simetria. (Pedrosa, 2010)

A região do infravermelho de ondas curtas (1,5-2,5 μm) é um intervalo espectral importante para a detecção e discriminação de minerais e rochas. Esta região tem grande importância para o estudo do comportamento espectral das rochas carbonáticas, por apresentar no intervalo entre 1,7-2,5 μm do comprimento de onda suas principais feições de absorção. (Meneses e Madeira, 2001)

Crowley (1986) observou uma relação entre as variações nas feições de absorção dos carbonatos com sua mineralogia. Para a calcita a principal feição está centrada em 2,335 μm, para os dolomitos próximas a 2,316 μm e para os carbonatos próximo a 2,500 μm.

Analisou também os efeitos espectrais das impurezas de óxido de ferro, argila, sílica e matéria orgânica comparando rochas com texturas similares puras e carbonatos impuros. Identificou que a matéria orgânica quando presente causa a redução na intensidade das bandas de absorção dificultando a determinação das composições dos carbonatos.

A partir de técnicas de espectrorradiometria, Gaffey (1987) descreveu a presença de sete bandas de absorção na região do VNIR e SWIR de três minerais carbonático: calcita, dolomita e aragonita. Na tabela 3 são apresentados os valores das posições das bandas.

Tabela 3: Posições dos picos de absorção de carbonatos em μm nas bandas ASTER

Mineral	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	Banda 6	Banda 7
Calcita ($CaCO_3$) CaO 56% Sistema cristalino: romboédrico	2,532 2,530 2,535 2,541	2,337 2,334 2,333 2,340	2,265 2,254 2,261 2,272	2,171 2,169 2,167 2,179	1,991 1,998 1,974 1,979	1,882 1,876 1,885 1,871	1,762 1,758 1,753 1,770
Dolomita $CaCO_3$, $Mg\ CO_3$ CaO 30,4% MgO 21,95% Sistema cristalino: romboédrico	2,508 2,513 2,505 2,516 2,518	2,323 2,312 2,320 2,322 2,319	2,234 2,244 2,235 2,248 2,247	2,155 2,150 2,157 2,165 2,170	1,971 1,975 1,974 1,977 1,979	1,872 1,882 1,853 1,869 1,862	1,735 1,740
Aragonita ($CaCO_3$) CaO 56% Sistema cristalino: Ortorrômbico	2,535 2,529 2,532	2,331 2,328 2,332	2,257 2,254 2,258	2,195 2,186 2,201	1,992 1,990 1,993	1,877 1,873 1,874	1,748 1,744 1,737

Fonte: Modificado de Gaffey, 1987.

As posições das bandas de absorção variam com as diferentes composições químicas dos carbonatos. As diferenças entre as posições das bandas da calcita e aragonita, que possuem a mesma composição química, são pequenas e resultantes da diferença de estrutura romboédrica e ortorrômbica entre os dois minerais. (Pedrosa, 2010)

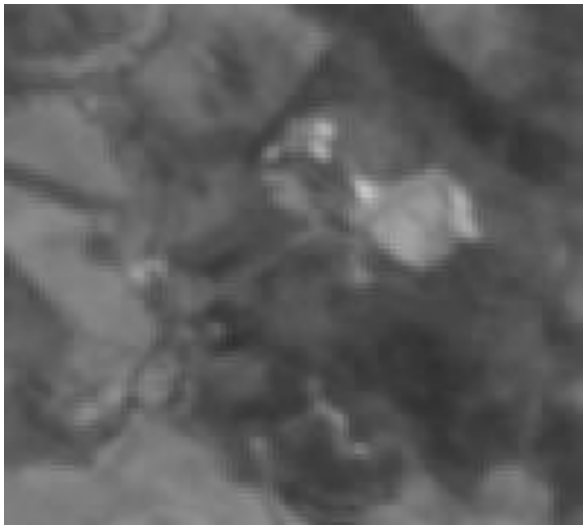
7 ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS OBTIDOS

7.1 Processamento digital da imagem Aster

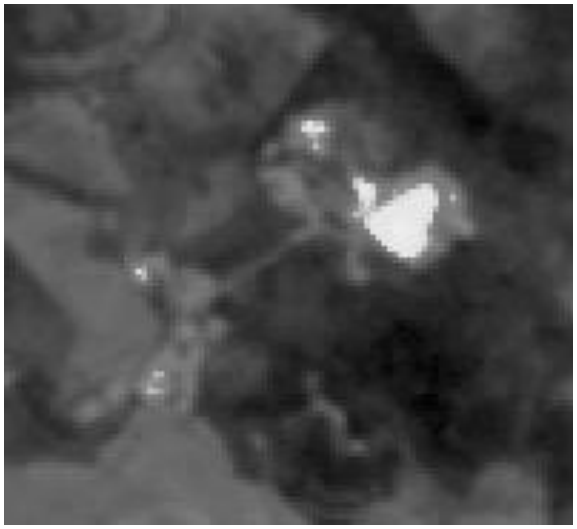
Para obter-se respostas espectrais das rochas carbonáticas especificas da área de interesse nas bandas referentes ao SWIR do sensor ASTER foram utilizadas amostras das imagens adquiridas de áreas onde comprovadamente são observadas rochas aflorantes na região.

Como exemplo, a figura 13 apresenta as bandas espectrais, sem realce, da região do SWIR referente à área piloto 3, que é a maior área de exposição presente na área de interesse.

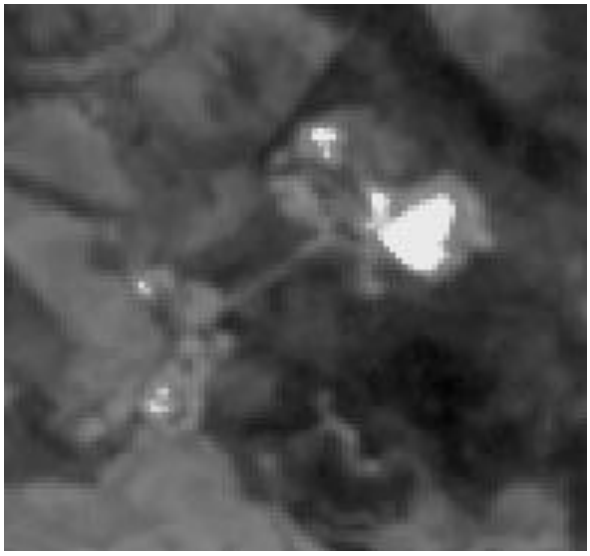
Figura 13: Bandas espectrais da região do SWIR referente à área piloto (amostra 3)



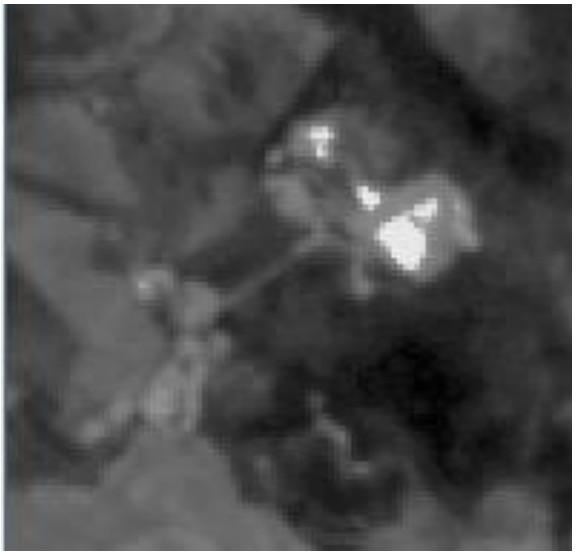
B4 (1,6 - 1,7 µm)



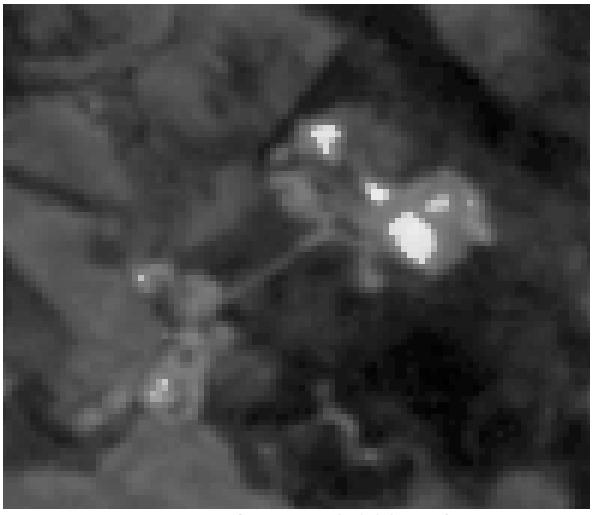
B5 (2,145 - 2,185 µm)



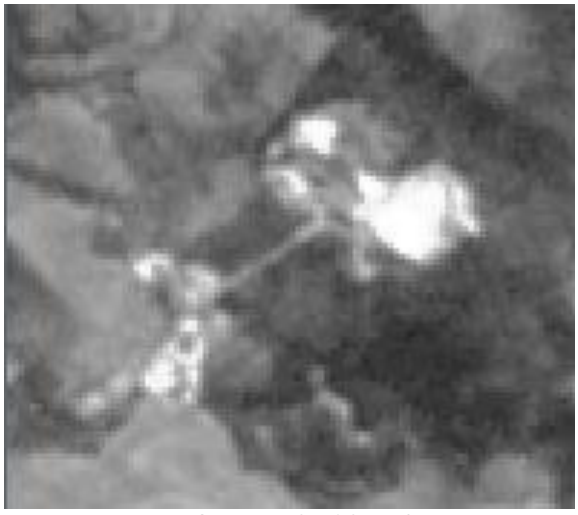
B6 (2,185 - 2,225 µm)



B7 (2,235 - 2,285 µm)



B8 (2,295 - 2,360 µm)



B9 (2,360 - 2,430 µm)

Fonte: A autora; 2014.

