



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

MATEUS DE PAULA MIRANDA

**IMAGENS SENTINEL-2A (MSI) APLICADAS AO MAPEAMENTO GEOLÓGICO,
REGIÃO DE ITATAIA, SANTA QUITÉRIA, CE**

FORTALEZA

2019

MATEUS DE PAULA MIRANDA

IMAGENS SENTINEL-2A (MSI) APLICADAS AO MAPEAMENTO GEOLÓGICO,
REGIÃO DE ITATAIA, SANTA QUITÉRIA, CE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geologia. Área de concentração: Geodinâmica e Recursos Minerais.

Orientador: Prof. Dra. Cynthia Romariz Duarte.
Coorientador: Prof. Dr. Daniel Dantas Moreira Gomes.

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M644i Miranda, Mateus de Paula.
Imagens Sentinel-2A (MSI) aplicadas ao mapeamento geológico, região de Itaitaia, Santa Quitéria, CE /
Mateus de Paula Miranda. – 2019.
72 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Programa de Pós-Graduação
em Geologia, Fortaleza, 2019.

Orientação: Profa. Dra. Cynthia Romariz Duarte.

Coorientação: Prof. Dr. Daniel Dantas Moreira Gomes.

1. Optimal Index Factor . 2. Independent Component Analysis . 3. Minimum Noise Fraction . I. Título.

CDD 551

MATEUS DE PAULA MIRANDA

IMAGENS SENTINEL-2A (MSI) APLICADAS AO MAPEAMENTO GEOLÓGICO,
REGIÃO DE ITATAIA, SANTA QUITÉRIA, CE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geologia. Área de concentração: Geodinâmica e Recursos Minerais.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Cynthia Romariz Duarte (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Sebastián Gonzáles Chiozza
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Michael Vandesteem Silva Souto
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)

AGRADECIMENTOS

À Funcap, pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio.

À minha família, pelo seu apoio e amparo que me acompanharam durante toda a minha vida.

Agradeço também os meus orientadores Profa. Dra. Cynthia Romariz Duarte e Prof. Dr. Daniel Dantas Moreira Gomes, que nunca mediram esforços para a concretização deste trabalho.

Agradeço aos meus colegas do Laboratório de Geoprocessamento do Ceará –GEOCE (Aline, Camila, Cassiano, Celina, Cláudio, Débora, Eduardo, Linara, Maykon, Rayssa e Stefanny) e aos meus colegas do curso pela companhia nessa louca viagem que é a Geologia.

RESUMO

A província fósforo-uranífera da região de Itataia, objeto deste estudo, está localizada no município de Santa Quitéria/CE e inserida no contexto geológico do Domínio Ceará Central (DCC) da Província Borborema (PB). Trata-se de uma mineralização única no mundo em que seu principal minério é o colofanito. Satélites equipados com sensores multiespectrais, como os da série Landsat (TM, ETM+, OLI), tem um importante papel em aplicações geológicas. O objetivo deste trabalho foi efetuar a comparação das imagens dos sensores MSI/Sentinel-2 e do OLI/Landsat-8, por meio de parâmetros estatísticos, como o coeficiente de Pearson, e analisar suas aplicações para o mapeamento geológico. Para tanto, foram selecionadas as bandas correlatas de ambos os sensores e pré-processadas para um conjunto de dados compatível para comparação. Posteriormente, foram gerados os coeficientes entre os pares de bandas correlatas, e também razões de bandas para análise dos dados. As imagens Sentinel-2 apresentaram forte correlação com as imagens Landsat-8, com coeficientes de Pearson variando entre 0,857 e 0,930. Com esses resultados confirmando a equiparidade entre os sensores. Técnicas de Processamento Digital de Imagens empregadas nas imagens Sentinel-2A, para realçar as litologias da região de Itataia, foram: Razões de banda, *Optimal Index Factor* (OIF), *Independent Component Analysis* (ICA), *Minimum Noise Fraction* (MNF), Análise por Componentes Principais (APC), Composição RGB e Filtragem Passa-Baixa. As composições coloridas RGB que melhor destacaram as litologias da área de estudo e realçaram o colofanito (minério fósforo-uranífero) foram com as bandas MNFs R (3) G (4) B (7) e com as bandas ICA R (6) G (5) B (3). Aliadas a poderosas técnicas de PDI as imagens Sentinel-2A apresentaram resultados satisfatórios em aplicação de mapeamento geológico e prospecção mineral.

Palavras-chave: *Optimal Index Factor* (OIF). *Independent Component Analysis* (ICA). *Minimum Noise Fraction* (MNF).

ABSTRACT

The phosphorus-uraniferous province of the Itataia, object of this study, is located in the municipality of Santa Quitéria/CE and inserted in the geological context of the Domínio Ceará Central (DCC) of Província Borborema (PB). It is a unique mineralization in the world where its main ore is colofanite. The aim of this paper is to accomplish the comparison of images from MSI Sentinel-2 and OLI Landsat-8 sensors, by means of statistical parameters, as the Pearson coefficient, and analyze your applications for geological mapping. For that, the correlated bands of both sensors were selected, preprocessed for a compatible set of data for comparison. Subsequently, the coefficients were generated between the pairs of correlated bands, as well as band ratios for data analysis. The Sentinel-2 images, analyzed in this work, presented a strong correlation with the images of Landsat-8, with Pearson coefficients varying between 0.857 and 0.930. With that results confirm the equability between the sensors, techniques of Digital Image Processing applied in Sentinel-2A images, for highlight the litologies in the Itataia area, were: Band Ratios, Optimal Index Factor (OIF), Independent Component Analysis (ICA), Minimum Noise Fraction (MNF), Principal Component Analysis (APC) and Low-Pass Filtering. The RGB color compositions that best emphasized the lithology of study area and highlighted the colophonite (phosphorus-uraniferous ore) were with the bands MNFs R (3) G (4) B (7) and bands ICA R (6) G (5) B (3). In addition to powerful DIP techniques, Sentinel-2A images presented satisfactory results in the application of geological mapping and mineral prospecting.

Keywords: *Optimal Index Factor (OIF). Independent Component Analysis (ICA). Minimum Noise Fraction (MNF).*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Mapa de localização da área de estudo.....	16
Figura 2	– Missões Sentinel previstas e suas principais aplicações.....	20
Figura 3	– Modelo Digital de Terreno representando as principais unidades morfológicas unidades morfológicas da região de Itataia.....	25
Figura 4	– Aspectos fisiográficos da área de estudo- (A) Unidade morfológicas da área de estudo e adjacências: depressão e planaltos residuais (Serra do Céu). (B) Caatinga hiperxerófila: vegetação predominante na área de estudo. (C) Açude de Itataia. Imagens capturadas na primeira semana de novembro de 2015, representando a época seca da região.....	26
Figura 5	– Província Borborema, principais domínios tectônicos e zonas de cisalhamento.....	28
Figura 6	– Mapa geológico da região de Itataia.....	32
Figura 7	– Mapa geológico da região de Itataia (Santa Quitéria-CE).....	34
Figura 8	– Mapa Geológico da Folha Itatira SB.24-V-B-V, escala 1:100.000.....	35
Figura 9	– Histogramas das bandas do sensor ETM com indicação do valor digital que mede a quantidade de espalhamento atmosférico adicionada ao sinal.....	39
Figura 10	– Fluxograma da primeira parte deste capítulo.....	50
Figura 11	– Fluxograma da segunda parte deste capítulo.....	50
Figura 12	– Comparação de bandas entre os sensores ETM+, OLI e MSI.....	53
Figura 13	– <i>Scatterplots</i> comparando as bandas dos sensores MSI e OLI e suas razões.....	55
Figura 14	– Localização da área de Mendonça et al. (1980) em relação à Folha Itatira de Parente et al. (2008) e o mapeamento de detalhe do entorno da mineralização de Itataia de Pitombeira (2011) em relação a Mendonça et al. (1980).....	58

Figura 15	– Composição R (2/11) G (4/3) B (12/8) comparada com o mapeamento de Mendonça <i>et al.</i> (1980).....	58
Figura 16	– Composição com as bandas MNFs R (3) G (4) B (7), selecionada como o triplete de bandas com o maior ranking OIF entre as bandas MNF, comparada com o mapeamento de Pitombeira (2011).....	59
Figura 17	– Composição R (IC6) G (IC5) B (IC3) comparada com o mapeamento de Pitombeira (2011).....	60
Figura 18	– Composição R (PC7) G (PC5) B (PC1) comparada com o mapeamento de Mendonça <i>et al.</i> (1980).....	62
Figura 19	– Composição R (PC2) G (PC3) B (PC4) comparada com o mapeamento de Mendonça <i>et al.</i> (1980).....	63
Figura 20	– Composição R (PC1) G (PC2) B (PC3) comparada com o mapeamento de Pitombeira (2011).....	64
Figura 21	– (a) Imagem expondo a mineralização Itataia em relação a Serra do Céu. (b) e (c) Área aflorante do colofanito da Jazida Itataia. (d) Colofanito (minério da Jazida Itataia) e sua rocha hospedeira: mármore da Formação Alcantil.....	65
Figura 22	– (a) apresenta uma foto aérea apresentando a área da Jazida Itataia com o colofanito exposto; (b) apresenta a composição colorida MNF R (3) G (4) B (7) integrada com imagens Alos/Palsar (MDE).....	66
Figura 23	– Mapa da região de Itataia modificado de Mendonça <i>et al.</i> (1980) a partir da interpretação das imagens do sensor MSI/Sentinel-2A.....	67
Figura 24	– Folha Itatira sobreposta pela Cartografia Proposta (a) e composição MNF R(3) B(4) G(7)(b).....	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Principais características do sensor MSI.....	22
Tabela 2	– Principais características do satélite Landsat-8.....	23
Tabela 3	– Resumo dos métodos utilizados no trabalho.....	37
Tabela 4	– Valor da Correção de Pearson (r).....	48
Tabela 5	– Estatísticas das bandas e razões geradas com as bandas dos sensores OLI e MSI para o Grupo Itataia.....	51
Tabela 6	– Estatísticas das bandas e razões geradas com as bandas dos sensores OLI e MSI para as litologias separadas.....	52
Tabela 7	– Ranking OIF das Razões do Sentinel-2A	57
Tabela 8	– Ranking OIF das Bandas ICs do Sentinel-2A.....	57
Tabela 9	– Ranking OIF das Bandas MNF do Sentinel-2A.....	57
Tabela 10	– Autovetores e autovalores da APC com as bandas do sensor MSI....	61
Tabela 11	– Composições coloridas selecionadas a partir da Análise por Principais Componentes.....	61

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	Localização e Vias de Acesso.....	15
1.2	Objetivos.....	16
<i>1.2.1</i>	<i>Objetivo geral.....</i>	<i>16</i>
<i>1.2.2</i>	<i>Objetivos específicos</i>	<i>16</i>
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	Sensoriamento Remoto.....	18
<i>2.1.1</i>	<i>Sentinel-2.....</i>	<i>19</i>
<i>2.1.2</i>	<i>Landsat-8.....</i>	<i>22</i>
2.2	Aspectos Fisiográficos.....	23
<i>2.2.1</i>	<i>Clima.....</i>	<i>23</i>
<i>2.2.2</i>	<i>Vegetação.....</i>	<i>24</i>
<i>2.2.3</i>	<i>Relevo.....</i>	<i>24</i>
<i>2.2.4</i>	<i>Solos.....</i>	<i>25</i>
<i>2.2.5</i>	<i>Hidrografia.....</i>	<i>25</i>
2.3	Geologia Regional.....	27
<i>2.3.1</i>	<i>Província Borborema.....</i>	<i>27</i>
<i>2.3.2</i>	<i>Domínio Ceará Central.....</i>	<i>28</i>
<i>2.3.2.1</i>	<i>Embasamento Arqueano.....</i>	<i>29</i>
<i>2.3.2.2</i>	<i>Terrenos Acrescionários do Paleoproterozóico.....</i>	<i>29</i>
<i>2.3.2.3</i>	<i>Cobertura Neoproterozóica.....</i>	<i>30</i>
<i>2.3.2.4</i>	<i>Arco Magmático Santa Quitéria.....</i>	<i>30</i>
<i>2.3.2.5</i>	<i>Mineralização Itataia.....</i>	<i>31</i>
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	36
3.1	Materiais.....	36
<i>3.1.1</i>	<i>Imagens Orbitais.....</i>	<i>36</i>
<i>3.1.2</i>	<i>Softwares.....</i>	<i>36</i>
<i>3.1.3</i>	<i>Dados Geológicos.....</i>	<i>36</i>
3.2	Métodos.....	37
<i>3.2.1</i>	<i>Correção Atmosférica.....</i>	<i>38</i>
<i>3.2.2</i>	<i>Espaço RGB.....</i>	<i>39</i>

3.2.3	<i>Optimal Index Factor (OIF)</i>	40
3.2.4	<i>Razão de Bandas</i>	41
3.2.5	<i>Análise por Principais Componentes (APC)</i>	41
3.2.6	<i>Análise por Componentes Independentes (ICA)</i>	43
3.2.6.1	<i>Definição</i>	44
3.2.6.2	<i>Suposições e Restrições</i>	44
3.2.6.3	<i>Pré-Processamento e Processamento</i>	45
3.2.6.4	<i>APC versus ICA</i>	46
3.2.7	<i>Minimum Noise Fraction (MNF)</i>	47
3.2.8	<i>Coefficiente de Correlação (r)</i>	48
3.2.9	<i>Filtro Passa-Baixa</i>	49
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
4.1	Comparativo Sentinel-2A/MSI x Landsat-8/OLI	51
4.2	Processamento das imagens Sentinel-2A	56
4.3	Cartografia Proposta	67
5	CONCLUSÃO	69
	REFERÊNCIAS	70

1 INTRODUÇÃO

O urânio (U) é um dos mais importantes materiais energéticos do mundo. Atualmente seu uso está dividido em três segmentos capitais para a sociedade humana: na indústria energética, uma pequena porção na produção de isótopos medicamentosos e na indústria bélica. A energia nuclear é a segunda maior fonte de energia de baixo carbono do mundo (30% do total em 2016). Mais de 50 países utilizam a energia nuclear que fornece cerca de 11% da energia elétrica consumida no mundo gerada por 450 reatores de energia (World Nuclear Association, 2019).

O Brasil possui, hoje, a 7^o maior reserva mundial de urânio com 309.00 toneladas de U₃O₈, o que permite o suprimento de combustível para suas usinas nucleares a longo prazo, além do excedente poder ser utilizado para a exportação. As principais reservas de urânio brasileiras estão distribuídas em sete jazidas: Itataia/CE, Espinharas/PB, Amarinópolis/GO, Lagoa Real/BA, Caetité/BA (única em atividade), Quadrilátero Ferrífero/MG, Poços de Caldas/MG, Figueira/PR (INB, 2019).

Atualmente, dentre as jazidas brasileiras de urânio, destacam-se com os maiores volumes as de Lagoa Real/BA e Itataia/CE. A jazida de Itataia é de natureza fósforo-uranífera, ocorrendo sob a forma de colofanito uranífero, constituindo-se num exemplo mundial único em áreas cambrianas, onde ocorre mineralização de urânio associada com fosfato, carbonato e matéria orgânica. A sequência metassedimentar supracrustal tipo QPC (quartzo-pelito-carbonato) de Itataia, de natureza transgressiva, tem na base migmatitos, sotopostos por quartzitos e gnaisses, capeados por mármore calcíticos e dolomíticos. Sendo que estes mármore contêm acumulação de matéria orgânica nos fragmentos e matriz de brechas carbonosas e, formando níveis ricos em grafita na transição para subjacentes (MENDONÇA *et al.*, 1980).

A exploração mineral envolve procedimentos de coleta, análise e assimilação de dados oriundos de várias fontes. A integração digital de dados geológicos, geofísicos, geoquímicos, de sensoriamento remoto e de outras informações georreferenciadas voltada à prospecção mineral, atualmente é realizada através de *softwares* e *hardwares* específicos, aproveitando o grande avanço das geotecnologias ocorrido nas duas últimas décadas.

O sensoriamento remoto geológico é uma técnica de análise de dados que busca monitorar e mensurar as características físicas e/ou químicas do ambiente geológico estático ou dinâmico (LIU, 2007). O desenvolvimento contínuo de geotecnologias tem estimulado o

crecente uso dessas técnicas na elaboração de investigações geológicas. Neste contexto, o uso de imagens orbitais proporciona informações relevantes a respeito de uma área em estudo antes de um trabalho de campo, tornando-se uma ferramenta indispensável nas etapas que envolvem um mapeamento geológico.