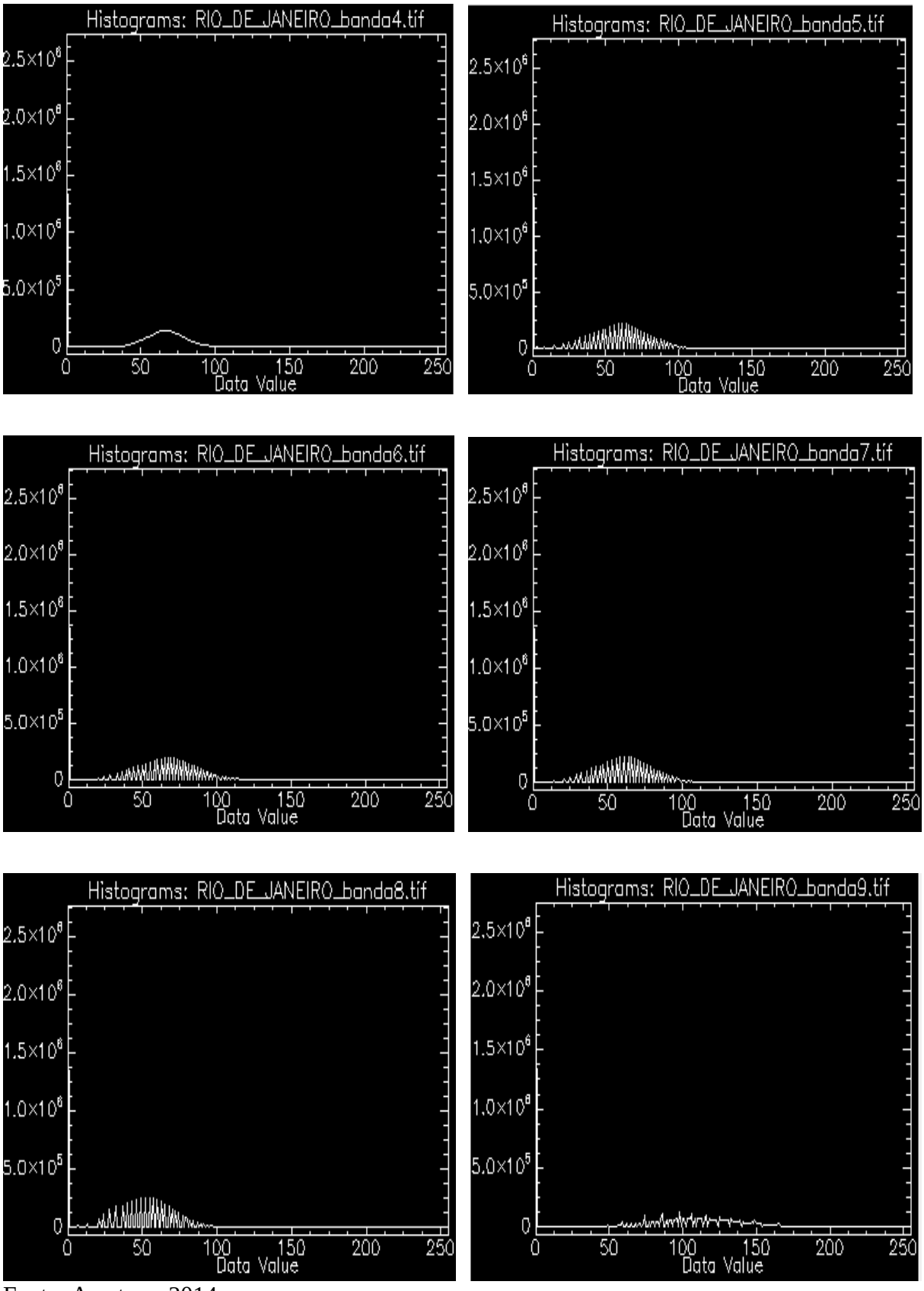
A partir da análise e comparação entre as respostas espectrais das bandas da região do SWIR, podemos observar que a banda 9 (2,360 - 2,430 µm) é a banda que possui o maior conteúdo de informações, diferenciando um maior número de alvos, especificamente entre as rochas carbonáticas.

A banda 4 (1,6 - 1,7 µm) possui tons de cinza muito próximos resultando assim em menor contraste nas rochas carbonáticas.

As bandas 5 (2,145 - 2,185 µm), 6 (2,185 - 2,225 µm), 7 (2,235 - 2,285 µm) e 8 (2,295 - 2,360 µm) apresentam um comportamento espectral muito semelhante, o que dificulta a seleção de qual banda expressa o melhor contraste dos alvos somente pela análise visual.

Para compreender o comportamento espectral das amostras em cada imagem, gerou-se para cada banda um histograma (Figura 14), que vai representar a distribuição estatística dos níveis de cinza para cada banda. O espalhamento dos valores de nível de cinza (NC) no histograma dá a medida do contraste da imagem (CPRM, 2005).

Figura 14: Histogramas das bandas ASTER referentes à região do SWIR



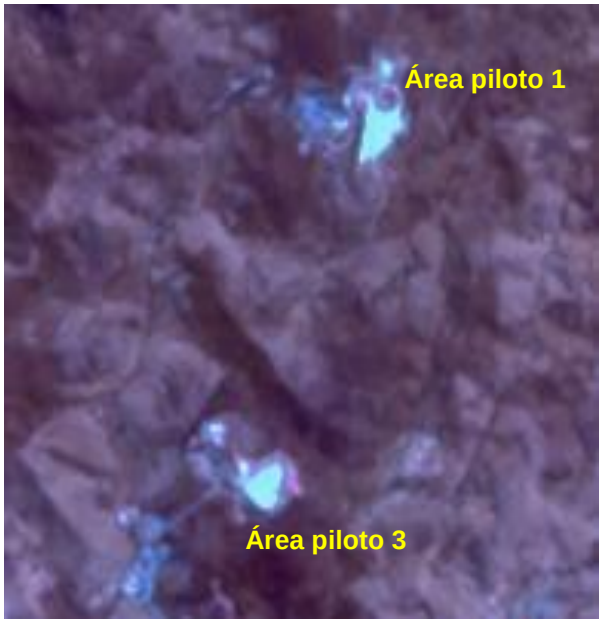
Fonte: A autora; 2014.

A análise dos histogramas nos permite propor hipóteses, no qual a banda 9 possui um maior espalhamento da distribuição do nível de cinza, tendo assim como resultado uma imagem com maior contraste dos alvos. Já os histogramas da banda 5, 6, 7 e 8 são semelhantes possuindo o nível de cinza baixo, resultando assim imagens mais escuras. A banda 4 possui um menos espalhamento do nível de cinza, resultando uma imagem com pouco contraste espectral.

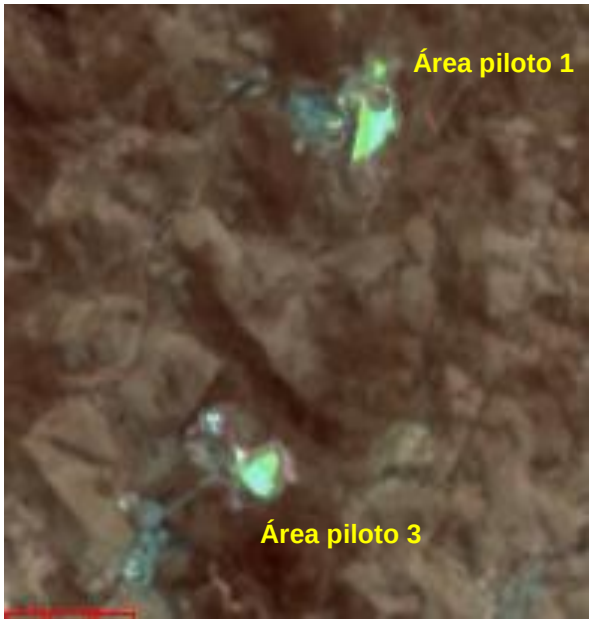
Neste estudo foram utilizadas técnicas de processamento digital como a razão de bandas e composição colorida para a discriminação de alvos referentes a exposição de rochas carbonáticas.

A figura 15 apresenta combinações de bandas que obtiveram um bom realce para a identificação das rochas carbonáticas na área de estudo.

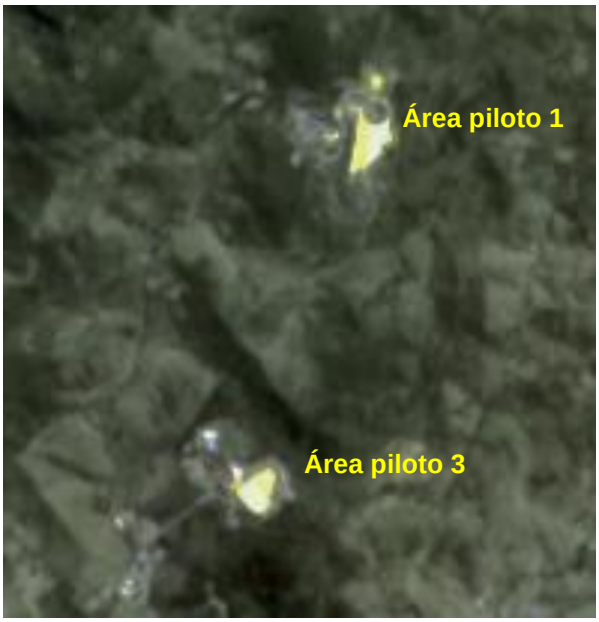
Figura 15: Composições coloridas do sensor ASTER utilizando as bandas da região do SWIR referentes às áreas piloto 1 e 3



RGB 469



RGB 468



RGB 568

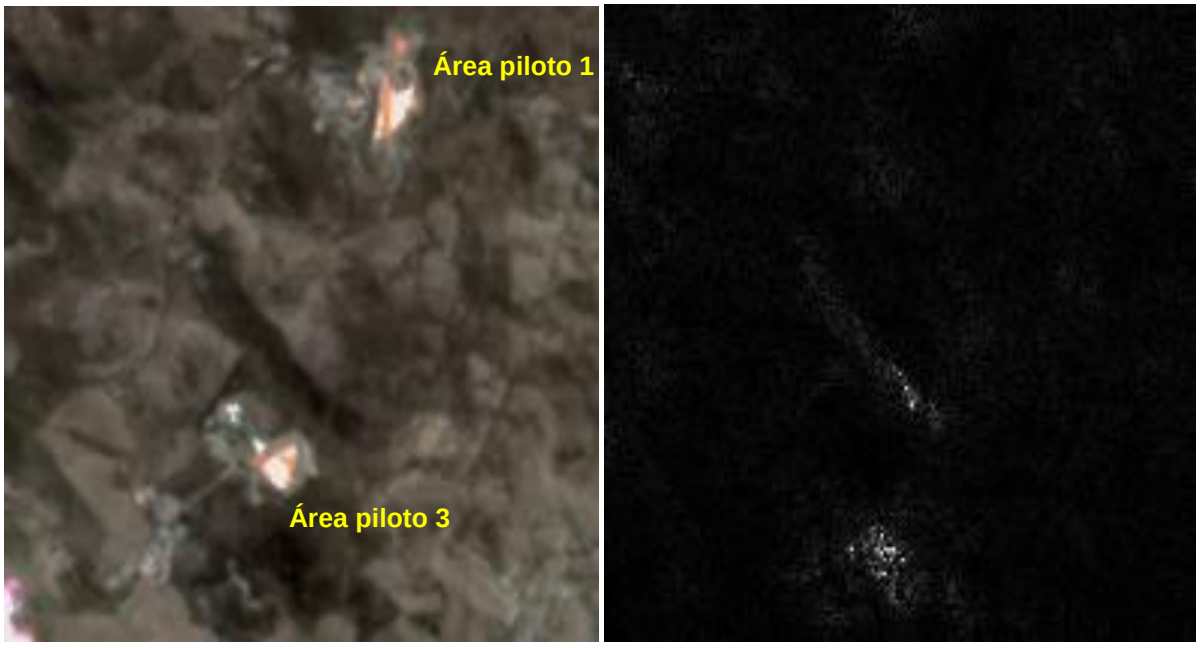
RGB 678

Legenda: (a) - Composição colorida RGB 678 das áreas piloto 1 e 3 com destaque para as rochas carbonáticas. (b) - Resultado da aplicação do índice de calcita para a amostra (IC). Fonte: A autora; 2014.

Dentre várias combinações de bandas 469, 468, 568 e 678 foram as que melhor obtiveram realce para a identificação das rochas carbonáticas.

Os resultados da aplicação da técnica índice de calcita de Ninomiya(2004) pode ser analisado nas Figuras 16 e 17. Os resultados da aplicação da técnica *Relative Absorpton-Band Depth* (RBD), descrito por Rowan & Mars (2003) pode ser analisado na Figura 18.

Figura 16: Resultado do Índice de calcita para as áreas piloto 1 e 3



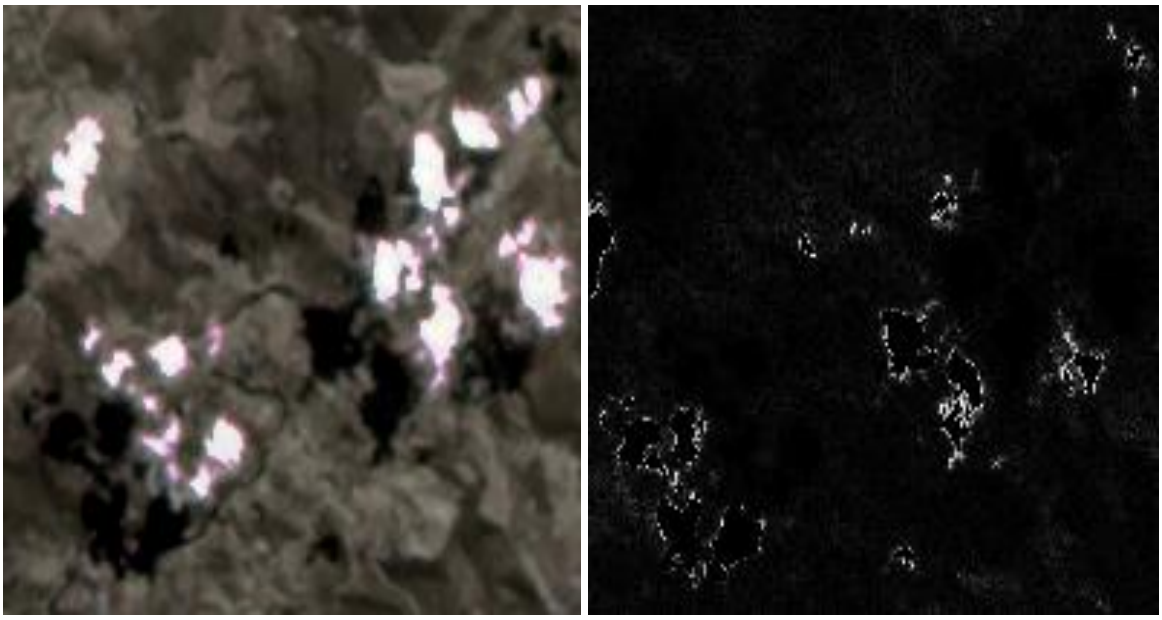
RGB 678 (a) IC= (B6*B9)/B8 (b)

Fonte: A autora; 2014.

Este índice de calcita aplicado resultou pontos na cor branca que representam os *pixels* que possuem composição calcítica na área piloto. No entanto, os pontos não são compatíveis com as áreas de exposição de carbonato na amostra da Figura 16a .

Áreas com presença de nuvens obteve uma resposta semelhante a pixels de composição calcítica, conforme a Figura 17b. Não houve resultados significativos na discriminação de calcita em grande parte da área de estudo devido a similaridade de contraste espectral entre rochas carbonáticas e nuvens.

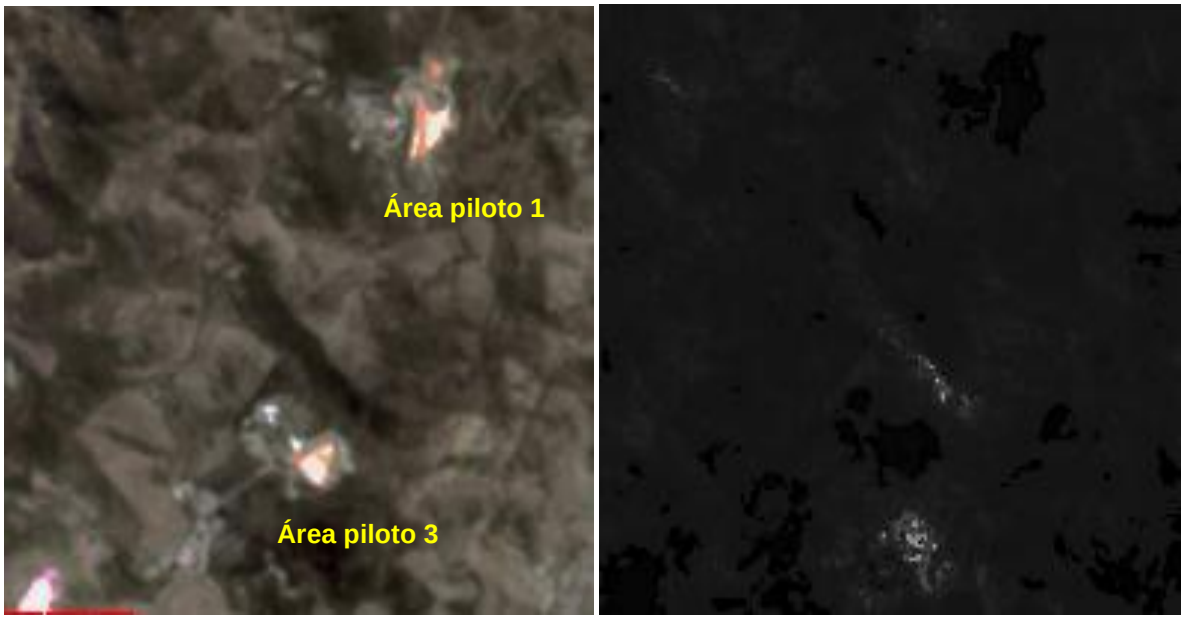
Figura 17: Resultado do Índice de calcita para áreas com presença de nuvens



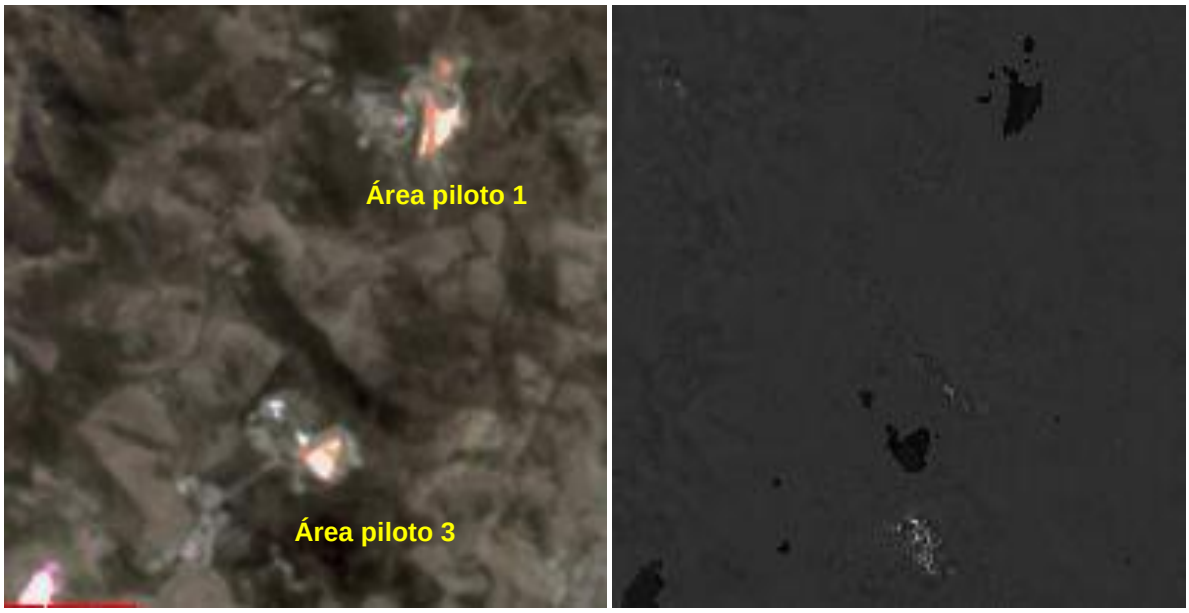
RGB 678 (a) IC= (B6*B9)/B8 (b)

Legenda: (a) Composição colorida RGB 678 com destaque para a presença de nuvens. (b) Resultado da aplicação do índice de calcita para a amostra (IC). Fonte: A autora; 2014.

Figura 18: Resultados da aplicação da razão RDB para calcários e dolomitos.



RGB 678 (a) RDB= (B7+B9)/B8 (b)



RDB= (B6+B8)/B7 (c)

Legenda: (a) Composição colorida RGB 678 com destaque para áreas de exposição de rochas carbonáticas. (b) resultado da razão RDB para calcita. (c) resultado da razão RDB para dolomitos. Fonte: A autora; 2014.

A aplicação da técnica de razão de bandas RDB para calcita e dolomita (Figura 18) apresentou resultados significativos positivamente, principalmente a razão de bandas para discriminação de dolomita. Na Figura 18c, houve uma maior discriminação espectral das áreas carbonáticas em comparação ao resultado da classificação da Figura 18b.

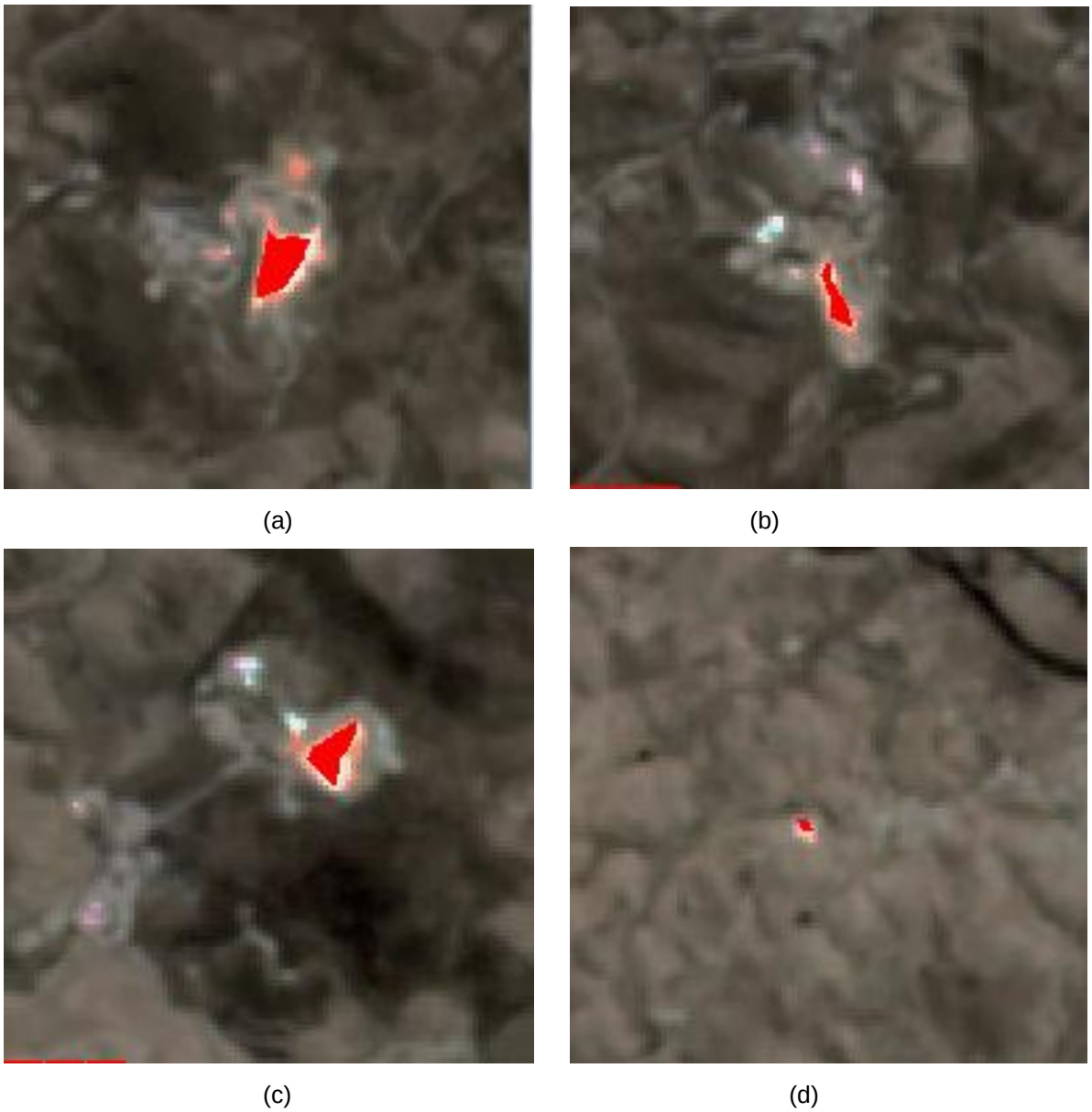
Para identificar áreas que contenham somente rochas carbonáticas, a técnica de razão de bandas para calcários e dolomitos de Rowan & Mars (2003) apresentou os melhores resultados em comparação com a técnica Índice de Calcita de Ninomiya(2004) para discriminação espectral de rochas carbonáticas das áreas piloto.