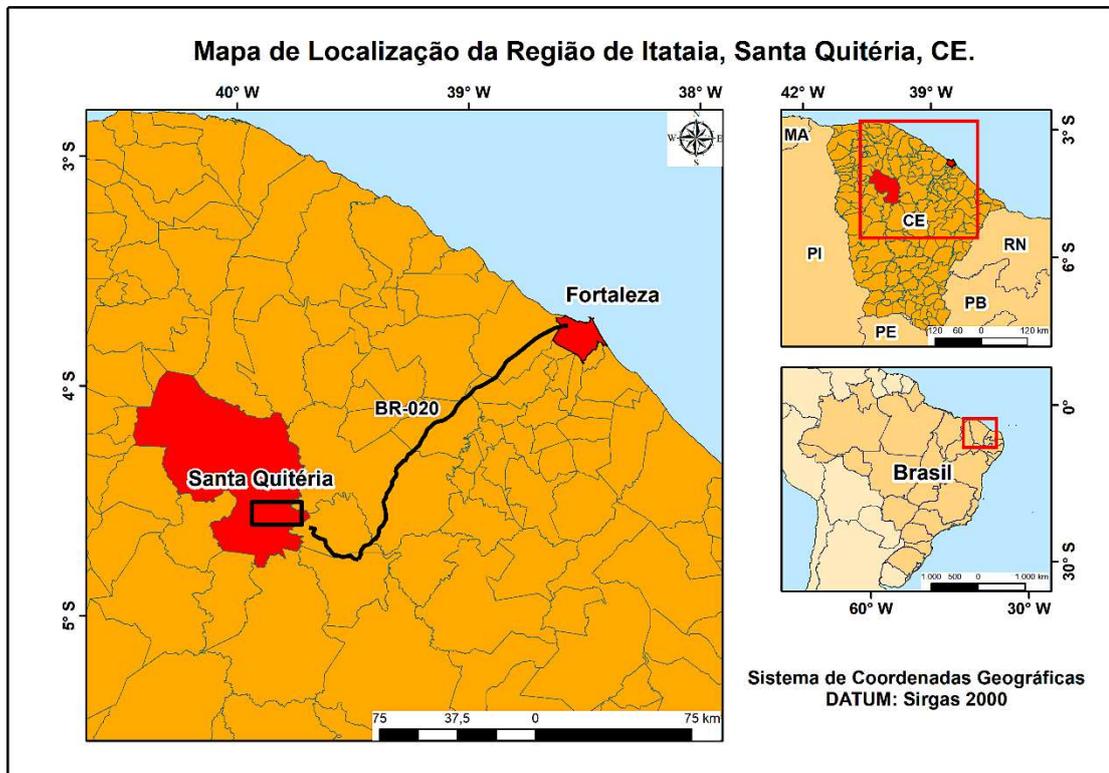
Satélites equipados com sensores multiespectrais têm um importante papel em aplicações geológicas, em especial os que possuem imageamento no intervalo do infravermelho de ondas curtas (*short wave infrared* – SWIR), pois é nessa região do espectro eletromagnético (EEM) que grupos como os argilominerais apresentam picos de refletância e/ou absorvância (ROWAN *et al.*, 1976; GOETZ *et al.*, 1983). Alguns dos satélites com sensores multiespectrais mais usados em trabalhos geológicos são os da missão norte-americana Landsat e o TERRA com o sensor ótico ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*).

Tratando-se de um sensor recente, ele ainda carece de uma bibliografia demonstrando suas funcionalidades e aplicações voltadas para a Geologia. Neste contexto, alguns trabalhos foram desenvolvidos com imagens simuladas (D’ODORICO *et al.*, 2013; VAN DER MEER *et al.*, 2014) e imagens originais (VAN DER WERFF & VAN DER MEER, 2015; MANDANICI & BITELLI, 2016; VAN DER WERFF & VAN DER MEER, 2016; AL-NAHMI *et al.*, 2017; IBRAHIM *et al.*, 2018; GE *et al.*, 2018).

1.1 Localização e Vias de Acesso

A área de estudo localiza-se no município de Santa Quitéria, na região centro-norte do Estado do Ceará, que dista aproximadamente 210 km da capital Fortaleza. O acesso pode ser feito a partir da cidade de Fortaleza pela rodovia federal BR-020, por cerca de 166 km de estrada pavimentada até São José da Macaoca, distrito de Madalena, continuando pela rodovia estadual CE-366, que dá acesso, em trecho de 27 km pavimentado, ao distrito de Lagoa do Mato, no município de Itatira. A partir daí, segue-se pela rodovia estadual CE-366, por trecho não pavimentado, por cerca de 11 km (Figura 1).

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo.



Fonte: Confeccionado pelo autor.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O intuito deste trabalho é avaliar o potencial do uso de imagens Sentinel-2 em aplicações geológicas, comparando-as com produtos do satélite Landsat-8 por meio de parâmetros estatísticos, e apresentar as imagens Sentinel-2 como um dado viável para aplicações em mapeamento geológico.

1.2.2 Objetivos específicos

- i. Adquirir as imagens dos satélites Sentinel-2A/MSI e Landsat-8/OLI com datas próximas;
- ii. Comparar os dados dos sensores MSI e OLI por meio de parâmetros estatísticos a fim de verificar seu grau de correspondência;
- iii. Auxiliar no mapeamento geológico da área da mina de Itataia e adjacências, utilizando-se do processamento de dados oriundos das imagens do satélite Sentinel-2, sensor MSI;
- iv. Integrar e interpretar todas as informações em ambiente de Sistema de Informações Geográficas – SIG.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo serão abordados temas referentes a fundamentação teórica utilizada, abrangendo desde o Sensoriamento Remoto até a Geologia Regional da área estudada.

2.1 Sensoriamento Remoto

Novo em 1989 (*in* NOVO, 2008) propôs uma definição que engloba todo o conceito que deve ser entendido sobre o que é sensoriamento remoto, quando do ponto de vista do usuário de imagens de satélite:

“Sensoriamento remoto consiste na utilização conjunta de modernos instrumentos (sensores), equipamentos para processamento e transmissão de dados e plataformas (aéreas ou espaciais) para carregar tais instrumentos e equipamentos, com o objetivo de estudar o ambiente terrestre através do registro e da análise das interações entre a radiação eletromagnética e as substâncias componentes do planeta Terra, em suas mais diversas manifestações.”

A partir dessa definição, no uso do termo sensoriamento remoto fica restrito que o objeto imageado deva ser registrado por meio de medições da radiação eletromagnética, tal como a luz solar refletida da superfície de qualquer objeto. Nenhum outro tipo de sensor que obtenha imagens que não seja pela detecção eletromagnética deve ser classificado como sensoriamento remoto (MENESES & ALMEIDA, 2012).

O sensoriamento remoto possui duas facetas:

1. A tecnologia de aquisição do dado através de um dispositivo localizado a uma distância do objeto. Essa tecnologia é constituída por sensores passivos (dependem de uma fonte de energia externa, geralmente, o Sol) e sensores ativos, que emitem sua própria energia para aquisição de dados (fonte artificial).
2. O PDI (Processamento Digital de Imagens), que é a etapa pós-aquisição realizada pelo sensor, onde são usadas técnicas de processamento nos dados (imagens, por exemplo) obtidos a fim de realçar alvos, objeto ou corpo específico de interesse. O PDI envolve duas fases: pré-processamento (georreferenciamento, correções ortométricas e radiométricas, por exemplo)

e processamento do dado.

Ambos esses aspectos estão intimamente ligados entre si. No capítulo 3 serão abordadas as técnicas de processamento digital de imagens utilizadas nesse trabalho. Agora serão apresentados os sensores utilizados nesse trabalho: Sentinel-2 e Landsat-8.

O sensor ASTER possui seis bandas em torno da região espectral do SWIR o que o torna uma excelente opção geológica. Razões de bandas para identificação de halos de alteração hidrotermal podem ser feitas com a banda 4 deste sensor (1,7 – 1,8 μm), tipicamente onde os materiais geológicos não alterados exibem altas reflectâncias, e com uma das cinco bandas existentes para a identificação de minerais de alteração hidrotermal: bandas 5 (2,145 – 2,185 μm), 6 (2,185 – 2,225 μm), 7 (2,235 – 2,285 μm), 8 (2,295 – 2,3659 μm) e 9 (2,360 – 2,430 μm) (MENESES & ALMEIDA, 2012). Uma dificuldade em trabalhar com o sensor ASTER é devido seu acervo relativamente limitado de imagens. Em 23 de abril de 2008 o sensor ASTER apresentou mal funcionamento e desde essa data ele não oferece imagens com as bandas do SWIR. Com o seu lançamento em 1999, temos apenas um acervo de nove anos de imagens com as bandas do SWIR. Outra dificuldade era o acesso as imagens desse sensor, foi apenas em 01 de abril de 2016 que as imagens ASTER foram disponibilizadas gratuitamente para o público geral, inviabilizando seu uso para trabalhos com baixos orçamentos.

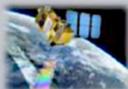
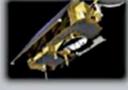
Além do sensor ASTER, temos os sensores multiespectrais TM, ETM+ e OLI, abordo nos satélites da missão norte-americana Landsat. Durante anos, os satélites da série Landsat têm sido empregados em mapeamentos geológicos devido à boa qualidade de seus produtos, possuir duas bandas na região do SWIR e disponibilização gratuita pela USGS (*United States Geological Survey*) (CRÓSTA & MOORE, 1989; CRÓSTA, 1993; OSAKO, 1999; MEDEIROS *et al.* 2011; UCHOA, 2016; MIRANDA, 2016).

Com a finalidade de dar continuidade ao imageamento multiespectral fornecido pela série de satélites SPOT (*Satellite Pour l'Observation de la Terre*) e pelo instrumento *Thematic Mapper* USGS Landsat, a ESA (*European Spatial Agency*) deu início à missão Sentinel-2, parte do programa Copernicus (ESA, 2018). Aos satélites Sentinel-2 possuem a bordo o sensor multiespectral MSI (*MultiSpectral Instrument*), e também possuem como objetivo a aquisição sistemática global de imagens multiespectrais e de alta resolução aliado a uma alta frequência de revisita de área em superfície.

2.1.1 Sentinel-2

A missão Sentinel é uma frota de satélites designados especificamente para entregar uma riqueza de dados e imagens que são centrais para o programa Copernicus da Comissão Europeia. Cada satélite integrante dessa missão possui diferentes tecnologias para atender diferentes demandas do programa Copernicus como mostra a Figura 2.

Figura 2 - Missões Sentinel previstas e suas principais aplicações.

 <p>Sentinel-1</p>	<p>Imagem SAR</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Monitoramento de gelo e ambientes polares; 2. Monitoramento de movimentos da superfície terrestre; 3. Cartografia de floresta, águas, solo e agricultura.
 <p>Sentinel-2</p>	<p>Imagens Multiespectrais</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Cobertura do solo, uso do solo e mapas de detecção de mudanças de uso do solo; 2. Mapas de risco; 3. Mapas geofísicos de variabilidade.
 <p>Sentinel-3</p>	<p>Monitoramento global terrestre e oceano</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Dados de cor do mar e solo; 2. Temperaturas da superfície terrestre e do mar; 3. Altimetria de alta resolução.
 <p>Sentinel-4</p>	<p>Atmosférico Geoestacionário</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Monitoramento da mudança da composição da atmosfera; 2. Mapeamento diário de gases a nível global e regional.
 <p>Sentinel-5</p>	<p>Atmosférico de baixa órbita</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Monitoramento de mudanças da composição da atmosfera; 2. Mapeamento diário de gases a nível global e regional.
 <p>Jason-CS</p>	<p>Altimetria de baixa inclinação</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Monitoramento de mudanças a nível do mar; 2. Oceanografia.

Fonte: ESA (2018).

O Sentinel-2 é o resultado de uma estreita colaboração entre a ESA, a Comissão Europeia, a indústria, os fornecedores de serviços e os utilizadores de dados. A missão foi

projetada e construída por um consórcio de cerca de 60 empresas lideradas pela *Airbus Defence and Space* e apoiada pela agência espacial francesa CNES para otimizar a qualidade da imagem e pelo DLR *German Aerospace Center* para melhorar a recuperação de dados usando comunicações ópticas (ESA, 2018).

A missão Sentinel-2 é baseada numa constelação de dois satélites idênticos na mesma órbita polar heliosíncrona com altitude de 786 km, separados por 180° para melhor cobertura e entrega de dados. Juntos eles cobrem todas as superfícies de terra, grandes ilhas, águas costeiras e continentais da Terra a cada cinco dias no Equador. Com seu imageador multiespectral e ampla cobertura de faixas, a missão Sentinel-2 não apenas oferece continuidade, mas também expande as missões francesa Spot e norte-americana Landsat.

Os satélites gêmeos, Sentinel-2A e Sentinel-2B, que foram lançados em julho de 2015 e março de 2017, respectivamente, no foguete Vega no *spaceport* europeu próximo de Kouru, Guiana Francesa. O tempo de revisita de cada cena por cada satélite é de dez dias, e quando compostos pelo par o tempo de revisita diminui para cinco dias no equador. Como o satélite Landsat-8 dos EUA oferece imagens semelhantes e graças à cooperação entre a ESA e a NASA, o objetivo é reduzir isso para um tempo médio de revisitação de apenas três dias sobre o equador e gerar produtos de dados comparáveis.

A bordo de ambos os satélites Sentinel-2 está o instrumento MSI (*MultiSpectral Instrument*). Trata-se de um sensor multiespectral que abrange 13 bandas espectrais (443 nm - 2190 nm) com uma faixa de imageamento de 290 km. As quatro bandas do VNIR (visível e infravermelho próximo) possuem resolução espacial de 10 m, as seis bandas do infravermelho de borda e de ondas curtas (SWIR) 20 m e as três bandas de correção atmosférica 60 m (ESA, 2018). A Tabela 2 apresenta as principais características do sensor MSI a bordo dos satélites Sentinel-2.

Tabela 1 - Principais características do sensor MSI.

Sentinel-2 (MSI)		
Banda	Comprimento de Onda (nm)	Resolução Espacial
1 - Aerosol	433-453	60 m
2 - Azul	458-523	10 m
3 - Verde	543-578	10 m
4 - Vermelho	650-680	10 m
5 - Red Edge 1	698-713	20 m
6 - Red Edge 2	733-748	20 m
7 - Red Edge 3	773-793	20 m
8A - NIR	785-899	20 m
8 - NIR <i>narrow</i>	855-875	10 m
9 - Vapor D'água	935-955	60 m
10 - Cirrus	1.360-1.390	60 m
11 - SWIR 1	1.565-1.655	20 m
12 - SWIR 2	2.100-2.280	20 m

Fonte: ESA (2018).

2.1.2 Landsat-8

A série Landsat surgiu no final dos anos 1960 como parte do Programa Espacial “*Earth Resources Technology Satellite*”, da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*). Trata-se do programa de aquisição de informações sobre os recursos terrestres mais antigo, operando ininterruptamente desde o dia 23 de julho de 1972 com o lançamento do satélite ERTS 1, que posteriormente foi rebatizado “Landsat”. Seu enfoque é o Sensoriamento Remoto de Recursos Naturais Terrestres, e disponibiliza imagens gratuitas da superfície da Terra, que atualmente são distribuídas pela USGS (*United States Geological Survey*). Também podem ser adquiridas no sítio institucional do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais).

O mais novo satélite da família Landsat traz importantes novidades para usuários que demandam imagens de fácil acesso e boa resolução espacial e espectral. A Tabela 3 apresenta as principais características dos sensores embarcados no satélite Landsat-8. A plataforma Landsat-8 opera com dois instrumentos imageadores: *Operational Land Imager* (OLI) e *Thermal Infrared Sensor* (TIRS). Produtos OLI consistem de nove bandas multiespectrais com resolução espacial de 30 m (bandas de 1 a 7 e 9) e 15 m (banda 8). As

faixas termais do instrumento TIRS são úteis no fornecimento de temperaturas de superfície mais precisas e os dados são coletados com resolução espacial de 100 m. A banda 8 do instrumento OLI é a banda pancromática que possui resolução espacial de 15 m. A banda 1 (ultra-azul) é útil para estudos costeiros. A banda 9 é útil para a detecção de nuvens. O tamanho aproximado da cena Landsat-8 é de 170 km ao norte-sul por 183 km a leste-oeste (USGS/NASA, 2018). A Tabela 3 apresenta as principais características do sensor OLI e TIRS a bordo do satélite Landsat-8.

Tabela 2 - Principais características do satélite Landsat-8.

Landsat-8 (OLI e TIRS)		
Banda	Comprimento de Onda (nm)	Resolução Espacial
1 - Aerosol	435-451	30 m
2 - Azul	452-512	30 m
3 - Verde	533-590	30 m
4 - Vermelho	636-673	30 m
5 - NIR	851-879	30 m
6 - SWIR 1	1.566-1.651	30 m
7 - SWIR 2	2.107-2.294	30 m
8 - Pancromática	503-676	15 m
9 - Cirrus	1.363-1.384	30 m
10 - TIR 1	10.600-11.190	100 m
11 - TIR 2	11.500-12.510	100 m

Fonte: USGS (2018).

2.2 Aspectos Fisiográficos

2.2.1 Clima

A região de Itaitia situa-se na porção do centro norte do Ceará, com clima predominante quente e seco e caracterizado por baixa pluviometria. Com precipitação pluviométrica média anual de 702,7 mm. Normalmente, o período de chuvas tem início no mês de janeiro, prolongando-se até junho, sendo as máximas pluviométricas entre fevereiro e abril.