7.2 **Aplicação da técnica SAM na imagem ASTER.**

Para o processamento digital da imagem, foi utilizado o classificador espectral Spectral Angle Mapper – SAM, que tem como objetivo mapear a similaridade entre espectro de um pixel da imagem e o espetro de referência proveniente de bibliotecas espectrais. O espectro de referência pode ser extraído da própria imagem, de campo ou bibliotecas espectrais. (Lima, 2004)

Neste trabalho utilizou-se na técnica SAM, espectros obtidos: a) de minerais carbonáticos (calcita e dolomita) obtidas a partir da biblioteca espectral do *United States Geological Survey* (USGS) e b) espectros de reflectância referentes às áreas de mineração que representa rochas carbonáticas aflorantes extraídas diretamente da imagem. Na Figura 19, estão representadas as quatro áreas piloto para a classificação.

Figura 19: Áreas piloto utilizada para a classificação SAM.



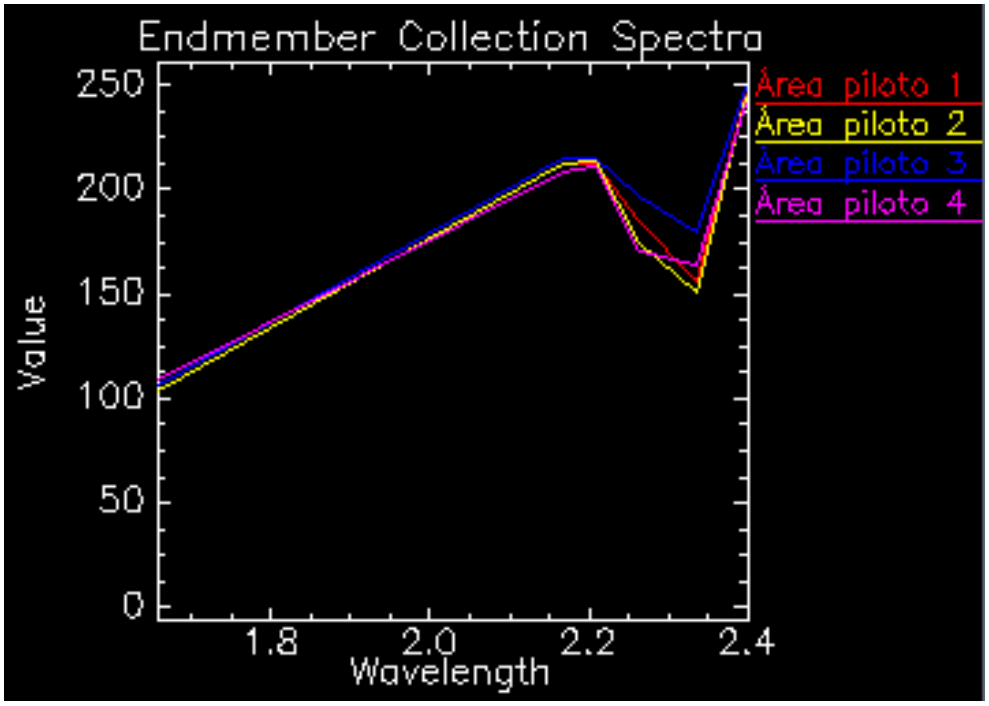
(a) (b)

(c) (d)

Legenda: (a) Área piloto 1. (b) Área piloto 2. (c) Área piloto 3. (d) Área piloto 4. Fonte: A autora; 2014.

Para a classificação espectral foram utilizadas as quatro curvas das áreas utilizadas como espectro de referência. (Figura 20)

Figura 20: Curvas espectrais das áreas coletadas diretamente da imagem ASTER

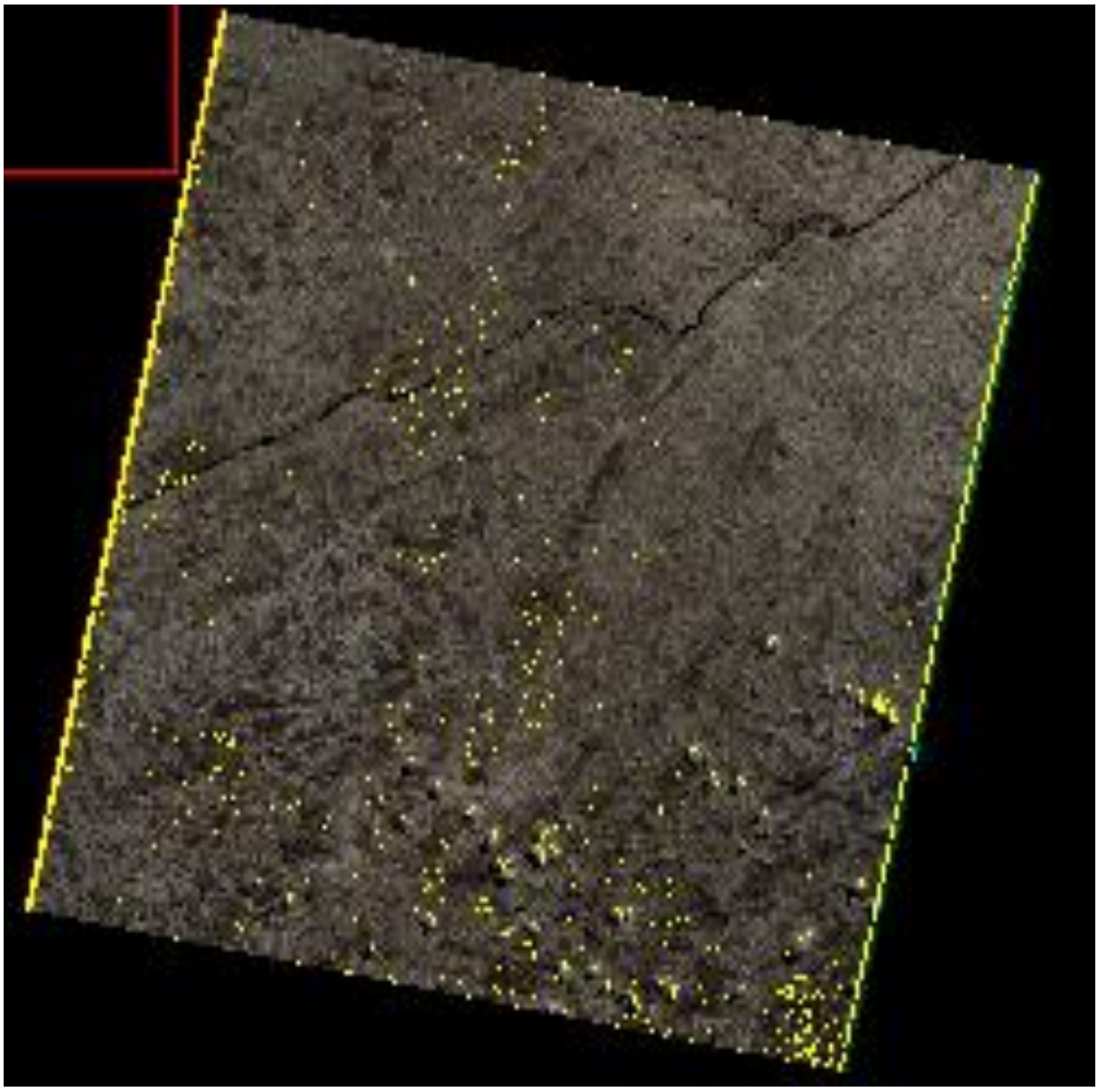


Legenda: Expectros de referência extraídos das quatro áreas piloto utilizadas para a classificação espectral. Fonte: A autora; 2014.

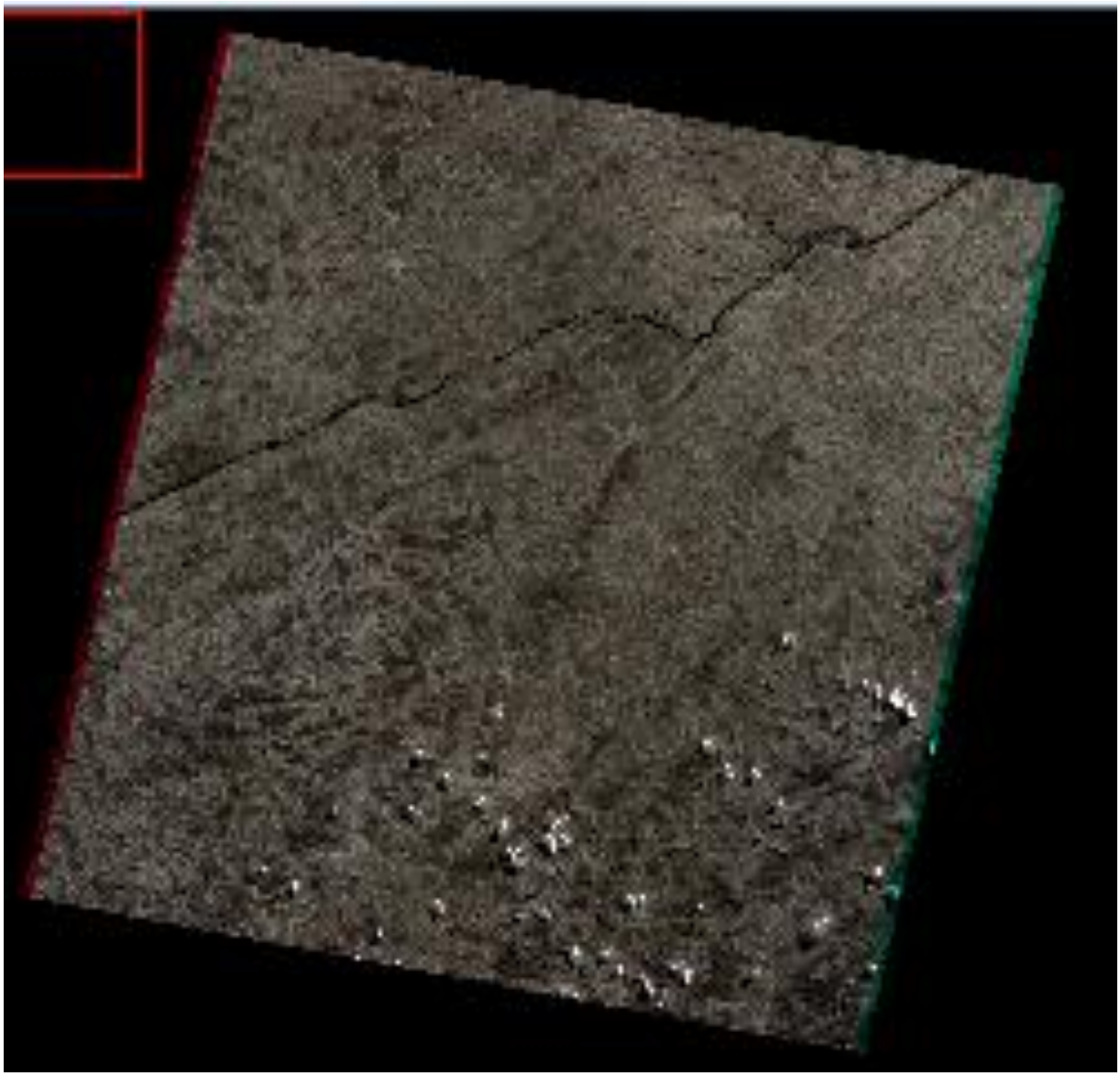
Para a classificação foram testados diversos limites de ângulos de entrada, e observou-se que quanto menor o ângulo mais detalhada é a classificação. O resultado da classificação SAM a partir da coleta de regiões de interesse foi eficiente, pois houve uma discriminação espectral entre áreas de exploração de rochas carbonáticas na imagem.