A temperatura média anual é da ordem de 27°C, com variações de 1°C, em torno da média (IBGE, 2017).

2.2.2 Vegetação

A vegetação predominante na região é a caatinga do tipo hiperxerófila. Também são encontradas cactáceas como mandacaru, xiquexique e outras espécies, características do domínio semiárido dos Sertões Cearenses.

De acordo com o mapeamento fitogeográfico da folha SB.24-V-B, realizado pelo convênio DNPM/RADAMBRASIL, para a NUCLEBRÁS (1984), a região de Itaitia foi dividida em 3 sub-regiões fitoecológicas, que correspondem a:

1. Estepe Tropical (Caatinga);
2. Floresta Tropical (Floresta Ombrófila Aberta Tropical e Floresta Estacional Semidecidual Tropical);
3. Áreas antrópicas.

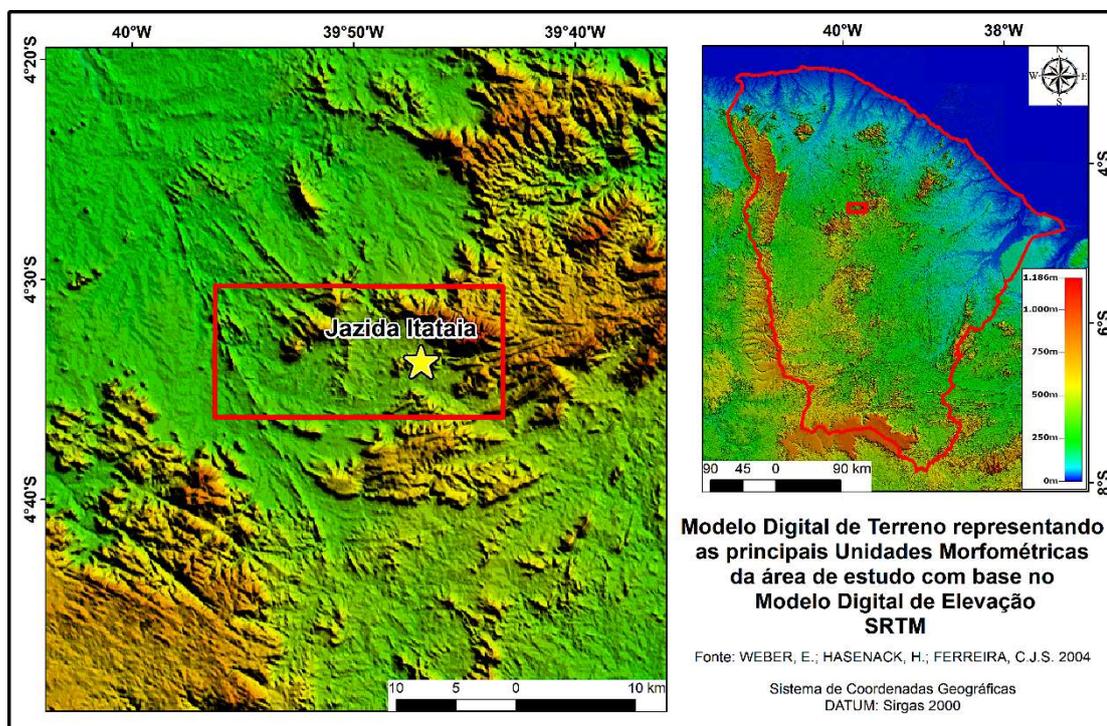
2.2.3 Relevô

Estudos realizados a partir do convênio DNPM/RADAMBRASIL/NUCLEBRÁS dividiram a região em duas grandes unidades morfológicas: a Depressão Sertaneja e os Planaltos Residuais (Figura 3).

Na Depressão Sertaneja está inserida a jazida de Itaitia, que se constitui num compartimento rebaixado e limitado entre os níveis elevados dos planaltos, com altitude média de 350 a 580 m.

Os planaltos residuais representam compartimentos de níveis mais elevados da área, com altitudes de 650 a 1.000 m, correspondendo aos maciços montanhosos das serras do Céu, das Cacimbas, da Mata Fome e das Laranjeiras. A Serra do Céu está a nordeste e a Serra da Mata fome está a sudeste da área de estudo. A Serra do Céu, com cota de 1.085 m, serve como divisor d'água das bacias hidrográficas dos rios Curu e Groaíras, apresentando uma cobertura vegetal mais densa que a presente no pediplano da depressão circunjacente.

Figura 3 - Modelo Digital de Terreno representando as principais unidades morfométricas unidades morfológicas da região de Itataia.



Fonte: WEBER, E.; HASENACK, H.; FERREIRA, C.J.S. 2004, modificado pelo autor.

2.2.4 Solos

Devido a longos períodos de seca alternados com escassos e curtos períodos chuvosos, a espessura do manto de intemperismo pode variar de alguns metros até regiões onde este é praticamente ausente. As características comuns às diversas classes de solos são: a pequena espessura, quase sempre inferior a 1,00 m; a textura arenosa dos horizontes superficiais e areno-argilosa ou argilosa nos horizontes sotopostos; a ocorrência eventual de *stone lines* ou fragmentos de rochas; e, a baixa saturação de bases trocáveis.

Na região de Itataia ocorrem, preferencialmente, os solos: brunos não cálcicos, planossolos, cambissolos, e algumas associações de solos litólicos e podzólicos vermelho-amarelo eutróficos de baixa permeabilidade (NUCLEBRÁS, 1984).

2.2.5 Hidrografia

A rede de drenagem é constituída por cursos d'água intermitentes sazonais de pequena energia, formando vales largos e configurando um padrão de drenagem predominantemente dendrítico, localmente estruturado, em zonas de cisalhamento e áreas mais fraturadas. Na região de Itataia o sistema hidrográfico mais importante é o da bacia do rio Groaíras, pertencente ao sistema Acaraú (NUCLEBRÁS, 1984). A Figura 4 sintetiza aspectos da geomorfologia e vegetação na área de estudo.

Figura 4 - Aspectos fisiográficos da área de estudo- (A) Unidade morfológicas da área de estudo e adjacências: depressão e planaltos residuais (Serra do Céu). (B) Caatinga hiperxerófila: vegetação predominante na área de estudo. (C) Açude de Itataia. Imagens capturadas na primeira semana de novembro de 2015, representando a época seca da região.



(A) Unidade morfológicas da área de estudo e adjacências: depressão e planaltos residuais (Serra do Céu).



(B) Caatinga hiperxerófila: vegetação predominante na área de estudo.



(C) Açude de Itataia.

Fonte: Confeccionado pelo autor.

2.3 Geologia Regional

O município de Santa Quitéria encontra-se inserido geologicamente nos terrenos antigos do pré-cambriano da porção oriental da Plataforma Sul-Americana, no escudo Atlântico (CPRM, 2003), mais precisamente na porção setentrional da Província Borborema (ALMEIDA *et al.*, 1977).

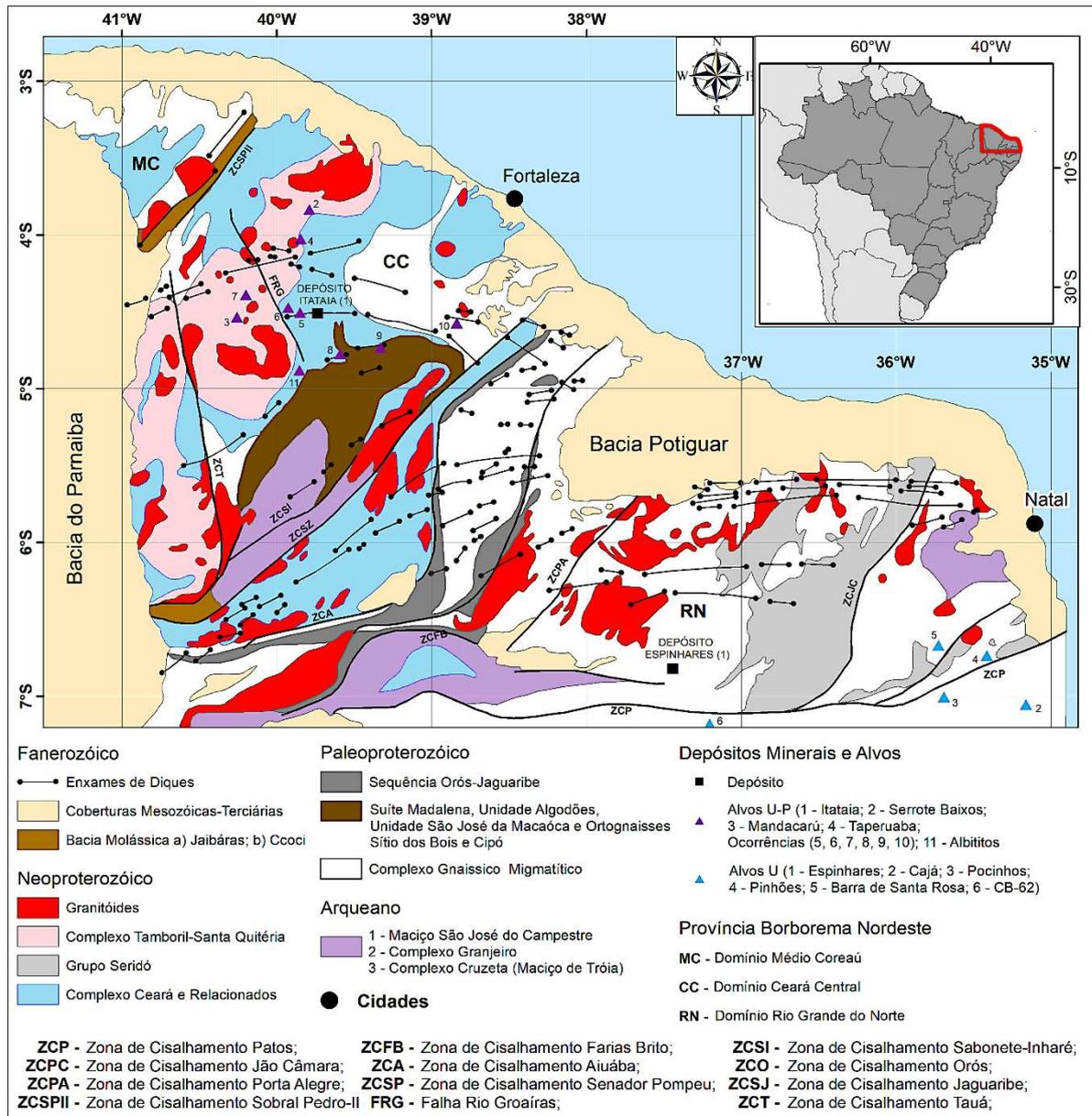
2.3.1 Província Borborema

A porção noroeste da Província Borborema tem sido alvo de diversos trabalhos envolvendo estudos geológicos, geocronológicos e de geotecnologias (FETTER, 1999; MARTINS, 2000; CAVALCANTE *et al.*, 2003; SANTOS *et al.*, 2004; CASTRO, 2004; TEIXEIRA, 2005).

Sua evolução está relacionada à convergência e aglutinação dos crátons Oeste-Africano, Amazônico e São Francisco-Congo, durante a formação da porção ocidental de Gondwana, representados em geral por um sistema de *nappes* com metamorfismo inverso e sequências máficas/ultramáficas geradas em zonas de subducção (CABY & ARTHAUD, 1986).

Brito Neves *et al.* (2000) dividiram a Província Borborema em 5 Domínios Tectônicos principais denominados de Médio Coreau (localizado a norte do Lineamento Transbrasiliano e a Sul da margem retrabalhada do Cráton São Luís); Ceará Central (localizado entre os lineamentos Transbrasiliano (Zona de Cisalhamento Sobral Pedro-II) e Senador Pompeu); Rio Grande do Norte (localizado entre os Lineamentos Senador Pompeu e Patos) (Figura 5); Zona Transversal (situado entre o Lineamento Patos e Pernambuco); e Tectônico Meridional (situado entre o Lineamento Pernambuco e a borda norte do Cráton São Francisco). Somente o Domínio Ceará Central será dado ênfase por englobar a região, objeto de estudo, desta forma será o único abordado nos itens subsequentes.

Figura 5 - Província Borborema, principais domínios tectônicos e zonas de cisalhamento.



Fonte: Adaptado de Cavalcanti *et al.*, 2018.

2.3.2 Domínio Ceará Central

Domínio Ceará Central está localizado entre os lineamentos Transbrasiliiano e Senador Pompeu e pode ser dividido entre as Unidades Litotectônicas: Embasamento Arqueano, Terrenos Acrescionários do Paleoproterozóico, Cobertura Neoproterozóica e complexo granítico-migmatítico Neoproterozóico Tamboril- Santa Quitéria.

2.3.2.1 *Embasamento Arqueano*

Os terrenos arqueanos do Ceará Central estão limitados à porção sul/sudeste, na região de Pedra Branca e Mombaça. Abrangem uma área de aproximadamente 6.000 km², representando pequenos núcleos arqueanos (gnaisses granulíticos do tipo TTG) envoltos por complexos gnáissicos paleoproterozóicos, e são distribuídos ao longo da borda ocidental da zona de cisalhamento Senador Pompeu.

As rochas arqueanas do Domínio Ceará Central são componentes do maciço Troia-Pedra Branca, representadas por terrenos gnáissico-granulíticos limitados pelas zonas de cisalhamento Senador Pompeu e Sabonete-Inharé (Complexo Mombaça), compostos principalmente por rochas gnáissicas e granulíticas de composição tonalítica e granodiorítica.

2.3.2.2 *Terrenos Acrescionários do Paleoproterozóico*

Os terrenos do paleoproterozóico são marcados por grandes extensões intracratônicas que precederam um evento orogênico. Tais extensões estão registradas pela formação de uma sequência de rochas supracrustais metaígneas a oeste da cidade de Quixeramobim, formando o cinturão homônimo (ARTHAUD *et al.*, 1998).

As rochas que constituem esta sequência basal margeiam a porção norte do núcleo arqueano e afloram desde a região de Madalena até Choró, sendo representadas por gnaisses de composição quartzo-diorítica a tonalítica e por terrenos do tipo TTG (tonalitos-tronjhemitos-granodioritos). São constituídos por rochas metaplutônicas intercaladas em faixas supracrustais (Suíte Metamórfica Algodões-Choró, de MARTINS, 2000).

Este domínio é caracterizado por uma extensiva tectônica horizontal, com o *emplacement* de “nappes” sendo uma constante regional. Esta tectônica envolve ainda, o retrabalhamento do embasamento arqueano e metassedimentos do proterozóico (CABY & ARTHAUD, 1986). As relações geométricas e estruturais segundo os autores citados permitem de certa maneira distinguir reativações do embasamento arqueano anatético recobrimdo unidades do Proterozóico ao Norte e “nappes” de rochas proterozóicas de grau elevado com uma aparência de metamorfismo inverso recobrimdo suavemente rochas arqueanas reativadas ao Sul.

2.3.2.3 Cobertura Neoproterozóica

O Domínio Ceará Central é caracterizado pela abundância de ocorrências isoladas de sequências supracrustais, que bordejam núcleos anatóxicos, como por exemplo: o Complexo Tamboril-Santa Quitéria, na região de Santa Quitéria. Essas unidades foram incluídas no chamado Grupo Ceará por Kegel (1958), ou Complexo Ceará (CAVALCANTE *et al.*, 2003), individualizadas como unidades metassedimentares, tais como; Independência, Canindé, Quixeramobim e Forquilha.

A sequência supracrustal neoproterozóica, representada aqui pelo Complexo Ceará (CAVALCANTE *et al.*, 2003), é caracterizada pela ocorrência de mica xistos e paragneisses, e rochas pelíticas a semi-pelíticas, da unidade Independência, e gnaisses em nível distinto de metamorfismo e migmatização, incluído mármore, calciossilicáticas, metagabros, anfíbolitos e dioritos da unidade Canindé, distribuídos em praticamente toda extensão da área. O arco magmático de Santa Quitéria, localizado no setor NW da área e que representa o complexo granítico-migmatítico Neoproterozóico, é formado essencialmente por migmatitos de composição tonalítica a granítica, envolvendo granitóides neoproterozóicos a ordovicianos intrusivos de composição monzogranítica a sienítica (AMARAL, 2011).

Na região de Independência (CE), Caby & Arthaud (1986) reconheceram uma zonação metamórfica do tipo barrovia invertida em grandes nappes no estilo Himalaiano. Ainda segundo esses autores, nessa região o sentido de transporte das estruturas relacionadas à tectônica de baixo ângulo é para Sul.