A Figura 21 apresenta o resultado da classificação SAM utilizando espectros extraídos da imagem. Os resultados do mapeamento espectral obtidos utilizando as áreas piloto da região de interesse estão representados na figura 22. O ângulo de entrada utilizado para esta classificação foi 0,05 radianos.

Figura 21: Resultado da classificação SAM utilizando expectros extraídos da imagem



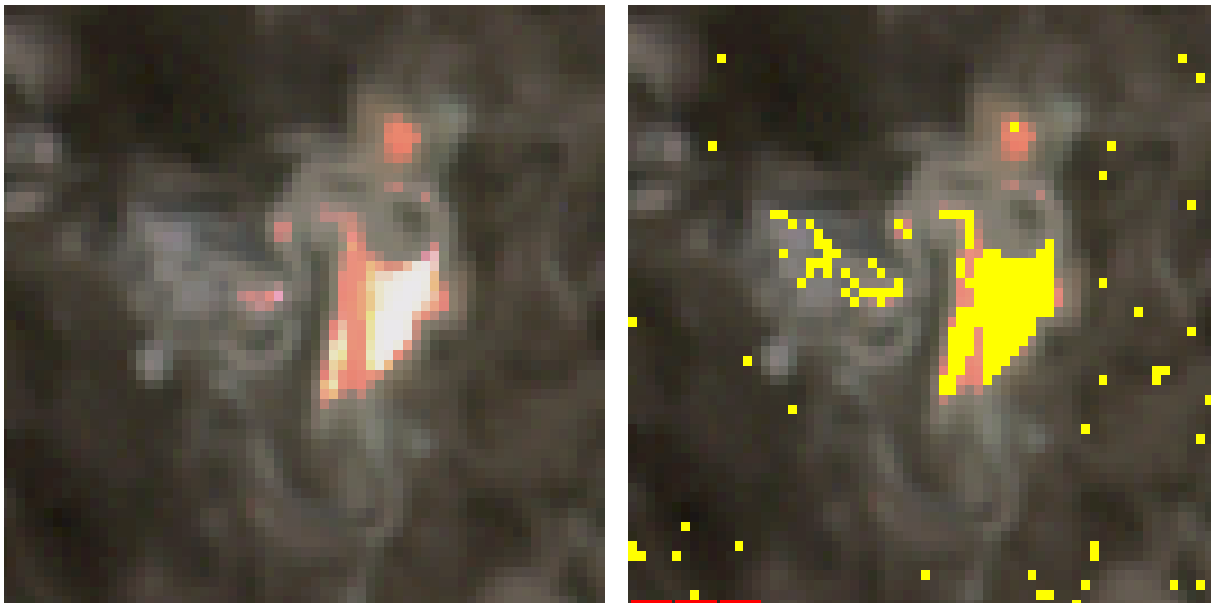
(a)



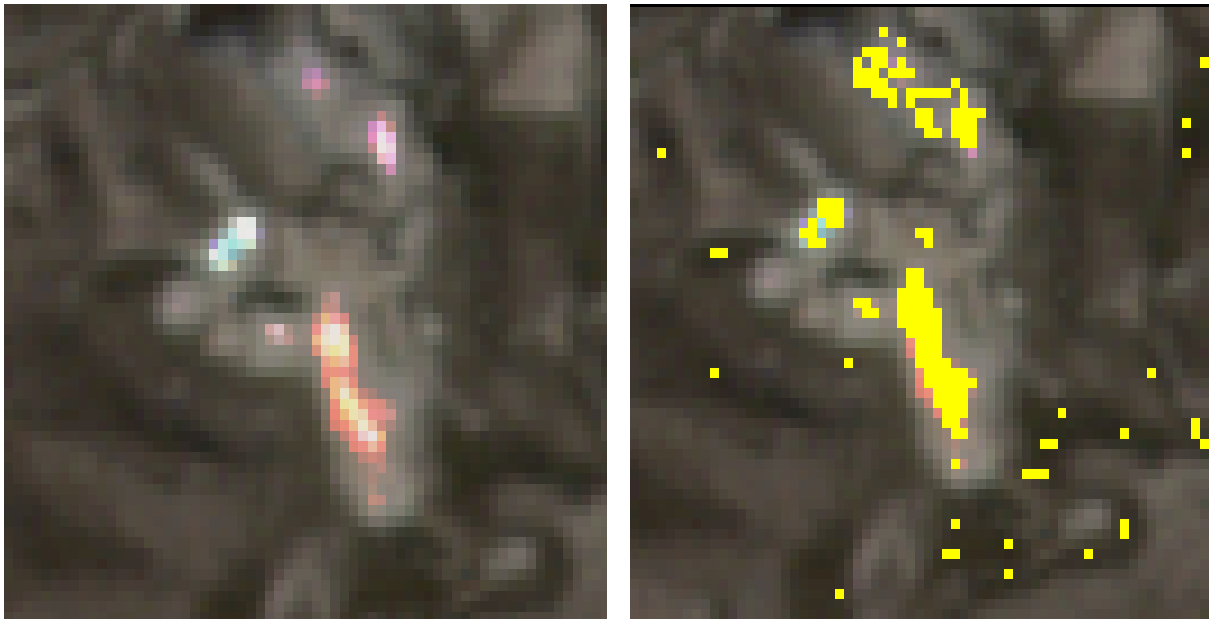
(b)

Legenda: (a) Resultado da classificação SAM utilizando espectros de referência de áreas expostas. (b) Composição ASTER RGB 678. Fonte: A autora; 2014.

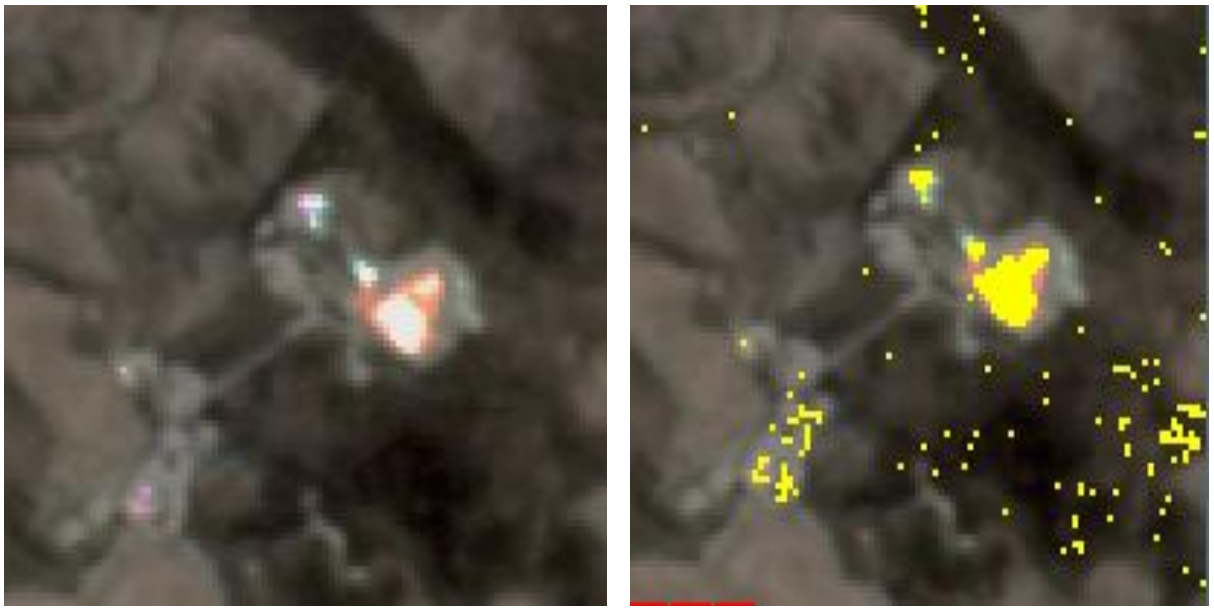
Figura 22: Resultado da classificação espectral, pelo método SAM, das áreas piloto localizadas na região de interesse



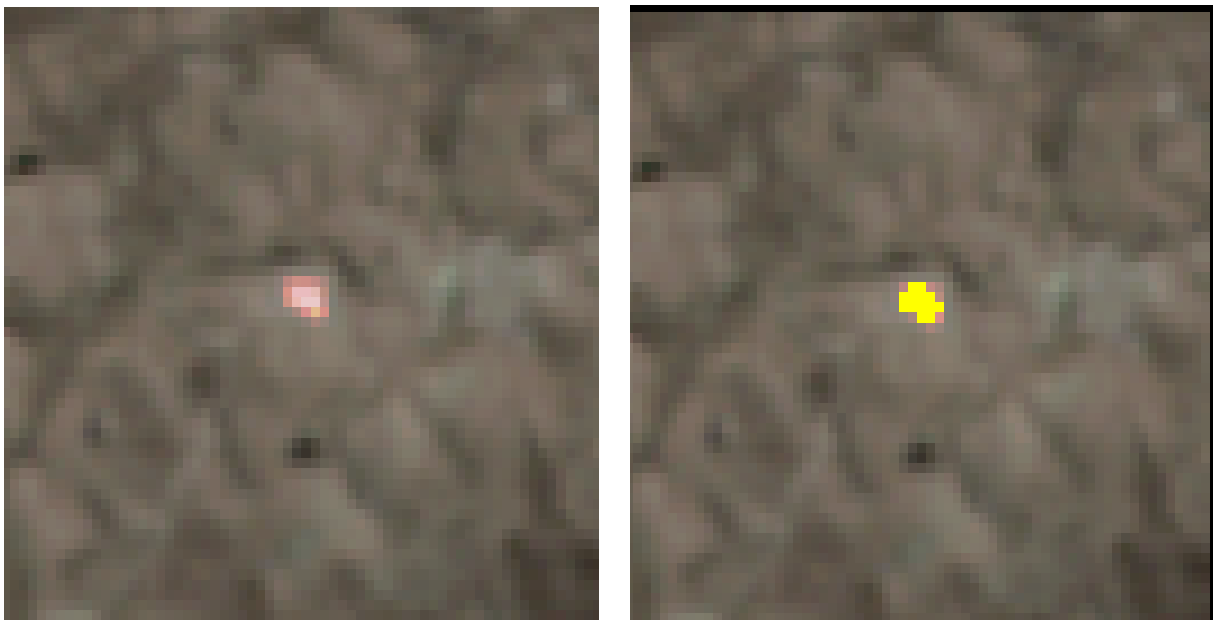
(a)



(b)



(c)



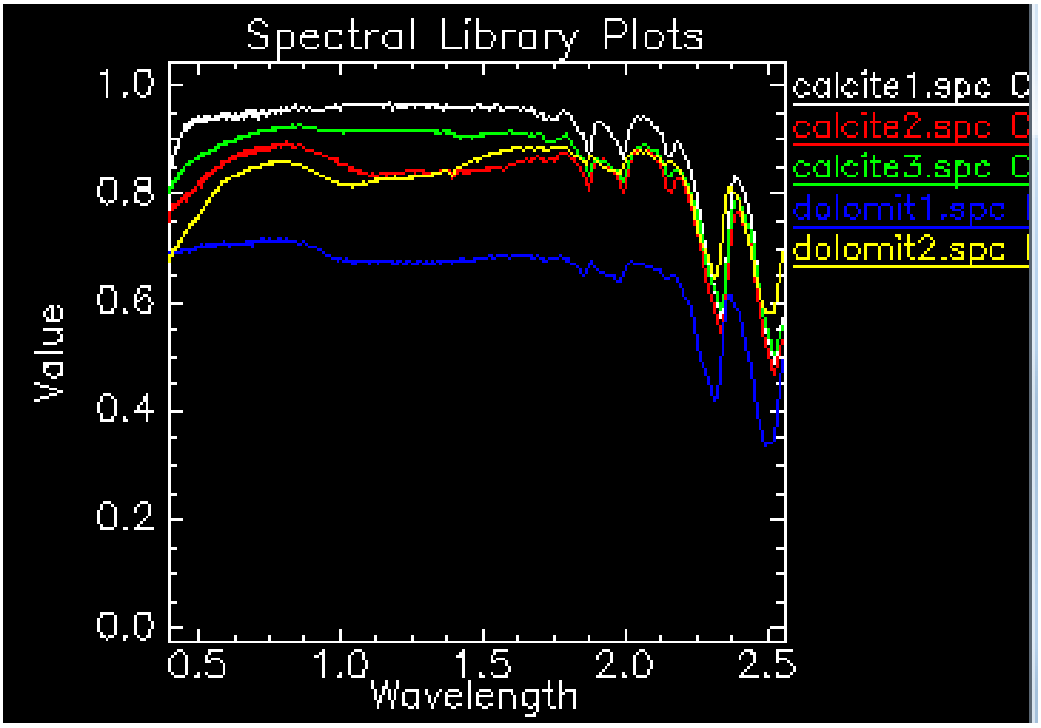
(d)

Legenda: (a) Área piloto 1 e o resultado da classificação SAM (amarelo). (b) Área piloto 2 e o resultado da classificação SAM. (c) Área piloto 3 e o resultado da classificação SAM. (d) Área piloto 4 e o resultado da classificação SAM. Fonte: A autora; 2014.

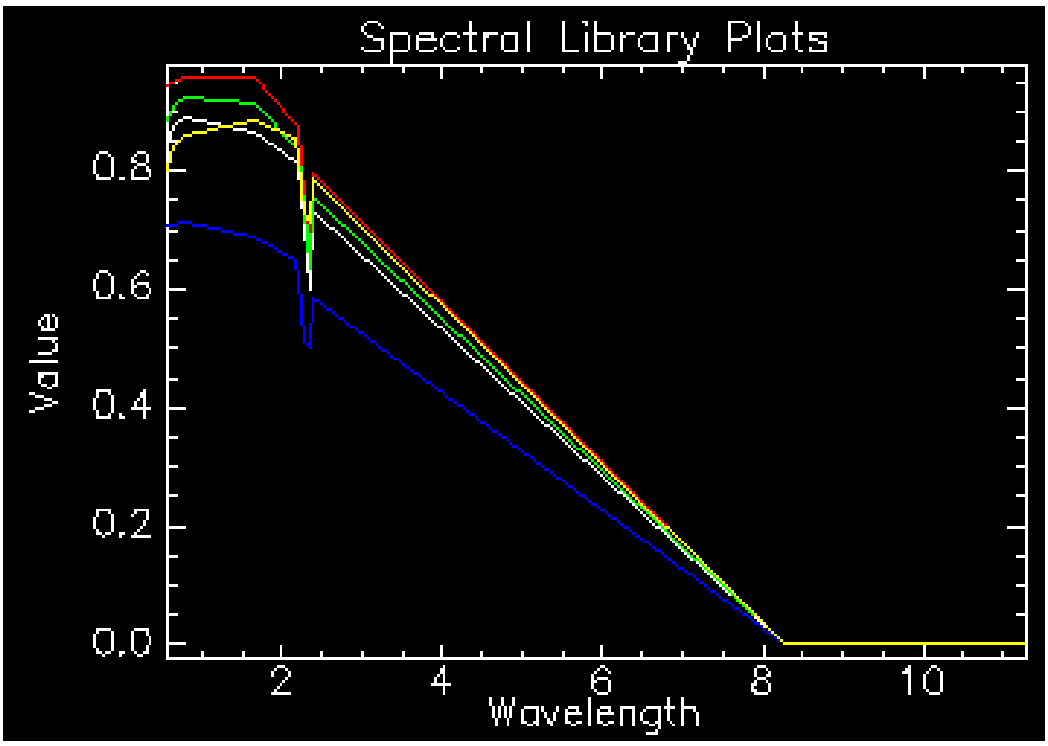
Os pontos em cor amarela representam a similaridade espectral com as amostras de treinamento, ou seja, com a curva espectral de rochas carbonáticas. Geralmente, classificações com espectros de referência extraídos diretamente das imagens a serem processadas tendem sempre a apresentarem melhores resultados, pois fatores como: condições de iluminação, presença de partículas e aerossóis, influência espectral de outros alvos, etc. já estão associados à imagem. (Markoski, 2006)

Para a classificação espectral utilizando a biblioteca USGS, foi utilizada três curvas espectrais para a identificação da calcita e duas curvas espectrais para a identificação de dolomita (Figura 23).

Figura 23: Biblioteca espectral USGS mostrando os minerais selecionados para a classificação SAM.



(a)



(b)

Legenda: (a) Minerais selecionados da biblioteca espectral USGS. (b) mesma biblioteca espectral reamostrada para a resolução do sensor ASTER. Fonte: A autora; 2014.

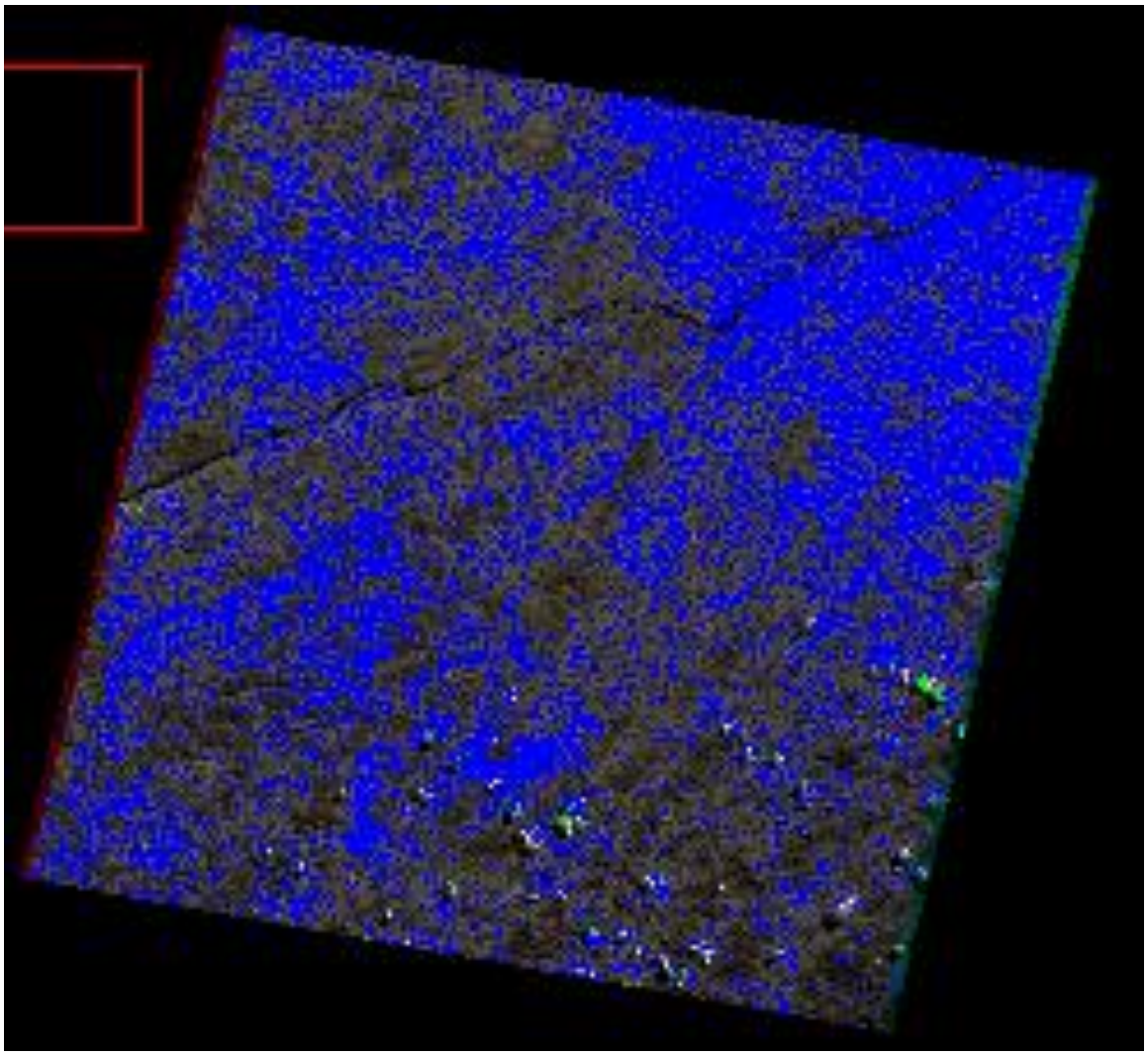
Para a classificação espectral utilizando a biblioteca USGS, somente os minerais referente a curva calcita 3, representado pela cor verde e dolomita 1, representado pela cor azul foram classificados.(Figura 24)

Na biblioteca do USGS são armazenados espectros minerais em laboratório que foram definidos a partir de amostra de minerais com alta concentracao (e baixas impurezas) e de amostras específicas de uma determinada regiao do planeta. Assim, a probabilidade de não se obter resultados compatíveis com a área de interesse é alta pois a composição dos minerais que compõe as rochas da área de estudo, a interferencia do manto de intemperismo e a resposta espectral dos pixels da imagem podem interferir nos resultados da classificação.

Na Figura 25b pode-se observar que a maior parte das nuvens presente na imagem foram classificada como calcita (verde) obtendo assim incompatibilidade da resposta espectral da curva calcita da biblioteca espectral USGS com as áreas de exposição de rochas carbonáticas na área de interesse.

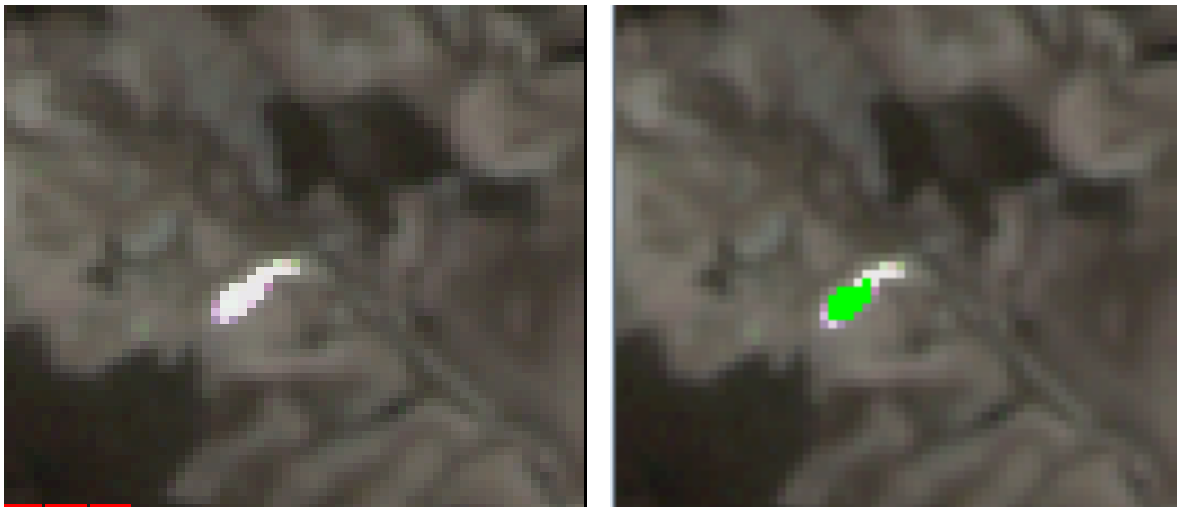
A imagem possui uma cobertura de nuvens significativa, que gerou alterações nas discriminações espectrais dos alvos no resultado da classificação espectral. Nuvens e sombras causam problema na classificação automática e uma possível solução para a minimização desse erro, seria a aplicação de uma máscara para excluir a cobertura nuvens durante a realização da classificação SAM.