2.3.2.4 Arco Magmático Santa Quitéria

Representa o complexo granítico-migmatítico Neoproterozóico (Complexo Tamboril- Santa Quitéria de FETTER *et al.*, 2003), localiza-se a leste da zona de cisalhamento Sobral-Pedro II. O Arco Magmático Santa Quitéria compreende uma associação litológica diversificada incluindo gabros, tonalitos, granodioritos, monzogranitos e granitos. As rochas granitóides são equigranulares a megaporfíricas, maciças a foliadas. As foliações são associadas às fases de empurrão e transcorrência tardia. Enclaves microgranulares máficos são comuns e indicam a complexa evolução cíclica do arco com a alternância de fases de distensão e compressão. A história evolutiva culmina com a intrusão de granitos tardios equivalentes aos granitos pós-tectônicos do Domínio Médio Coreau. Amplas áreas de migmatitos são resultantes da intrusão e fusão parcial de rochas graníticas mais antigas por pulsos magmáticos mais novos. O arco é flanqueado por metassedimentos (turbiditos, rochas calciossilicatadas e

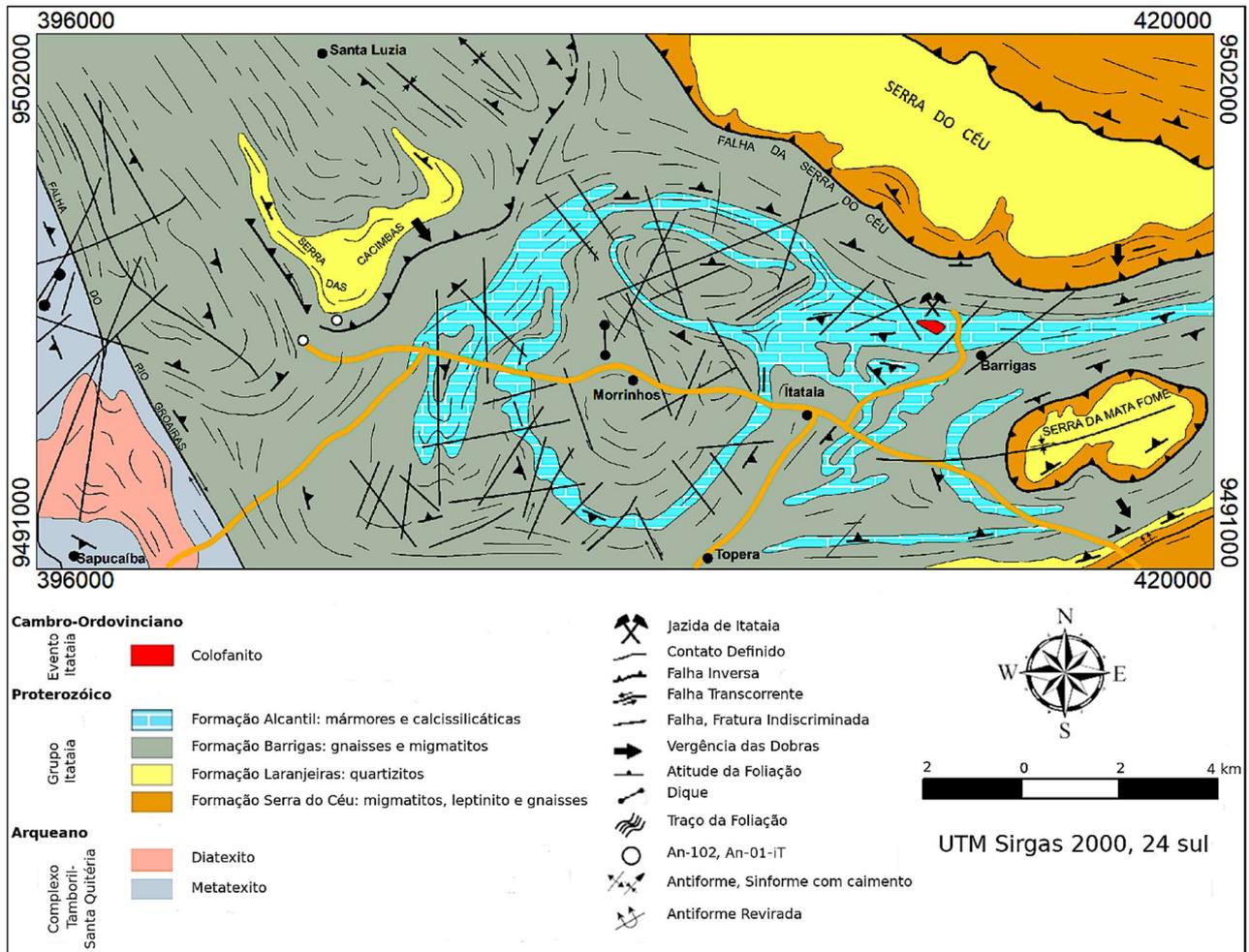
vulcanoclásticas) e metavulcânicas de ambiente pré-arco ou pós-arco. Dados U-Pb indicam idades entre 665 e 622 Ma (FETTER *et al.*, 2003).

2.3.2.5 Mineralização Itataia

A província fósforo-uranífera de Itataia, descoberta em 1976, através do Projeto Canindé, convênio NUCLEBRÁS/CPRM, está localizada no município de Santa Quitéria-Ceará, porção central do Estado. A jazida de Itataia está geologicamente inserida no Domínio Ceará Central, representado principalmente pela Unidade Independência, que é constituída predominantemente por paragneisses e xistos aluminosos e, subordinadamente, por quartzitos, mármore, anfíbolitos e rochas calciossilicáticas (CAVALCANTI & BESSA, 2016). Localmente a Unidade Independência foi denominada de Grupo Itataia. Os primeiros estudos geológicos enfocando a área de Itataia datam do início da década de 1980, merecendo destaque os trabalhos de Mendonça *et al.* (1980 e 1984).

A sequência metassedimentar de Itataia é do tipo QPC (quartzo-pelito-carbonato), de natureza transgressiva. Na sequência estratigráfica do Grupo Itataia ocorrem como embasamento os migmatitos da Formação Serra do Céu, que estão sotopostos pelos quartzitos da Formação Laranjeiras, seguidos dos gnaisses e migmatitos da Formação Barrigas. No topo da sequência estão os mármore da Formação Alcantil, que é a principal hospedeira da mineralização fósforo-uranífera, o colofanito (MENDONÇA *et al.*, 1980). Na Figura 6 é possível visualizar o mapa geológico da região de Itataia proposto por Mendonça *et al.* (1980), um dos primeiros mapeamentos da região de Itataia.

Figura 6 - Mapa geológico da região de Itataia.



Fonte: Modificado de Mendonça *et al.* (1980).

O termo "colofanito" foi criado por Angeiras & Netto (1977), para designar uma rocha quase que monominerálica, de coloração acastanhada, que constitui o principal minério em Itataia (MENDONÇA *et al.*, 1980). É constituída essencialmente por colofana (80%) e ocorre em pelo menos cinco tipologias diferentes: (a) corpos massivos com textura botrioidal; (b) *stockwork* e preenchendo fraturas abertas; (c) fragmentos e matriz de brechas; (d) disseminado na rocha hospedeiras; (e) fragmentos preenchendo feições kárticas, como conduto de cavas e fraturas abertas.

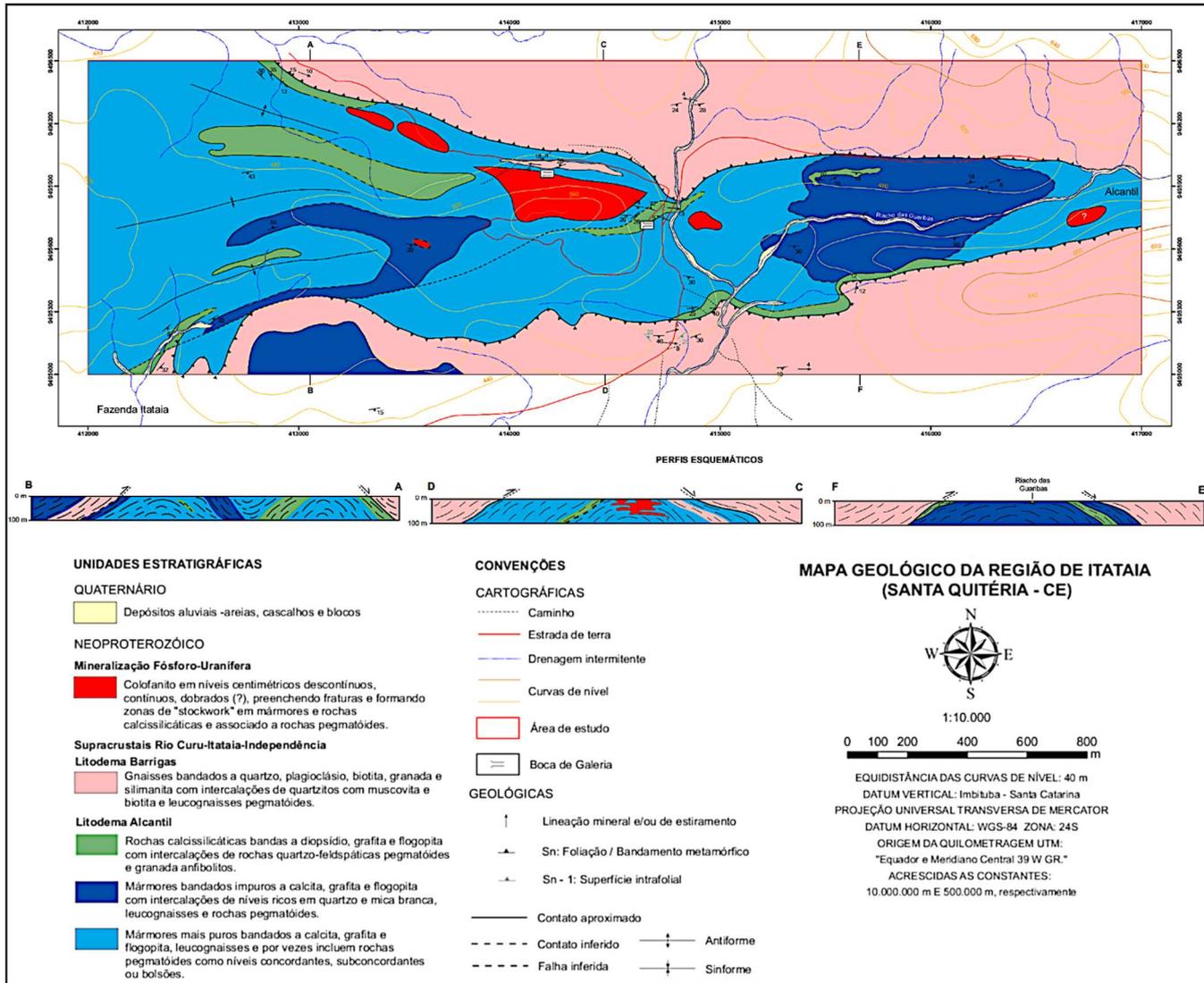
O depósito de Itataia apresenta 142.500 t de U_3O_8 de reserva estimada (64% desse total são classificados como medido) e cerca de 18.000.000 t de P_2O_5 . O colofanito exhibe teores médios de P_2O_5 e U_3O_8 iguais a 26,35% e 0,19%, respectivamente (MENDONÇA *et al.*, 1984).

O principal controle estrutural para os corpos mineralizados é formado por falhas normais e fraturas de duas orientações preferenciais de faturamento, uma E-W, mais importante, ao longo da qual se deu o preenchimento do colofanito e outra NE-SE, posterior a primeira, que afetou tanto as rochas encaixantes quanto o corpo do minério (MENDONÇA *et al.*, 1980).

A origem do depósito Itataia é controversa e tem sido atribuída aos processos de episienitização causados pelo fluxo de fluidos hidrotermais convectivos dos granitos pós-orogênicos (ANGEIRAS, 1988; NETTO *et al.*, 1991) ou a processos metamórfico hidrotermais que teriam promovido a remobilização do fosfato a partir de uma sequência sedimentar transgressiva rica em fosfato, ambos com enriquecimento supergênico (FAVALE & LEAL, 1982; MENDONÇA *et al.*, 1985; CASTRO *et al.*, 2005). Cavalcanti *et al.* (2016) interpretam que o depósito de Itataia formou-se em um ambiente cárstico hidrotermal, de baixa temperatura, a partir da remobilização de urânio e fosfato dos corpos de albitos (protominério). Esta remobilização teria ocorrido devido à presença de uma fonte termal aqui correlacionada ao magmatismo Cretáceo Rio Ceará Mirim, gerada em resposta ao fraturamento da crosta continental em escala global, ocasionado pela abertura do oceano Atlântico Equatorial e Sul.

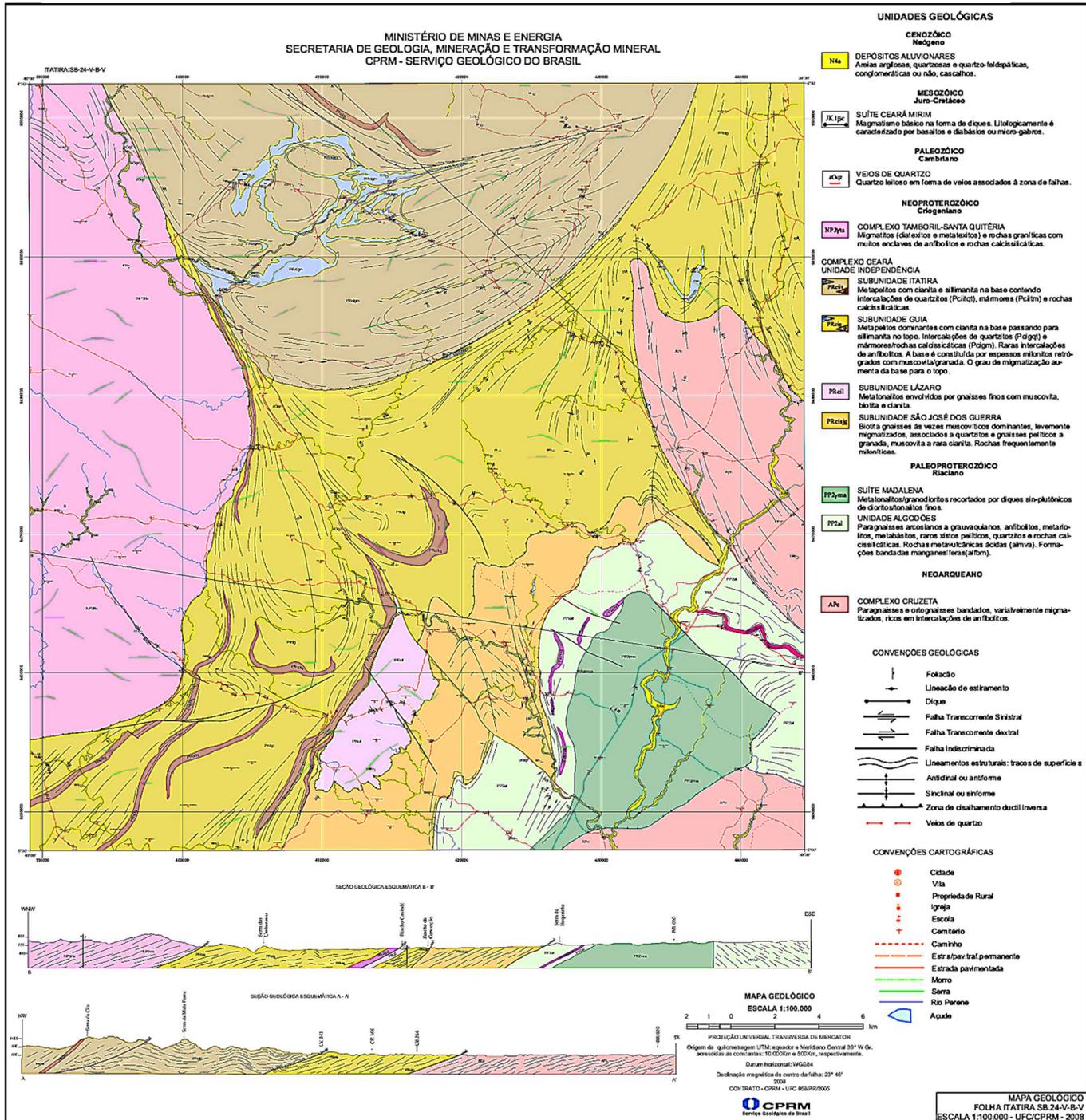
Mapeamentos mais recentes de maior detalhe como os realizados por Pitombeira (2011) e Parente *et al.* (2008) na região de Itataia e seu entorno estão apresentados nas Figuras 7 e 8, respectivamente.

Figura 7 - Mapa geológico da região de Itaitaia (Santa Quitéria-CE).



Fonte: Pitombeira (2011).

Figura 8 - Mapa Geológico da Folha Itatira SB.24-V-B-V, escala 1:100.000.



Fonte: Parente *et al.* (2008).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

3.1.1 *Imagens Orbitais*

As imagens dos satélites Landsat-8 e Sentinel-2 foram adquiridas de forma gratuita através do site da USGS-*Earth Explorer* (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). As imagens Sentinel-2 Level 1-C estão disponíveis, também, para *download* gratuito no próprio site da ESA (<https://scihub.copernicus.eu/>). A possibilidade de *download* das imagens Sentinel-2 pelo *site* do serviço geológico americano (USGS) é devido a uma parceria entre a ESA e o USGS que permite a distribuição do dado Level 1-C, que são pré-processados para correção radiométrica TOA (*Top of Atmosphere*) e geométrica. As imagens Sentinel-2 são oriundas do satélite Sentinel-2A e ambas as imagens, Sentinel-2 e Landsat-8, foram adquiridas em setembro, no período de estiagem visando uma menor cobertura de vegetação e menor presença de nuvens da área, Sentinel-2A em 26 de setembro de 2017 e Landsat-8 em 30 de setembro de 2017.