Figura 24: Resultado da classificação SAM utilizando a biblioteca espectral USGS

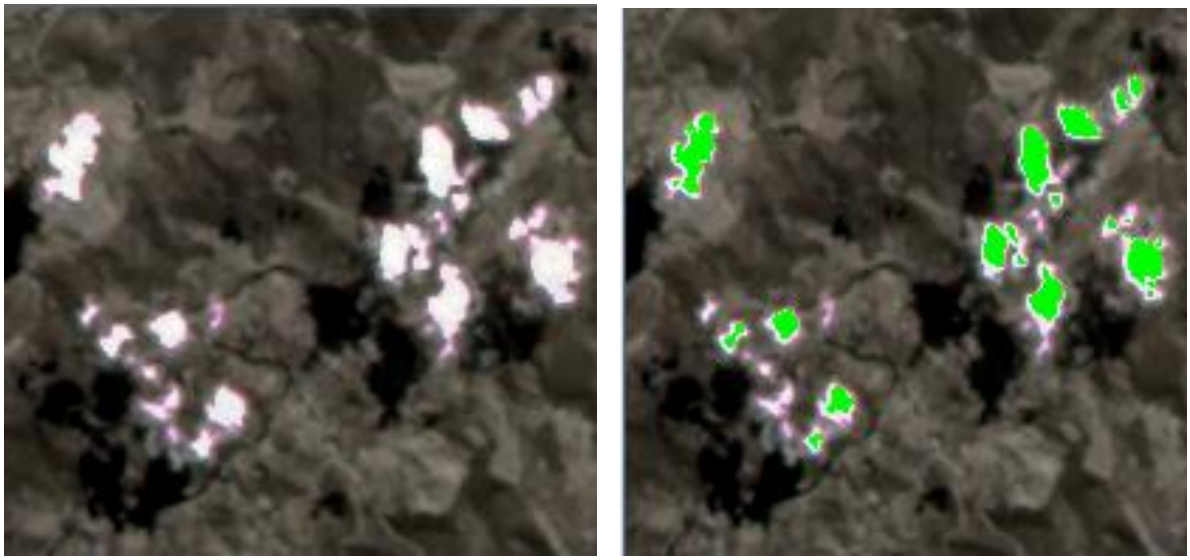


Legenda: Classificação SAM utilizando a biblioteca USGS. A calcita 3 está representada pela cor verde e a dolomita 1, pela cor azul. Fonte: A autora; 2014.

Figura 25: Resultado da classificação espectral, pelo método SAM, utilizando a biblioteca espectral USGS



(a)



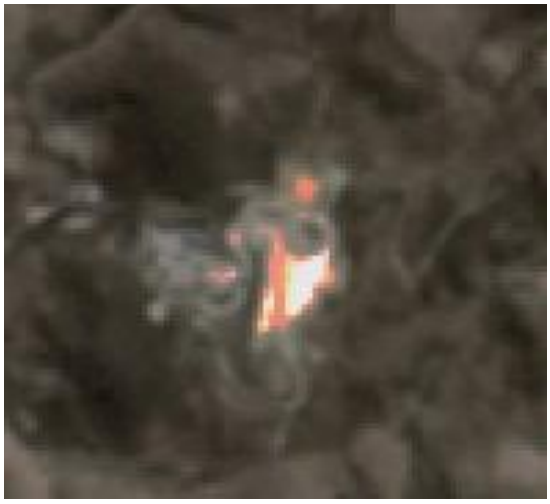
(b)

Legenda: (a) Resultado da classificação SAM para áreas expostas. (b) Resultado da classificação SAM para nuvens. Fonta: A autora; 2014.

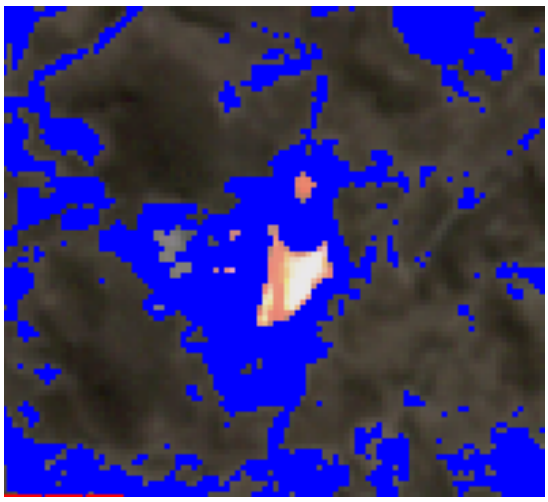
As áreas utilizadas como espectro de referência, foram identificadas como dolomita na classificação utilizando a biblioteca espectral do USGS (Figura 26). Somente a área piloto 4 foi classificada como calcita. As áreas localizadas mais ao centro das exposições de rochas carbonáticas não foram classificadas.

A causa provável para a não classificação das áreas piloto corretamente pode ser a incompatilidade dos espectros da biblioteca USGS com as respostas espectrais das áreas de garimpo de rochas carbonáticas presentes na área de estudo.

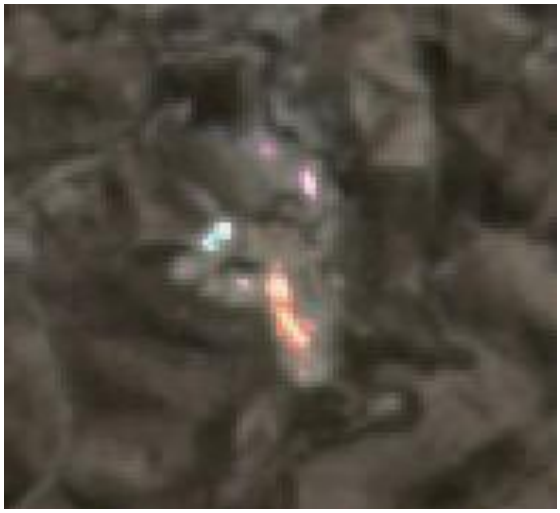
Figura 26: Resultado da classificação espectral, pelo método SAM, das áreas piloto utilizadas como referência



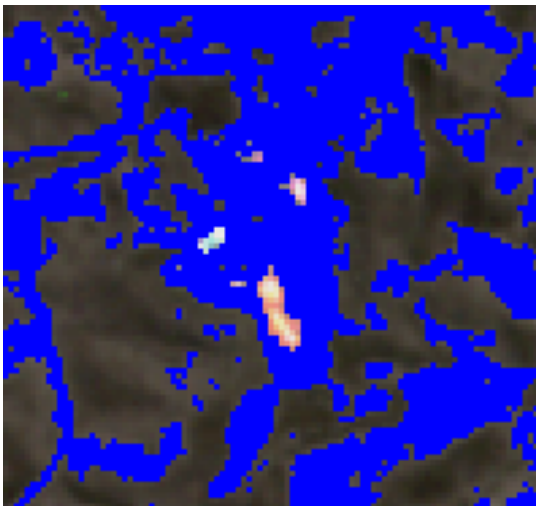
Área piloto 1



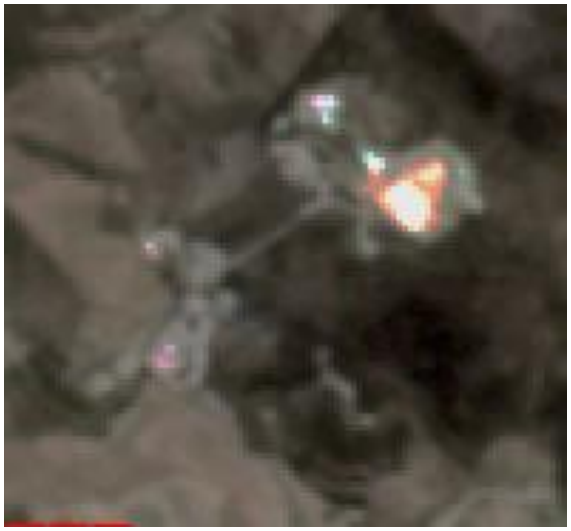
Classificação SAM



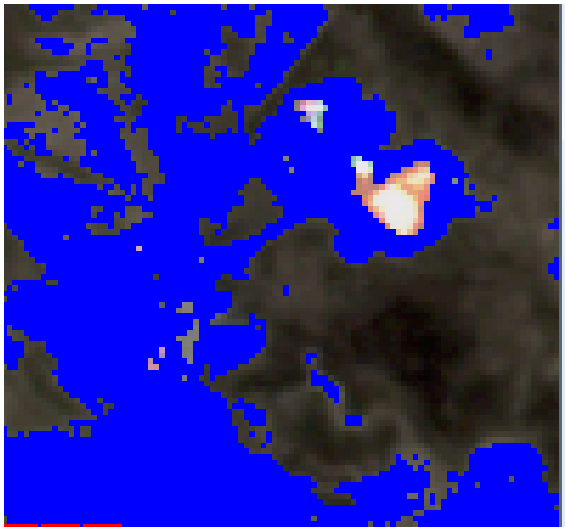
Área piloto 2



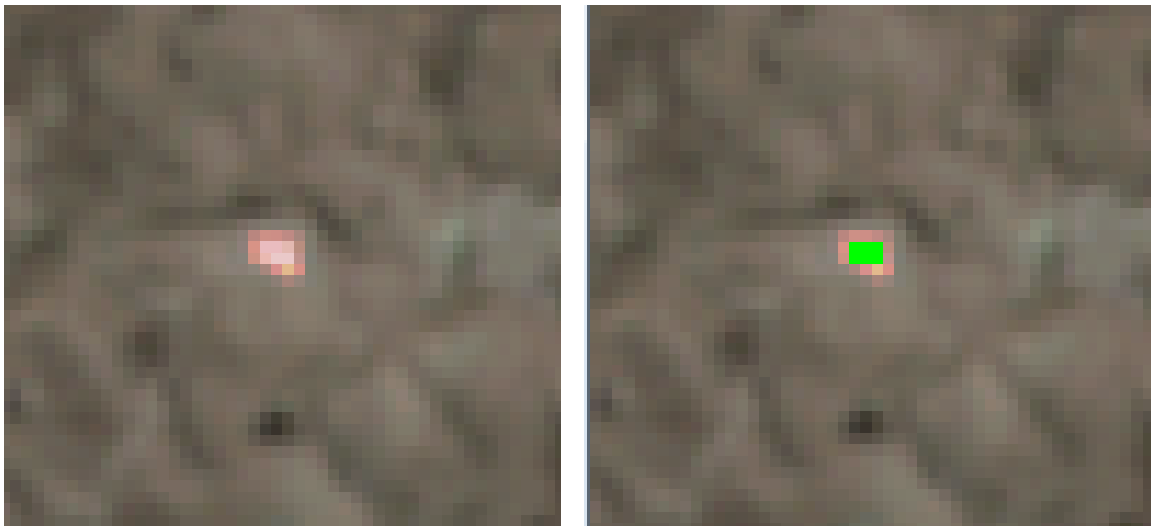
Classificação SAM



Área piloto 3



Classificação SAM



Área piloto 4 Classificação SAM

Legenda: Classificação espectral das áreas piloto, onde somente a área piloto 4 foi classificada como calcita. Fonte: A autora; 2014.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo mostrou que as técnicas de processamento digital de imagens são ferramentas de grande importância para o campo das Geociências, permitindo a identificação rápida, econômica na maioria das vezes e eficiente para o mapeamento geológico.

Foram obtidos resultados significativos com relação à aplicação da técnica de razão de bandas, que tem como objetivo realçar a diferença de comportamento espectral dos alvos. Neste estudo, foi utilizada a técnica *Relative Absorpton-Band Depth (*RDB) para discriminação de calcita e dolomita. Para a identificação de dolomita, a técnica mostrou maior eficácia, identificando áreas de exposição de rochas carbonáticas.

No entanto, para a identificação de rochas de composição calcítica, os resultados não foram tão eficazes, já que muitas áreas de pastagens e nuvens tiveram a mesma resposta espectral de áreas com exposição de rochas carbonáticas.

Uma possível explicação para este fato seria a presença de extensas áreas de vegetação e pastagem na área de interesse, interferindo na resposta espectral dos alvos. A cobertura vegetal e a cobertura de nuvens influência diretamente no processo de detecção de padrões espectrais e extração de espectros de referência.

Com relação à técnica de razão de bandas para índice de calcita, os resultados não foram eficazes, pois houve a influência da presença de nuvens e pastagens na resposta espectral de rochas calcíticas.

A aplicação da técnica de razão de bandas em áreas de afloramento exposto e com a presença de pouca vegetação teria maior aplicabilidade e melhores resultados na identificação de calcita e dolomita.

Apesar de conseguir distinguir áreas de exposição de rochas carbonáticas, a aplicação das técnicas de razão de bandas isoladamente não apresentaria informações suficientes para a realização de um mapeamento litológico.

A utilização de técnicas de processamento digital para sensores multiespectrais, como a técnica de classificação espectral SAM, apresentou eficácia para a identificação e caracterização de rochas carbonáticas. Provou-se eficiente na classificação de pixels “puros”, mesmo quando utilizado um espectro-padrão (biblioteca da USGS) relativamente diferente do espectro das áreas de trabalho, identificando com menor assertividade os principais afloramentos.

Quando utilizados espectros da própria imagem de áreas comprovadamente reconhecidas como afloramentos carbonáticas, a técnica se provou mais eficiente, necessitando de aberturas angulares menores.

Embora o método tenha se provado eficaz, ou seja, consegue classificar pixels com o mesmo espectro dos carbonatos, porém não foi eficiente, pois não conseguiu classificar afloramentos intemperizados ou afloramentos com pixels com mistura de substâncias, possivelmente afloramentos com vegetação.

A maioria das rochas da área de interesse, devido ao clima tropical, apresentam um manto de intemperismo ou parte encoberta por vegetação, dificultando sua classificação. A presença de grandes extensões de pastagens influenciou na discriminação das respostas espectrais, dificultando a discriminação entre calcita e dolomita.

O produto final obtido através da imagem ASTER, prova que o sensor em questão é apto para mapeamento de áreas carbonáticas em escala local e regional, dependendo de algumas condicionantes, como: cobertura vegetal, presença de rocha aflorante e baixo grau de intemperismo.

Imagens com uma maior resolução espacial e espectral obteriam melhores resultados, com a identificação de afloramentos menores e intemperizados. Consideramos que o resultado obtido foi satisfatório, tendo em vista o contexto existente, a relação custo/beneficio e por poder servir como ponto de partida em busca de resultados mais amplos.

Apesar do número relativamente reduzido de bandas espectrais comparados aos sensores hiperespectrais, foi possível determinar, através da utilização de imagens do sensor ASTER, a presença de áreas aflorantes de rochas carbonáticas, tornando esse sensor uma ferramenta de grande aplicabilidade para atividades de exploração mineral.

Em possíveis estudos futuros recomenda-se a coleta de espectros, a partir da espectrorradiometria em campo, para obter diversos estados de alteração de afloramentos de carbonato, a fim de construir uma biblioteca espectral mais diversificada possível e que represente a realidade de campo.

REFERÊNCIAS

ABRAMS, M.; HOOK, S.; RAMACHANDRAN, B. *ASTER Users Handbook Version 2*. NASA. Jet Propulsion Laboratory, 2001. 135p.

ALMEIDA, L.M; SALVADOR, J.A. *Calcário e Dolomito*. Rochas & Minerais Industriais: Usos e Especificações. Rio de Janeiro. 2005. p. 327 - 350.

CROWLEY, J.K. Visible and near-infrared spectra of carbonate rocks: reflectance variations related to petrographic texture and impurities. *Journal of Geophysical Research*., Washington, 91(B5):5001-5012. 1986.

CPRM. Processamento digital básico de imagens de sensores remotos ópticos para uso em mapeamento geológico. 40 p. Disponível em:< http://www.cprm.gov.br/publique/media/process_digital.pdf> Acesso em :30/03/2014

DANTAS et al. Diagnóstico Geoambiental do Estado do Rio de Janeiro. 35 p. Disponível em:< http://www.cprm.gov.br/publique/media/artigo_geoambientalRJ.pdf> Acesso em: 30/03/2014

DNPM. Economia Mineral do Brasil. 764 p. Disponível em:< http://www.dnpm.gov.br/conteudo.asp?IDSecao=68&IDPagina=1461> Acesso em: 4 ago.2013.

DRM. Panorama Mineral do Estado do Rio de Janeiro. 259 p. Disponível em: < http://www.drm.rj.gov.br/index.php/downloads> Acesso em : 13 jun.2014.

DUCART, D.F. *Caracterização da alteração hidrotermal associada as ocorrências auríferas de Los Menucos, Argentina, por meio de técnicas de sensoriamento remoto e espectroscopia de reflectância.* 2004. 86 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Geociências, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2004.

EMBRAPA. Monitoramento por satélite. Disponível em:< http://www.sat.cnpm.embrapa.br/conteudo/missao_spot.php> Acesso em: 04/11/2013

INPE. Tutorial de Geoprocessamento. Disponível em:< http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/classific.html> Acesso em: 20/06/2014

____. Sensoriamento Remoto aplicado aos estudos geológicos. Disponível em: < http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2005/06.14.13.08/doc/CAP7_SSTavaresJr.pdf> Acesso em: 20/06/2014

GAFFEY, S.J. Spectral reflectance of-carbonate minerals in the visible and near infrared (0.35-2.55 microns): calcite, aragonite, and dolomite. *American Mineralogist*, v. 71 p. 151-162, 1986.

GLOBALGEO. Alos. Disponível em:< http://www.globalgeo.com.br/satelite/alos-pt/> Acesso em: 20/06/2014

HEILBRON, M. e MACHADO, N. Timing of terrane accretion in the Neoproterozoic-Eopaleozoic Ribeira Orogen (SE Brazil). *Precambrian Research*, v. 125, p. 87-112, 2003.

INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE. Indicadores Ambientais do Estado do Rio de Janeiro. Disponivel em:<http://www.inea.proderj.rj.gov.br/basetematica_estadoambiente/>. Acesso em: 10 dez. 2013.

KRUSE, F.A; LEFKOFF, A.B; BOARDMAN, J.W; HEIDEBRECHT, K.B; SHAPIRO, A.T; BARLOO, P.J; GOETS, A.F.H. The Spectral Image Processing System (SIPS) – Interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data. *Remote Sensing of Environment,* v.44, n.2, p.145-163. 1993

LIMA, B.E.M. *Avaliação de imagens do sensor ASTER para discriminação espectral de variações faciológicas no granito Serra Branca, Estado de Góias*. 2003.115 f Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - INPE, São José dos Campos, 2003.

LP DAAC. Land Processes Distributed Active Archive Center. Disponível em: < https://lpdaac.usgs.gov/about/citing_lp_daac_and_data>

MARKOSKI, P.R. *Avaliação de imagens do sensor ASTER para caracterização e mapeamento de rejeitos de garimpos de ametistas*. 2006. 70f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Metereologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.

MAURY, M.B.; BLUMENSCHEIN, R.N. Produção de cimento: Impactos à saúde e ao meio ambiente. *Sustentabilidade em Debate*, Brasília, v. 3, n. 1, p. 75-96, jan/jun. 2012.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T.: Introdução ao Processamento de Imagens de Sensores Remotos. Brasília: UNB, 2011.

_____., MADEIRA NETTO J.S. (Orgs). *Sensoriamento remoto*: reflectância dos alvos naturais. Brasília: UNB, 2001.

MUSTARD, J.F.; SUNSHINE, J.M. Spectral analysis for Earth Science. Remote Sensing for the Earth Sciences, Nova Iorque, p.251-306, 1999.

NASA- National Aeronautics and Space Administration. Jet Propulsion Laboratory 2008. Disponível em: http://asterweb.jpl.nasa.gov/. Acesso em: 22 ago. 2013.

NINOMIYA; Y. Mapping quartz, carbonate minerals and mafic-ultramafic rocks using remotely sensed multispectral thermal infrared ASTER data. Proceedings of SPIE, v. 4710, p. 191-202, 2004

PEDROSA, S.A. *Discriminação espectral de variações faciológicas de carbonatos por meio de espectrorradiometria e imagens ASTER na região da Serra do Ramalho-BA*. 2010. 117f. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 2010.

PEIXOTO, C. A. *Geologia e geocronologia U-Pb (LA-ICP-MS) do Domínio Italva na região entre Cantagalo e Itaocara, nordeste do Estado do Rio de Janeiro.* 2010. 131f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Faculdade de Geologia, UERJ, 2010.

PEIXOTO, C. e HEILBRON, M. Geologia da klippe Italva na região entre Cantagalo e Itaocara, nordeste do Estado do Rio de Janeiro. *Geociências*, v.29, n.3, p.277-289, 2010.

REIS, A. P.: Depósitos de Rochas Carbonáticas do Nordeste do Estado do Rio de Janeiro. *In:* SCHOBBENHAUS, C., QUEIROZ, E.T., COELHO, C.E.S: *Principais Depósitos Minerais do Brasil*. Rio de Janeiro: DRM, 1994. p. 403-417.

MATOS G.M.M.; FERRARI P.G.; CAVALCANTE J.C. Projeto Faixa Calcária Cordeiro-Cantagalo. Relatório Final, texto e mapas geológicos, Belo Horizonte, CPRM, 620 pp. 1980.

MATOS, C. E. D. G.; SOARES, M. A. S.; CAMBRA, M. F. E. S.: O mercado produtor mineral Fluminense: Indicador CEFEM. In: PARENTE, M. L.; CAMBRA, M. F. E. S.; MAURÍCIO, R. C. Panorama Mineral do Estado do Rio de Janeiro 2012. Niterói: DRM, 2012. p. 155 -166.

ROWAN L.C; MARS J.C. Lithologic mapping in the Montain Pass, California área using Advanced Spaceborn Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data. *Remote Sensing of Environment,* 84, p. 350-366, 2003.

TUPINAMBÁ, M. et al. Geologia da Faixa Ribeira Setentrional: estado da arte e conexões com a Faixa Araçuaí. *Geonomos*, v. 15, n. 1, p. 67-79, 2007.

TUPINAMBÁ, M.; TEIXEIRA, W. e HEILBRON, M. Evolução Tectônica e Magmática da Faixa Ribeira entre o Neoproterozoico e o Paleozoico Inferior na Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro, Brasil. *Anuário do Instituto de Geociências* UFRJ, v.35, n 2, p.140-151, 2012.

VALLADARES C.S. et al. The tectono-magmatic Evolution of the Occidental Terrane and the Paraíba do Sul klippe within the Neoproterozoic Ribeira orogenic Belt, Southern Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, v.30, n.1, p.1-6, 2008.

YAMAGUCHI, Y. et al.. Overview of Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER). *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 36,n. 4, p. 1062 – 1071, 1998.