3.1.2 *Softwares*

Os *softwares* utilizados foram os seguintes:

- ENVI 5.3: pré-processamento e processamento das imagens de Sensoriamento Remoto;
- ILWIS 3.3: para o cálculo do OIF (*Optimal Index Factor*);
- ArcGIS 10.3.1: para análise das imagens em ambiente SIG (Sistema de Informações Geográficas);

3.1.3 *Dados Geológicos*

Os dados geológicos locais baseiam-se nos trabalhos pretéritos de mapeamento geológico que abrangem a área de estudo, tais como Mendonça *et al.* (1980), Parente *et al.* (2008) e Pitombeira (2011). Visitas técnicas ao campo possibilitaram o reconhecimento dos litotipos da mineralização Itataia e seu entorno.

3.2 Métodos

O processamento de imagens digitais é a etapa pós aquisição realizada pelo sensor, onde serão tratados os dados obtidos a fim de realçar alvos de interesse. Para isso são necessárias técnicas de pré-processamento (correções de possíveis erros adquiridos durante a aquisição de dados) e processamento. A Tabela 3 apresenta um resumo com os métodos utilizados, sua função, o senso em que foi aplicado e o programa utilizado.

Tabela 3 – Resumo dos métodos utilizados no trabalho.

Método	Função	Sensor Aplicado	Programa
<i>Dark Object Subtract</i>	Correção Atmosférica das imagens.	Sentinel-2A/MSI e Landsat-8/OLI	ENVI 5.3
Espaço RGB	Representar o dado em imagens visíveis ao ser humano.	Sentinel-2A/MSI	ENVI 5.3
<i>Optimal Index Factor</i> (OIF)	Gerar um <i>ranking</i> com as melhores combinações RGB possíveis entre três bandas.	Sentinel-2A/MSI	ILWIS 3.3
Razão de Bandas	Destacar sutis variações de reflectância de alvos específicos em uma mesma cena.	Sentinel-2A/MSI e Landsat-8/OLI	ENVI 5.3
Análise por Principais Componentes (APC)	Fornecer um conjunto de dados completamente descorrelacionados entre si.	Sentinel-2A/MSI	ENVI 5.3
Análise por Componentes Independentes (ICA)	Fornecer um conjunto de dados estatisticamente independentes entre si.	Sentinel-2A/MSI	ENVI 5.3
<i>Minimum Noise Fraction</i> (MNF)	Produzir imagens que apresentem um aumento da razão sinal/ruído de forma crescente em relação aos autovalores.	Sentinel-2A/MSI	ENVI 5.3
Coefficiente de Correlação (r)	Medir o grau da correlação linear entre duas variáveis quantitativas.	Sentinel-2A/MSI e Landsat-8/OLI	ENVI 5.3
Filtro Passa-Baixa	Preservar os componentes de baixa frequência da imagem à custa de reduzir os de alta frequência.	Sentinel-2A/MSI	ENVI 5.3

Fonte: Confeccionado pelo autor.

Nos tópicos seguintes serão apresentadas as técnicas usadas nesse trabalho em maior detalhe.

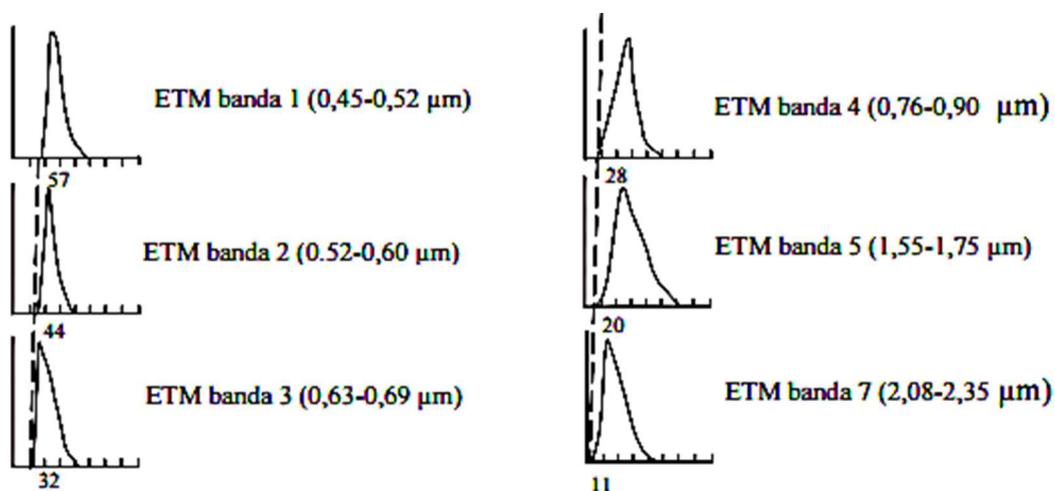
3.2.1 Correção Atmosférica

Existe uma relação entre a reflectância (ou radiância) e os valores digitais correspondentes nas imagens das superfícies observadas que pode ser afetada por perturbações do próprio sensor imageador, bem como efeitos atmosféricos e ou ainda disposição do relevo. Os erros ou distorções aos que as imagens estão sujeitas, vão se apresentar nas deformações de escala, incorreções nas posições espaciais dos pixels, perda de contraste entre os alvos ou registros incorretos dos valores digitais orbitais.

A atmosfera afeta a radiância medida em qualquer ponto da imagem, de duas maneiras aparentemente opostas. Primeiro, ela atua como um reflector, adicionando uma radiância extra ao sinal que é detectado pelo sensor. Segundo, ela atua como um absorvedor, atenuando a intensidade de energia que ilumina o alvo na superfície (MENESES & ALMEIDA, 2012).

Devido aos efeitos do espalhamento atmosférico é adicionado um valor de brilho a todos os pontos da imagem, e as áreas sombreadas deixam de exibir *pixels* com valores de zero ou bem próximos de zero. Assim, os histogramas das bandas do sensor apresentam um valor adicionado a cada banda individual, esse valor deve ser subtraído da banda, porque o espalhamento causa às imagens uma aparência desfocada ou de névoa, devido à perda de contraste da imagem. A Figura 10 ilustra os histogramas das bantas do sensor ETM+, com indicação do valor digital que mede a quantidade de espalhamento atmosférico adicionada ao sinal.

Figura 9 - Histogramas das bandas do sensor ETM com indicação do valor digital que mede a quantidade de espalhamento atmosférico adicionada ao sinal.



Fonte: Meneses & Almeida (2012).

A técnica mais aceita para a remoção desse valor a mais no histograma é a *dark subtraction* ou *haze removal*, na qual consiste em remover (subtrair) o valor de brilho adicionado pelo espalhamento atmosférico. Desse modo, temos a conversão dos números digitais (*digital numbers DN*) para reflectância. Esse processamento foi realizado pela seguinte sequência no ENVI: *Basic Tools > Preprocessing > General Purpose Utilities > Dark Subtract*.

3.2.2 Espaço RGB

O sistema RGB (*Red, Green, Blue*) é o mais usado entre os modelos de cores, e está fundamentado na visão humana, que é sensível aos comprimentos de onda das radiações eletromagnéticas na região do vermelho, do verde e do azul. Esse espaço baseia-se na adição de um tripleto de bandas, às quais são associados livremente os canais das cores azul, verde e vermelho, sendo assim possível obter diversas tonalidades de cores. Um efeito complementar ao sistema RGB, é o sistema CMY (*Cyan, Magenta, Yellow*) no qual, através da subtração do vermelho, verde e azul da luz branca, usando filtros, produz-se: ciano (subtração de vermelho), magenta (subtração de verde) e o amarelo (subtração de azul). São ditas cores primárias subtrativas, e no espaço RGB, cores primárias aditivas (CRÓSTA, 1992).

No espaço RGB, pode-se formar diferentes combinações de bandas dos sensores remotos nos canais do vermelho, verde e azul, a fim de destacar diferentes informações presentes na imagem. Ao se colocar as bandas que abrangem o espectro do visível, por exemplo

do sensor OLI representado pelas bandas 4 (Red; 0,64-0,67 μm), 3 (Green; 0,53-0,59 μm) e 2 (Blue; 0,45-0,51 μm) nos respectivos canais RGB, teremos uma composição em cor verdadeira, pois equivalem às mesmas frequências percebidas pelo ser humano. Por outro lado, se fizermos combinações utilizando essas mesmas bandas, mas onde não estejam em seus canais de equivalência ou se usarmos além delas, quaisquer outras bandas que abranjam outros comprimentos de onda do espectro (*Near Infrared* – NIR ou *Short Wave Infrared* – SWIR) tem-se uma composição colorida falsa-cor.

3.2.3 *Optimal Index Factor (OIF)*

Optimum Index Factor (OIF) é um método estatístico desenvolvido por Chavez *et al.* (1982) e Chavez *et al.* (1984), baseado no total de variância e correlação entre as bandas para gerar um *ranking* com as melhores combinações RGB possíveis entre três bandas. O algoritmo usado para calcular o *Optimum Index Factor* está apresentado na equação abaixo:

$$\text{OIF} = \text{Max} \left[\frac{\sum_{i=1}^n \sigma(i)}{\sum_{j=1}^n |r(j)|} \right]$$

Onde; OIF é o *optimum index fator*; $\sigma(i)$ é o desvio padrão de k bandas; e $r(j)$ é o valor da matriz de correlação.

A técnica OIF simplifica a seleção por evolução quantitativa da estatística da cena e evita o consumo de tempo do processo de análise visual de grandes números de potenciais combinações RGB (QAID & BASAVARAJAPPA, 2008).

Para gerar o OIF, primeiramente é necessário importar o conjunto de dados, no caso as bandas do sensor MSI, para o *software* ILWIS: *Import Map > Import Via GDAL*. Depois cria-se um conjunto de dados dentro do *software* seguindo a sequência: *Create > New Map List*. No *software* ILWIS, o OIF é baseado no cálculo matrix de correlação que gerada pela ferramenta: *Statistics > Correlation Matrix*.

3.2.4 Razão de bandas

A divisão ou razão de bandas entre bandas de uma imagem multiespectral é uma operação muito comum do PDI de sensores remotos. Ela funciona como meio para destacar sutis variações de reflectância de alvos específicos (litologias, solos, vegetação, entre outros) em uma mesma cena. A divisão de bandas consiste na divisão de *pixel* de uma banda pelo *pixel* de posição correspondente de outra banda.

Diversos autores utilizaram razão entre bandas do infravermelho de ondas curtas (SWIR) para identificar e diferenciar litologias, já que muitos minerais formadores de rochas apresentam picos de absorção e reflectância característicos das regiões do espectro eletromagnético (UCHÔA, 2011).

Existem duas maneiras de realizar a Razão de Bandas no *software* ENVI, pela aplicação *Band Math* ou pela *Band Ratios*. Nesse trabalho optou-se pela *Banda Ratios* por fins meramente práticos. Tal processamento foi realizado pela seguinte sequência no ENVI: *Transform > Band Ratios*.

3.2.5 Análise por Principais Componentes (APC)

A Análise por Principais Componentes (APC), também chamada de Transformação por Principais Componentes ou Transformação de Karhunen-Loeve, é uma das funções de processamento de imagens mais poderosas na manipulação de dados multiespectrais (CRÓSTA, 1992). Tem seus princípios na estatística para análise de um grande número de variáveis, e é comumente utilizada em dados de geologia, tais como radar, geofísica ou geoquímica, em conjunto com imagens multiespectrais.

A grande vantagem dessa técnica é a remoção de qualquer correlação presente no conjunto de bandas originais, com uma simultânea compressão da maioria da informação total presente em todas as bandas, isso é, concentra a variância total para poucas dimensões (MENESES & ALMEIDA, 2012). Desse modo, a base conceitual da APC é concentrar informações redundantes de um conjunto de bandas espectral em uma única imagem.

Na Análise por Principais Componentes, temos “n” bandas de entradas em um espaço de atributos, onde serão analisadas as correlações entre elas e produzindo um novo conjunto de “n” novas bandas com nenhuma correlação entre si. O espaço de atributos terá tantas dimensões quantas forem as bandas espectrais consideradas. As novas bandas serão geradas de tal modo, em que a primeira banda (ou primeira componente principal, 1º PC) possuirá 80-90% de toda a informação das bandas de entrada, ou seja, irá conter a informação

que é comum a todas as “n” bandas originais. A 2º PC concentrará a segunda informação mais comum, e assim por diante até a última PC conter a informação menos significativa. Essas informações menos significantes contidas nas últimas PC’s é considerada como ruído e normalmente são descartadas. Entretanto, em estudos de Geologia, esses ruídos, normalmente podem representar minerais indicativos de jazidas, por se tratarem de feições espectrais muito específicas (CRÓSTA, 1992).

Uma maneira de se compreender como as PC’s são formadas é examinando-se cuidadosamente a matriz de autovetores gerada, para entender a contribuição de cada banda original na formação de cada uma das PC’s. Sabendo-se se o sinal de cada coeficiente do autovetor é positivo ou negativo, pode-se comparar com as curvas espectrais de materiais conhecidos, determinando-se assim com um grau razoável de certeza em qual(is) PC(s) a informação espectral desejada irá ser concentrada. Essa técnica interpretativa é conhecida como técnica Crósta, ou *Feature Oriented Principal Componente* (FPSC), desenvolvida por Crósta & Moore (1989).

Os autovalores, ou do inglês *eigenvalues*, representam nada mais do que o comprimento dos eixos dos PCs de uma imagem e sua medida é dada em unidades de variância. Associados a cada autovalor estão os autovetores (ou *eigenvectors*), que indicam as direções dos eixos das PCs. Os autovetores mostram o que cada banda original contribui para uma determinada PC, em uma combinação aditiva e linear (CRÓSTA, 1992). Exemplificada abaixo:

$$CP1 = (B1 \times e1,1) + (B2 \times e1,2) + \dots + (Bn \times e1,n)$$

·
·
·

$$CPN = (B1 \times en,1) + (B2 \times en,2) + \dots + (Bn \times en,n)$$

Onde CP1, ... , CPN são as Principais Componentes, B1, ... , Bn são as bandas originais e os coeficientes e1,1, ... , e1,n / en,1, ... , en,n são os autovetores.

Esse processamento foi realizado pela seguinte sequência no ENVI: *Transform > Principal Components > Forward PC Rotation > Compute New Statistics and Rotate*. E para visualizar a matriz de autovetores das bandas PCs foi utilizada a ferramenta *Statistics* do ENVI, por meio da sequência: *Basic Tools > Statistics > Compute Statistics*.

3.2.6 Análise por Componentes Independentes (ICA)

Análise por componentes independentes (ICA) é um método recentemente desenvolvido com o objetivo de achar uma representação linear de dado não-Gaussiano de modo que os componentes sejam estatisticamente independentes, ou tão independentes quanto possível (HYVÄRINEN & OJA, 2000).

Foi primeiramente proposto por Héroult *et al.* (1985), como uma técnica para lidar com problemas de separação cega de fontes (BSS – *Blind Source Separation*). O termo separação cega de fontes (BSS) se deve ao fato de não haver, ou haver com escassez, conhecimento com relação às fontes e aos sinais misturados. Em outras palavras, não há como observar as fontes diretamente, nem é conhecida a forma como as fontes foram misturadas.

Um problema bem conhecido de separação cega de fontes é o *Cocktail Party*, no qual, por exemplo, duas pessoas estão em uma sala conversando ao mesmo tempo e dois microfones gravando a conversa. Sejam $x_1(t)$ e $x_2(t)$ os sinais das misturas gravados pelos microfones em função do tempo, a_{11} , a_{12} , a_{21} e a_{22} parâmetros que dependem da distância dos microfones das pessoas e $s_1(t)$ e $s_2(t)$ os sinais das fontes. Podemos expressar as misturas instantâneas, que matematicamente são combinações lineares, com um sistema de equações abaixo:

$$\begin{aligned}x_1(t) &= a_{11}s_1 + a_{12}s_2 \\x_2(t) &= a_{21}s_1 + a_{22}s_2\end{aligned}$$

O objetivo está em estimar $s_1(t)$ e $s_2(t)$ usando somente o sinal gravado $x_1(t)$ e $x_2(t)$. Se a_{ij} fossem conhecidos, poderíamos solucionar a equação 1 através de métodos clássicos. O ponto é, contudo, que se você não sabe a_{ij} o problema é consideravelmente mais difícil (HYVÄRINEN & OJA, 2000). Assume-se que $s_1(t)$ e $s_2(t)$ são estatisticamente independentes em cada instante de tempo. ICA pode ser usado para estimar o a_{ij} baseando na informação de suas independências, o que nos permite separar as duas fontes de sinais originais $s_1(t)$ e $s_2(t)$ de suas misturas $x_1(t)$ e $x_2(t)$.

Inicialmente, a análise em componentes independentes foi criada para lidar com problemas semelhantes ao problema do *Cocktail Party* (MORETO, 2008). Entretanto, existem vários estudos em diversas áreas do conhecimento com aplicações muito interessantes como, por exemplo, telecomunicações, biomedicina, processamento de voz, processamento de áudio e imagem e análises financeiras.

Apesar de escasso, também existem artigos com aplicações de ICA em imagens de satélite aplicados a mapeamento geológico. Por exemplo:

1. Henriques (2003) - utilização de análise de componentes independentes para o mapeamento de ambientes coralinos com base em imagens de sensores remotos orbitais;
2. Kumar *et al.* (2015) - utilizou ICA em imagens ASTER para discriminação litológica de mapeamento geológico na região de Udaipu em Rajasthan, Índia;
3. Al-Nahmi *et al.* (2017) - aplicou ICA em imagens Sentinel-2 para mapeamento geológico na área ALMaghrabah na região Hajjah, Iemên;

3.2.6.1 Definição:

Para definir rigorosamente ICA (COMON, 1994; JUTTEN & HERAULT, 1991), pode-se usar um modelo estatístico de “variáveis latentes”. Assumimos que observamos n misturas lineares x_1, \dots, x_n e n componentes independentes (HYVÄRINEN & OJA, 2000).

$$\mathbf{x}_j = \mathbf{a}_{j1}\mathbf{s}_1 + \mathbf{a}_{j2}\mathbf{s}_2 + \dots + \mathbf{a}_{jn}\mathbf{s}_n, \quad \forall j = 1, \dots, n$$

Onde, $\mathbf{a}_{ij}, \forall j = 1, \dots, n$ são alguns coeficientes reais.

Esse é o modelo básico ICA. O modelo ICA é um modelo generativo, o que significa que ele descreve como um dado observado é gerado por um processo de mistura dos componentes s_j .

É usualmente mais conveniente usar notação vetor-matriz em vez de somas como na equação anterior. Designando por um vetor x aleatório cujos elementos são as misturas x_1, \dots, x_n e também pelo vetor aleatório com elementos s_1, \dots, s_n . Vamos denotar a matriz de mistura A com elementos a_{ij} . Usando essa notação de vetor-matriz, o modelo de mistura é escrito assim:

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}\mathbf{s}$$

Algumas vezes precisamos das colunas da matriz A , denotando elas por a_j o modelo pode também ser escrito assim:

$$x = \sum_{i=1}^n a_i s_i$$

3.2.6.2 Suposições e Restrições:

1. Os componentes independentes são assumidos estatisticamente independentes. Esse é o princípio básico da ICA.
2. Os componentes independentes devem ser distribuições não-gaussianas.

3. Para simplificar, assume-se que a matriz de mistura desconhecida é quadrática, ou seja, o número de componentes independentes é igual ao número de misturas observadas.

3.2.6.3 Pré-Processamento e Processamento

O *software* utilizado para o processamento das imagens, foi o ENVI 5.3. Seu algoritmo segue as seguintes diretrizes:

- 1) Centraliza e embranquece o dado amostral usando a média, autovetor e autovalor do dado amostral, e aplica a rotação PC para o dado esbranquiçado.
- 2) Realiza maximização de negentropia usando a amostra branqueada para estimar a matriz da transformação IC.
- 3) Transforma o arquivo de input usando a matriz *forward IC transform*.

Centralizar o dado é o pré-processamento mais básico e necessário é, subtraindo o vetor médio $m = E\{x\}$ para tornar x uma variável de média zero. Esse pré-processamento é feito unicamente para simplificar o algoritmo ICA: depois de estimar a matriz misturada A com o dado centralizado, podemos completar a estimação adicionando o vetor médio de 's' de volta ao dado estimado centralizado de s dado $A^{-1}m$.

Outro pré-processamento feito para simplificar o cálculo da ICA é o branqueamento do dado (*whitening*), reduzindo o número de parâmetros a ser estimado. Antes da aplicação do algoritmo ICA (e depois de centralizar), transformamos o vetor x observado linearmente para que possamos obter um novo vetor \tilde{x} que está branqueado. Em outras palavras, a matriz de covariância de \tilde{x} é igual a matriz de identidade: $R_{\tilde{x}\tilde{x}} = E\{\tilde{x}\tilde{x}\} = I$. A transformação de branqueamento é sempre possível.

Um das restrições da ICA é que os componentes independentes devem ser distribuições não-gaussianas. A não-gaussianidade pode ser medida de diversas formas. O algoritmo do ENVI usa a negentropia, que é uma medida baseada na entropia diferencial. A vantagem de se utilizar a negentropia como medida de não-gaussianidade consiste no fato de ela ser bem justificada pela teoria estatística e é, de certa forma, um estimador ótimo da não-gaussianidade (MORETO, 2008).

3.2.6.4 APC versus ICA

Proposta por Héroult *et al.* (1985), a técnica inovadora para separação cega de fontes foi denominada por eles como análise em componentes independentes (inicialmente INCA, a qual foi muito pouco utilizada, e posteriormente ICA- *Independent Component Analysis*), devido a sua similaridade com a técnica de análise por principais componentes (APC- *Principal Component Analysis*) (MORETO, 2008).

A principal diferença entre ICA e APC é que, no método ICA, obtêm-se sinais não gaussianos independentes e no método APC, obtêm-se simplesmente sinais não correlacionados, gaussianos ou não. Para o caso da APC, pode-se observar que, se os sinais são gaussianos, também serão independentes, porém fisicamente, podem não condizer com sinais provindos de fontes reais como, por exemplo, o sinal de voz de uma pessoa.

APC às vezes consegue achar componentes independentes, mas não é o enfoque dela. Maximizar a variância através da correlação pode ocasionar independência. ICA maximiza a informação mútua gerando pacotes com informações/parâmetros independentes. ICA não determina ordem de componentes. A razão disso é que, sendo s e A desconhecidos, não se pode livremente mudar a ordem dos termos da soma ($x=As$), e chamar qualquer um dos componentes independentes de primeiro (HYVÄRINEN & OJA, 2000).

Em resumo:

Análise PC é decomposição ortogonal. É baseada na análise da matriz de covariância, que é baseada na suposição Gaussiana. Análise IC é baseada na suposição não-Gaussiana de fontes independentes.

Análise PC usa somente estatística de segunda ordem. Análise IC usa estatística de alta ordem. Estatística de alta ordem é uma suposição estatística forte, revelando parâmetros interessantes no usual conjunto de dados hiperespectrais não-gaussianos.

Se o parâmetro de interesse (como anomalias) ocupar somente uma porção pequena do pixel, isso fará uma contribuição insignificante para a matriz de covariância. Em análise de PC, o parâmetro de interesse será enterrado nas bandas de ruído. Na análise IC os parâmetros serão distintos das bandas ruído.

Por fim, para gerar as componentes independentes foi pela seguinte sequência no ENVI: *Transform > Independent Components > Forward IC Rotation > Compute New Stats and Rotate*.

3.2.7 Minimum Noise Fraction (MNF)

A transformação *Minimum Noise Fraction* (MNF) é uma técnica baseada na APC desenvolvida para produzir imagens que apresentem um aumento da razão sinal/ruído de forma crescente em relação aos autovalores, o que nem sempre ocorre na APC (GREEN *et al.*, 1988). Trata-se de uma transformação de caráter linear

$$Y_i(x) = a_i^T Z(x); \quad i = 1, \dots, p$$

de tal modo que a razão sinal/ruído para $Y_i(x)$ é máxima ao longo de todas as transformações lineares ortogonais a $Y_j(x)$, $j = 1, \dots, i$.

A transformação *Minimum Noise Fraction* (MNF) consiste em duas rotações APC e uma etapa de branqueamento do ruído. Usa-se transformação MNF para determinar a dimensionalidade inerente do dado imagem, para segregar ruído no dado, e para reduzir os requerimentos computacionais para processamento subsequente (BOARDMAN & KRUSE, 1994).

A transformação MNF foi modificada a partir de Green *et al.* (1988) e implementada no ENVI, é uma transformação linear que consiste nas seguintes rotações de PCs separadas.

- A primeira rotação usa a principal componente do ruído da matriz de covariância para correlacionar e reamostrar o ruído no dado (um processo conhecido como branqueamento do ruído - *noise whitening*), resultando no dado transformado em que o ruído tem unidade de variância e nenhuma correlação banda a banda.
- A segunda rotação usa as principais componentes derivadas do dado imagem original depois deles terem o ruído branqueado pela primeira rotação e reamostrados para o desvio padrão do ruído. Uma vez que o processamento espectral adicional irá ocorrer, a dimensionalidade inerente do dado é determinada examinando o autovalor final e as imagens associadas.

Assim como na APC, a transformação MNF é uma transformação estatística de segunda ordem e cerca de 99% da variância do dado fica nos primeiros componentes e o ruído nos últimos componentes.

Para realizar a transformação MNF foi utilizada a seguinte sequência no ENVI: *Transform > MNF Rotation > Forward MNF > Estimate Noise Statistics from Data.*

3.2.8 Coeficiente de Correlação (r)

O coeficiente de correlação de Pearson (r) ou coeficiente de correlação produto-momento ou o r de Pearson mede o grau da correlação linear entre duas variáveis quantitativas, por exemplo, bandas de sensores remotos diferentes ou bandas do mesmo sensor.

Para análise do coeficiente de Pearson (r), levamos em consideração os seguintes fatores:

- Ele sempre tem um valor entre -1 e 1 (Tabela 4);
- Fortes relações lineares positivas têm valores de (r) mais próximos de 1, e negativas mais próximo de -1;
- Relações mais fracas têm valores de (r) mais próximos de 0.

Tabela 4 - Valor da Correção de Pearson (r).

Valor da Correlação (r)	Interpretação
0.9 a 1.0 (-0.9 a -1.0)	Correlação positiva (negativa) muito forte
0.7 a 0.9 (-0.7 a -0.9)	Correlação positiva (negativa) forte
0.5 a 0.7 (-0.5 a -0.7)	Correlação positiva (negativa) moderada
0.3 a 0.5 (-0.3 a -0.5)	Correlação positiva (negativa) fraca
0.0 a 0.3 (0.0 a -0.3)	Correlação positiva (negativa) desprezível

Fonte: Adaptado de Mukaka (2012).

O coeficiente de Pearson (r) foi utilizado para medir o grau de correlação entre as bandas equivalentes dos sensores MSI/Sentinel-2A e OLI/Landsat-8. Para realizar a comparação é necessário um conjunto possua o mesmo tamanho, ou seja, as matrizes das imagens tenham o mesmo tamanho.

As imagens possuem cenas diferentes, ou seja, superfícies imageadas com áreas diferentes. Para comparar ambos os sensores, foi usada uma área em comum as duas imagens. As áreas utilizadas neste trabalho foram baseadas no mapeamento de Mendonça *et al.* (1980). A partir das cenas foi recortada uma área abrangendo todas as litologias do Grupo Itataia, e depois a área de cada uma de suas litologias foi extraída separadamente, a fim de avaliar a correlação dos dados na área como um todo e em cada contexto litológico. Também, para a comparação, as bandas de ambos os sensores foram convertidas para 8bits e o pixel reamostrado para 10 metros, conforme Miranda *et al.* (2019).

Essas operações de reamostragem do pixel e corte das cenas, foram realizadas com na ferramenta *Layer Stacking* do ENVI por meio do seguinte caminho: *Basic Tools > Layer Stacking*. E para gerar a matriz de correlação com os coeficientes de Pearson foi utilizada a ferramenta *Statistics* do ENVI por meio da sequência: *Basic Tools > Statistics > Compute Statistics*.

3.2.9 Filtro Passa-Baixa

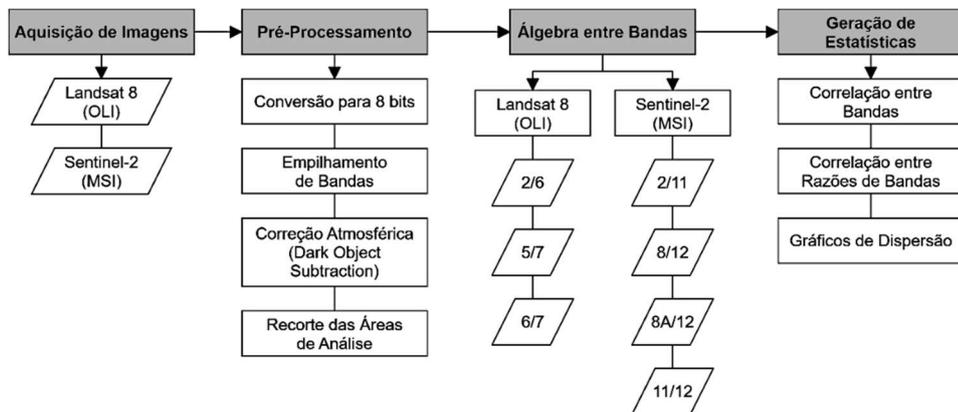
De acordo com Meneses & Almeida (2012) os filtros passa-baixa preservam os componentes de baixa frequência da imagem à custa de reduzir os de alta frequência. São filtros de suavização porque atenuam as regiões de bordas e detalhes finos da imagem, como ruídos, que correspondem aos componentes de alta frequência. Esse filtro foi utilizado em imagens que apresentam bastante ruído, como as imagens resultantes do *Minimum Noise Fraction* e Análise por Componentes Independentes. A aplicação do filtro passa-baixa gerou imagens mais suavizadas e realçou as litologias da área estudada.

Esse processamento foi realizado pela seguinte sequência no ENVI: *Filter > Convolutions and Morphology*.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A primeira parte desse capítulo trata-se do comparativo entre as imagens Sentinel-2A e Landsat-8 por meio do parâmetro estatístico coeficiente de Pearson (r). Com esses resultados foi publicado o artigo: Análise Comparativa de Imagens Sentinel-2A (MSI) e Landsat-8 (OLI). Aplicadas ao Mapeamento Geológico, Região de Itaitaia, Santa Quitéria, CE na revista ANUÁRIO DO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS – Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), DOI: 10.11137/2019_2_366_377. A Figura 10 apresenta o fluxograma da primeira parte deste capítulo.

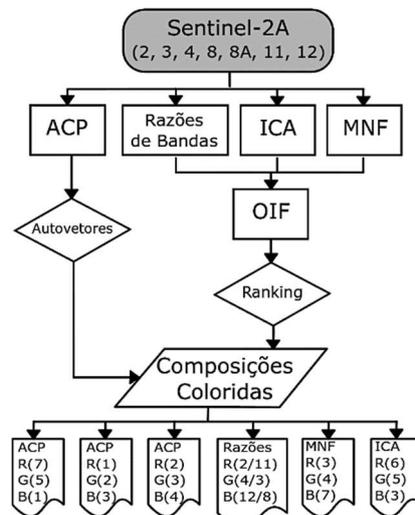
Figura 10 - Fluxograma da primeira parte deste capítulo



Fonte: Confeccionado pelo autor.

A segunda parte deste capítulo consta do processamento das imagens Sentinel-2A para o mapeamento da região de Itaitaia no Domínio Ceará Central, Província Borborema. A Figura 11 apresenta o fluxograma da segunda parte deste capítulo.

Figura 11 - Fluxograma da segunda parte deste capítulo



Fonte: Confeccionado pelo autor.

4.1 Comparativo Sentinel-2A/MSI x Landsat-8/OLI

De forma geral, os coeficientes obtidos apresentaram correlação positiva forte a muito forte entre as amostras analisadas, variando entre 0,847 e 0,930 para a área do Grupo Itataia (Tabela 5) e entre 0,942 e 0,989 para a litologias separadas (Tabela 6).

Tabela 5 - Estatísticas das bandas e razões geradas com as bandas dos sensores OLI e MSI para o Grupo Itataia.

Bandas		
OLI	MSI	Correlação
2	2	0.902248
3	3	0.889383
4	4	0.879098
5	8	0.857667
5	8A	0.886496
6	11	0.930868
7	12	0.925698
Razões		
OLI	MSI	Correlação
2/6	2/11	0.772934
5/7	8/12	0.887867
5/7	8A/12	0.910655
6/7	11/12	0.847425

Fonte: Confeccionado pelo autor.

Tabela 6 - Estatísticas das bandas e razões geradas com as bandas dos sensores OLI e MSI para as litologias separadas.

Bandas		Unidades Litoestratigráficas			
OLI	MSI	Correlação			
		Fm. Alcantil	Fm. Laranjeiras	Fm. Barrigas	Fm. Serra do Céu
2	2	0.981310	0.959393	0.968720	0.957848
3	3	0.973618	0.942857	0.958594	0.946800
4	4	0.971753	0.945583	0.953814	0.956246
5	8	0.966947	0.949485	0.950504	0.950239
5	8A	0.975175	0.956474	0.961994	0.957545
6	11	0.989183	0.963552	0.979980	0.971295
7	12	0.987002	0.965776	0.975736	0.967708

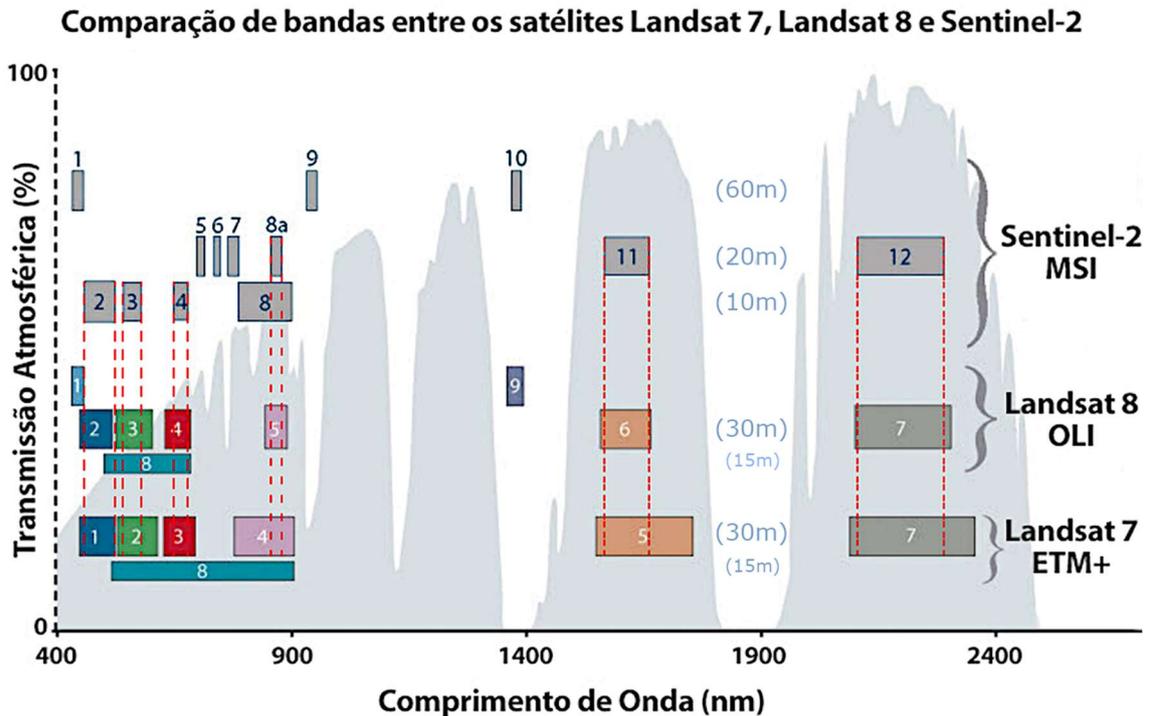
Razões		Unidades Litoestratigráficas			
OLI	MSI	Correlação			
		Fm. Alcantil	Fm. Laranjeiras	Fm. Barrigas	Fm. Serra do Céu
2/6	2/11	0.986226	0.926933	0.966015	0.918365
5/7	8/12	0.975172	0.880057	0.956651	0.917936
5/7	8A/12	0.982324	0.882924	0.968596	0.926085
6/7	11/12	0.996281	0.956141	0.991943	0.966210

Fonte: Confeccionado pelo autor.

Na porção do visível, a variação da correlação entre as bandas é mínima, com as bandas do azul apresentando correlação mais forte (0,981). A menor correlação das bandas do vermelho (0,889) e do verde (0,879), ainda que seja forte, pode ser explicada pelo fato de que estas respectivas bandas apresentam menores faixas espectrais na Sentinel-2, sendo mais restritivas. A menor diferença espectral entre os sensores está na faixa do azul (Figura 12).

A banda do NIR apresenta a menor correlação entre as bandas, ainda que seja forte. Foram analisadas tanto a banda 8 como 8A do sensor MSI em relação à banda 5 do OLI. A banda 8A apresenta melhor correlação com a 5 da Landsat 8, confirmando os resultados obtidos por Mandanici & Bitelli (2016), pois está contida no seu intervalo espectral. Já a banda 8 MSI apresenta um intervalo espectral maior que a banda 5 OLI, apresentando melhor correlação com a NIR dos sensores antigos dos satélites Landsat (TM e ETM+) (MANDANICI & BITELLI, 2016).

Figura 12 - Comparação de bandas entre os sensores ETM+, OLI e MSI.



Fonte: Modificado de USGS/NASA (2018).

Estatisticamente, a banda 8A do sensor MSI seria mais apropriada a ser utilizada de forma correlata a processamentos digitais de imagens que envolvam a banda 5 OLI. Porém, ela tem como desvantagem uma menor resolução espacial, com *pixel* com 20 m. Já a banda 8 MSI apresenta *pixel* com 10 m. Assim, para estudos mais regionais, a banda 8A poderia ser adotada. Já a banda 8 poderia ser aplicada para estudos em escala de maior detalhe, a depender dos objetivos do trabalho realizado. Conforme Shimabukuro & Ponzoni (2017), quanto menor a resolução espacial de um sensor, menores também as chances de encontrar *pixels* puros. Desta forma, imagens Sentinel-2 têm uma tendência a minimizar a mistura espectral, definindo melhor os alvos desejados.

As bandas do SWIR apresentam as correlações mais fortes entre os sensores, com 0,989 no SWIR 1 e 0,987 no SWIR 2. Isso se deve ao fato de que estas bandas MSI apresentam a menor variação de faixa espectral, em relação as bandas OLI, entre todas as bandas analisadas. Este fato confirma ainda mais a possibilidade de aplicação da Sentinel-2 para estudos geológicos, uma vez que este intervalo espectral é caracterizado por feições de absorção da radiação eletromagnética de muitos grupos minerais, e ainda com a vantagem de ter bandas com 20 m de resolução espacial em relação aos 30 m da Landsat-8, possibilitando a aplicação

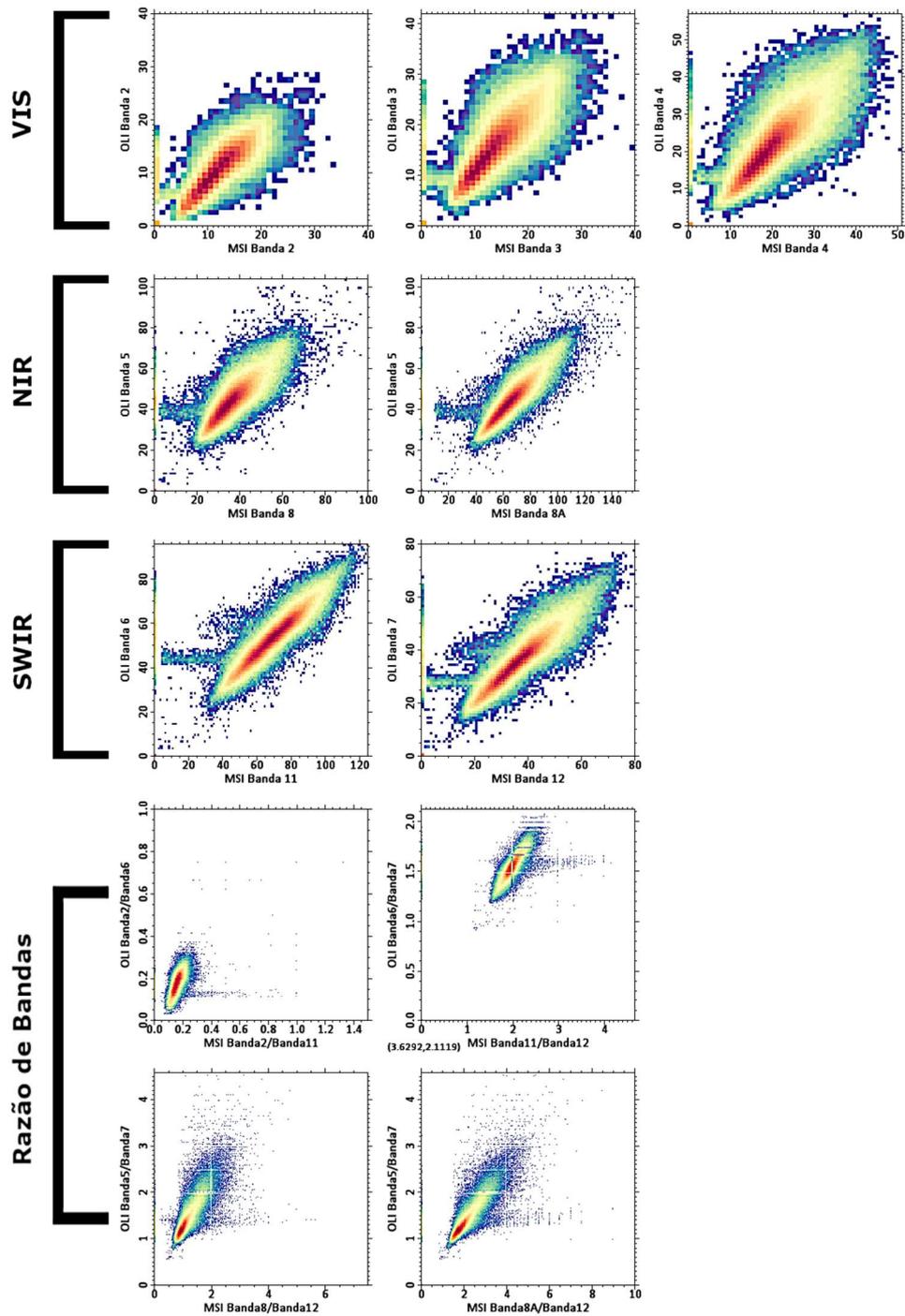
em trabalhos de mapeamento geológicos com escalas de maior detalhe, conforme citado anteriormente.

Todas as bandas de ambos os sensores (MSI e OLI) foram reamostradas para pixels com 10 m a fim de montar matrizes de tamanhos iguais para a comparação. As imagens do satélite Landsat-8 possuem um *pixel* de 30 m, onde mesmo fragmentando o *pixel* para 10 m, todos os que eram de 30 m foram quebrados em 9 *pixels* de 10 m com o mesmo valor de DN do *pixel* original. Por isso, quando são geradas composições coloridas RGBs ou mesmo imagens em *grayscale* (tons de cinza), não é possível visualizar na imagem essa diferença. Diferente da Sentinel-2 que tem o *pixel* de 10 m e cada *pixel* com um DN diferente. O mesmo ocorre nas bandas SWIR da Sentinel de 20 m que são reamostradas para 10 m. Por isso ocorre uma leve dispersão quando as estatísticas são analisadas. Não é o dado espectral em si e sim a resolução espacial o fator limitante da análise.

As razões de bandas apresentaram coeficientes ligeiramente mais baixos do que as bandas, entre 0,772 e 0,996, mesmo essa correlação sendo considerada forte. De acordo com Meneses & Almeida (2012), a razão de bandas é a operação aritmética usada para extrair informações de imagens de sensores multiespectrais. Ela se baseia em parâmetros dos aspectos físicos do sensor e no comportamento da reflectância dos alvos para discriminar sutis variações, como um tipo de litologia, solo ou vegetação. Por esses fatores os coeficientes obtidos nas razões foram relativamente baixos em relação com os obtidos entre as bandas, tendo em vista que a razão de bandas realça ou “amplifica” justamente as diferenças das bandas, também levando em consideração os tamanhos dos pixels como já citado anteriormente. Por exemplo, na comparação da razão de bandas entre Azul e SWIR1, respectivamente 2/6 (OLI) e 2/11(MSI), tem-se tamanhos de pixels diferentes (30 m nas bandas do OLI; e 10 e 20 m das bandas do MSI) que foram reamostradas para 10 m. Desta forma, uma menor diferença de resolução espacial original entre as bandas de uma operação de divisão implica, em geral, em uma maior correlação entre as razões de diferentes sensores.

A Figura 13 apresenta os *scatterplots* da comparação pixel a pixel entre bandas e razões dos sensores MSI e OLI. Nos eixos x e y temos a unidade como os níveis de cinza das bandas, variando entre 0 e 255 níveis de cinza. A observação dos *scatterplots* deixa claro o quão correspondente são as bandas de ambos os sensores. O leve espalhamento dos dados pode ser atribuído a diferenças de condições atmosféricas, pois as imagens foram coletadas com um intervalo de 4 dias, e às próprias especificidades dos sensores. Nos *scatterplots* das razões nota-se um maior espalhamento dos dados devido ao realce das diferenças de resolução espacial das bandas, além das especificidades dos sensores como já mencionado anteriormente.

Figura 13 - *Scatterplots* comparando as bandas dos sensores MSI e OLI e suas razões.

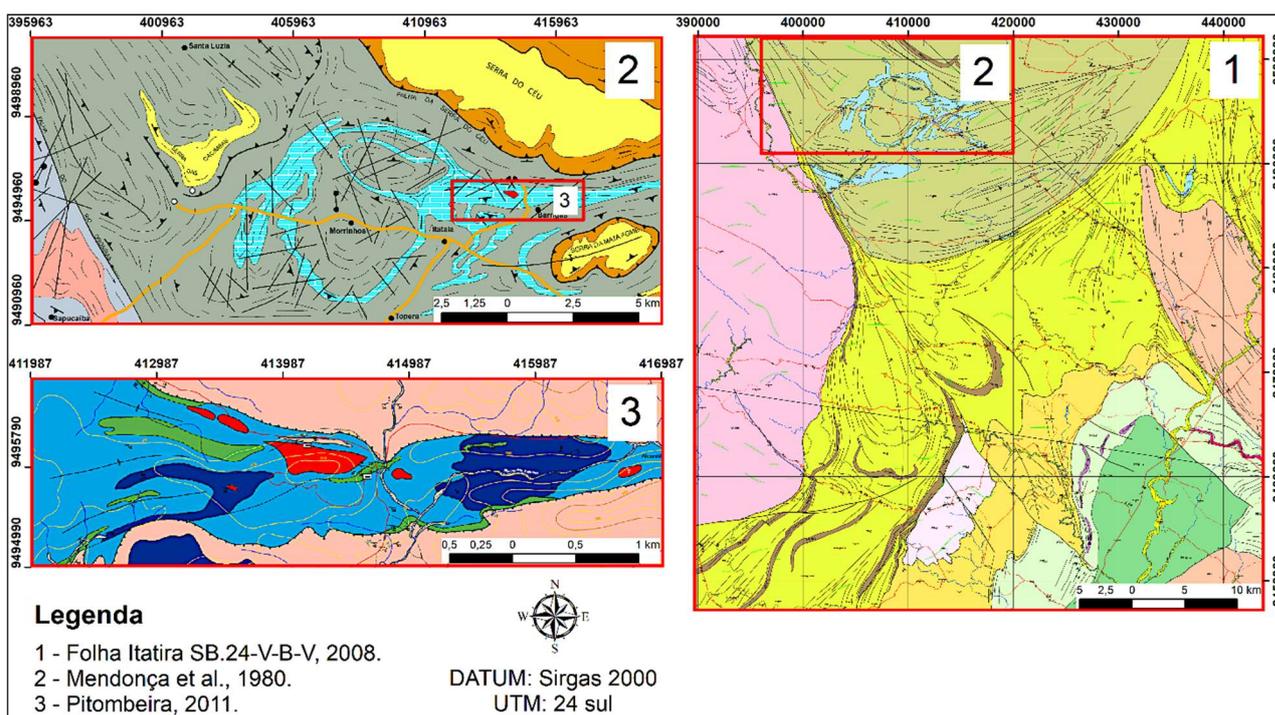


Fonte: Confeccionado pelo autor.

4.2 Processamento das imagens Sentinel-2A

Após confirmado o potencial das imagens Sentinel-2A/MSI para aplicação em mapeamento geológico por meio da comparação estatística com as imagens Landsat-8, foi realizado o PDI nas imagens Sentinel-2A a fim de realçar as litologias do Grupo Itataia utilizando com área para recorte das imagens o mapeamento de Mendonça *et al.* (1980). Os resultados foram comparados tanto com o mapeamento de Mendonça *et al.* (1980) quanto mapeamentos mais recentes como os realizados por Parente *et al.* (2008) e Pitombeira (2011). A Figura 14 apresenta a localização da área de Mendonça *et al.* (1980) em relação à Folha Itatira de Parente *et al.* (2008) e o mapeamento de detalhe do entorno da mineralização de Itataia de Pitombeira (2011) em relação a Mendonça *et al.* (1980).

Figura 14 - Localização da área de Mendonça *et al.* (1980) em relação à Folha Itatira de Parente *et al.* (2008) e o mapeamento de detalhe do entorno da mineralização de Itataia de Pitombeira (2011) em relação a Mendonça *et al.* (1980).



Fonte: Confeccionado pelo autor.

Com as imagens pré-processadas foram realizadas todas as combinações de razões de bandas possíveis entre as sete bandas selecionadas (2, 3, 4, 8, 8a, 11 e 12) do satélite Sentinel-2A. Então, foi calculado o *Optimum Index Factor* dessas razões (Tabela 7). Esse procedimento também foi realizado nas sete bandas geradas pela Análise de Componentes Independentes (ICA) (Tabela 8) e na transformação *Minimum Noise Fraction* (MNF) (Tabela 9). Como

resultado obteve-se o triplete de bandas 12/8, 2/11 e 4/3 com o maior *ranking* entre todas as razões, o triplete IC2, IC6 e IC7 na ICA e o com as bandas MNF 3, 4 e 7.

Tabela 7 - Ranking OIF das Razões do Sentinel-2A.

Ranking OIF das Razões do Sentinel-2A				
Razões				Ranking
1.	12/8	2/11	4/3	385475.44
2.	12/3	2/12	4/11	69521.90
3.	2/8a	2/12	4/2	54154.70
4.	2/3	2/4	8/4	14506.61
5.	12/4	2/4	8/2	14378.41
6.	12/3	2/11	8a/11	11166.63

Fonte: Confeccionado pelo autor.

Tabela 8 - Ranking OIF das Bandas ICs do Sentinel-2A.

Ranking OIF das Bandas ICs do Sentinel-2A				
<i>Independent Components</i>				Ranking
1.	IC2	IC6	IC7	15834238.07
2.	IC1	IC3	IC5	8230878.16
3.	IC2	IC4	IC6	2396877.78
4.	IC1	IC2	IC5	731442.37
5.	IC1	IC2	IC4	625695.57
6.	IC1	IC4	IC5	603479.99

Fonte: Confeccionado pelo autor.

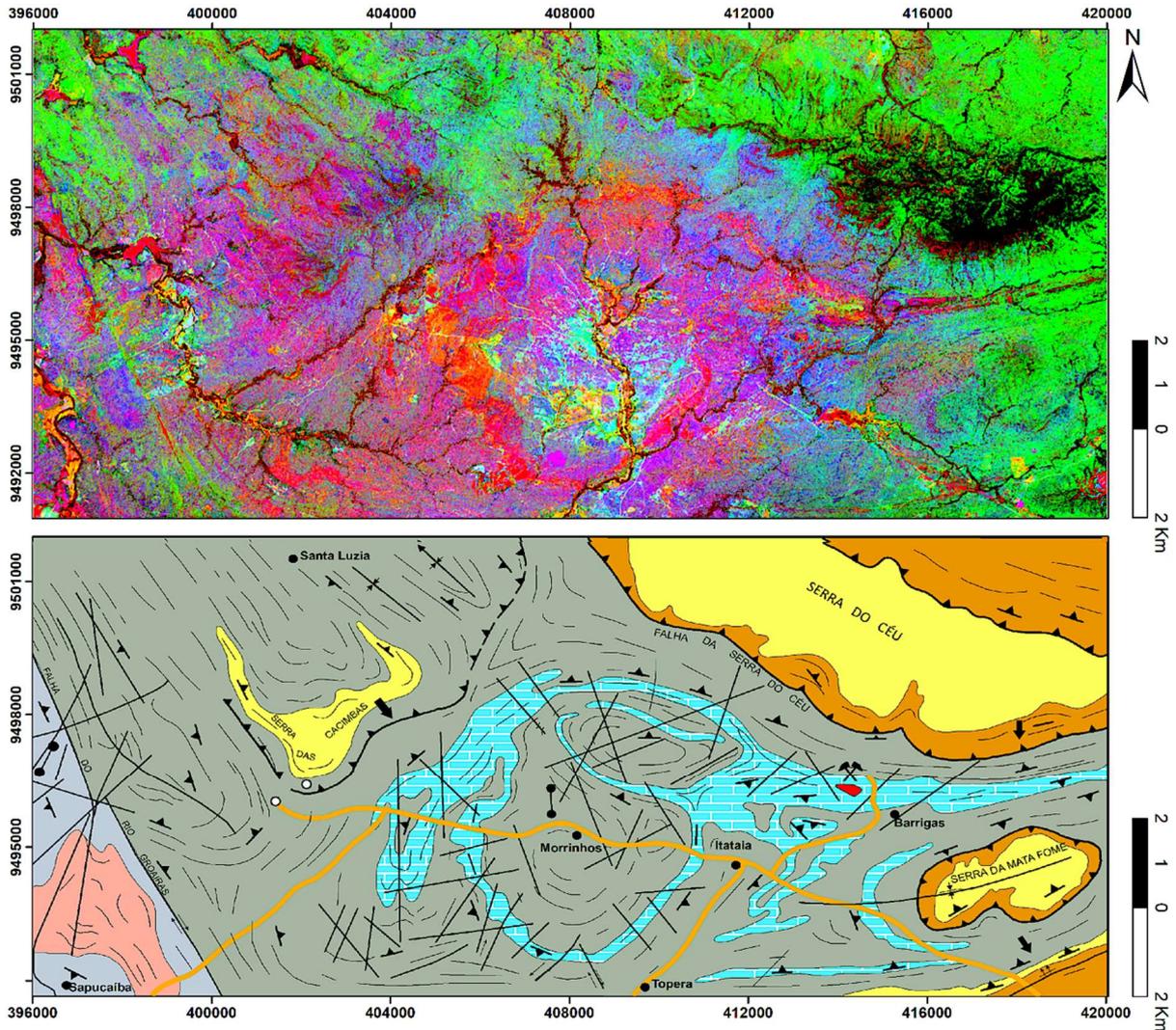
Tabela 9 - Ranking OIF das Bandas MNF do Sentinel-2A.

Ranking OIF das Bandas MNF do Sentinel-2A				
Bandas MNF				Ranking
1.	3	4	7	24170264.79
2.	1	3	6	2895137.79
3.	1	3	4	2396877.78
4.	3	4	6	1570352.26
5.	1	2	6	1020509.01
6.	4	5	7	883671.26

Fonte: Confeccionado pelo autor.

A Figura 15 apresenta a composição R (2/11) G (4/3) B (12/8) comparada com o mapeamento de Mendonça *et al.* (1980). Nessa imagem temos o mármore da Formação Alcantil bem marcado em vermelho e na porção SW da imagem onde podemos ver estruturas deformadas do mármore.

Figura 15 - Composição R (2/11) G (4/3) B (12/8) comparada com o mapeamento de Mendonça *et al.* (1980).

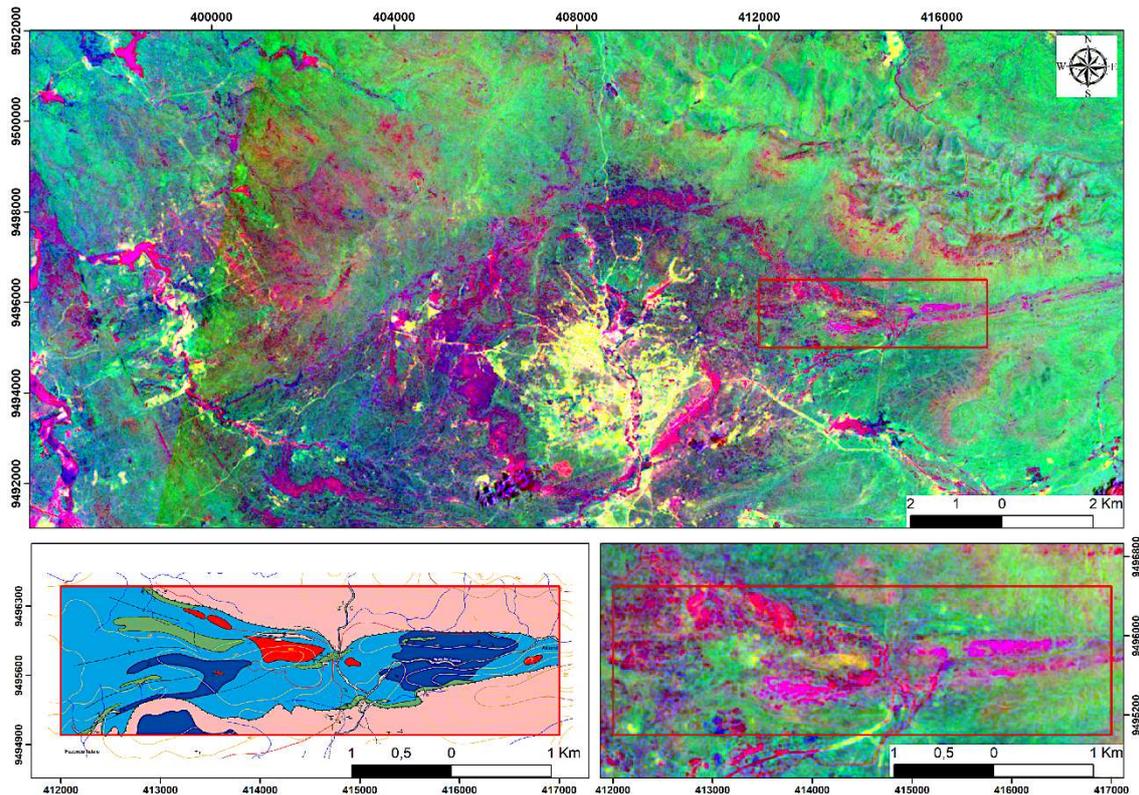


Fonte: Confeccionado pelo autor.

A Figura 16 apresenta a composição com as bandas MNF R (3) G (4) B (7), selecionada como o triplete de bandas com o maior *ranking* OIF entre as bandas MNF, comparada com o mapeamento de Pitombeira (2011). Devido à capacidade da transformação MNF de segregar ruído e armazenar nas últimas bandas, como a banda 7, foi realizada a filtragem passa baixa para amenizar o ruído e apresentar uma imagem mais suavizada. A composição realçou bem os mármore da Formação Alcantil em tons de magenta e

aproximando da região da jazida de Itataia, mapeada por Pitombeira (2011), temos o colofanito (principal minério de urânio da jazida) destacado em amarelo-dourado.

Figura 16 - Composição com as bandas MNFs R (3) G (4) B (7), selecionada como o triplete de bandas com o maior *ranking* OIF entre as bandas MNF, comparada com o mapeamento de Pitombeira (2011).

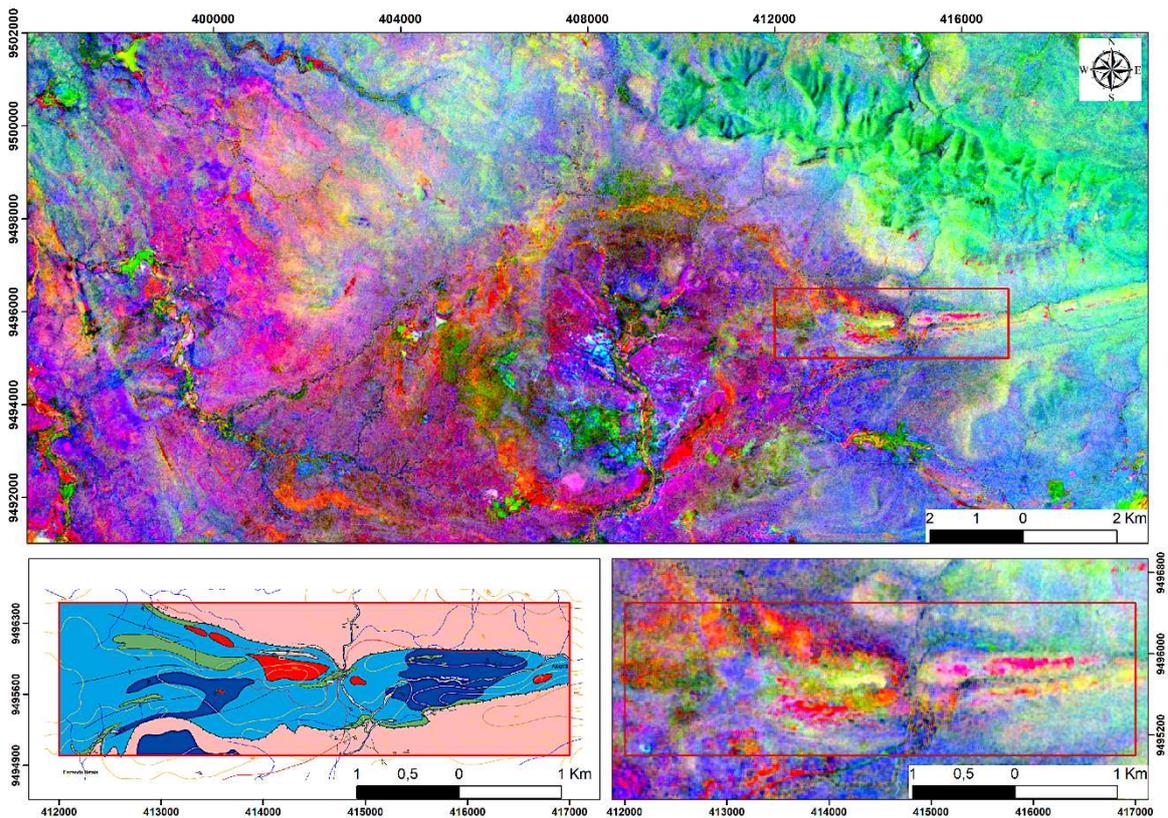


Fonte: Confeccionado pelo autor.

Existem algumas ressalvas sobre o OIF, ele gera um *ranking* com as melhores combinações RGB possíveis entre três bandas baseado no total de variância e correlação entre as bandas. Com as bandas IC ele apresentou os tripletes [IC2, IC6 e IC7] e [IC1, IC3 e IC5] com os maiores no *ranking*. Quando essas bandas IC foram alocadas nos canais RGB para gerar uma composição colorida, não se obteve imagens com boa qualidade devido a presença de ruído nas bandas IC7, IC6 e IC5. A composição escolhida foi a R (IC6) G (IC5) B (IC3) utilizando as três das bandas presentes nos dois tripletes com maior *ranking*. Devido a banda IC6 e IC5 portarem ainda um pouco de ruído, foi utilizado o filtro passa baixa para amenizar os ruídos e realçar as litologias. Desse modo, temos o OIF não como uma técnica que irá definir qual composição usar e sim um guia/sugestão para o analista selecionar as melhores composições que irão representar as características da área de estudo.

A Figura 17 apresenta a composição R (IC6) G (IC5) B (IC3) comparada com o mapeamento de Pitombeira (2011). Os mármores da Formação Alcantil estão bem marcados em vermelho e temos como ênfase na região mapeada por Pitombeira (2011) em tons de amarelo o colofanito (mineralização fosforo-urinífera) principal minério da Jazida de Itataia.

Figura 17 - composição R (IC6) G (IC5) B (IC3) comparada com o mapeamento de Pitombeira (2011).



Fonte: Confeccionado pelo autor.

A Análise por Principais Componentes (APC) foi realizada nas sete bandas (2, 3, 4, 8, 8a, 11 e 12) do sensor MSI do satélite Sentinel-2A. A Tabela 10 mostra os autovetores e autovalores da APC com as bandas do sensor MSI.

Tabela 10 - Autovetores e autovalores da APC com as bandas do sensor MSI.

PCs	Autovetor							Autovalor
	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 8	Banda 8a	Banda 11	Banda 12	(%)
PC 1	0,918008	0,047476	-0,376663	-0,055002	0,072701	0,059649	-0,035561	86,25
PC 2	0,088978	-0,938184	-0,305794	-0,084925	0,008820	0,071403	-0,077427	10,22
PC 3	-0,331041	0,270273	-0,801741	0,393103	0,050493	0,043372	-0,124965	2,46
PC 4	-0,053011	0,086660	-0,277307	-0,441223	-0,685672	-0,393227	0,305498	0,52
PC 5	0,101992	-0,135415	0,073194	0,392304	0,185205	-0,881374	0,029650	0,31
PC 6	0,161100	0,106093	0,196789	0,638225	-0,681360	0,196167	0,118322	0,21
PC 7	-0,024318	0,086059	0,029061	-0,281640	-0,152931	-0,139759	0,932157	0,03

Fonte: Confeccionado pelo autor.

Baseando-se na análise dos autovetores da Tabela 10, as bandas escolhidas para composição foram as PCs 7, 5 e 1. A PC 7 possui alta correspondência com a bandas 12 e PC 5 com a banda 11, essas bandas são de grande importância para pesquisa mineral e mapeamento geológico pois muitos grupos minerais apresentam picos de reflectância no infravermelho de ondas curtas que está representado no sensor MSI pelas bandas 11 e 12. A PC 1 é a componente principal que apresenta maior autovalor (86,25%), ou seja, ela contém uma maior quantidade de informação apresentando uma melhor qualidade de visualização do dado. Ela foi escolhida justamente para contrabalancear as duas bandas PC (PC5 e PC7) que estão carregadas de ruído. As últimas bandas PC são aquelas que apresentam uma maior quantidade de ruído justamente por apresentarem a informação que é menos correlacionada com o dado. Normalmente essas bandas são descartadas na análise, mas em aplicação geológica, são justamente essas últimas bandas que podem conter a informação espectral de grupos minerais (CRÓSTA, 1992).

As primeiras bandas concentram uma maior quantidade de informação do dado e basicamente sem ruído, oferecendo, muitas vezes, imagens com uma melhor qualidade. As bandas PC 1, 2, 3 e 4, foram selecionadas para produção de composições RGB a fim de destacar uma maior quantidade de informação na área de estudo. A Tabela 11 apresenta todas as composições coloridas selecionadas a partir da Análise por Principais Componentes.

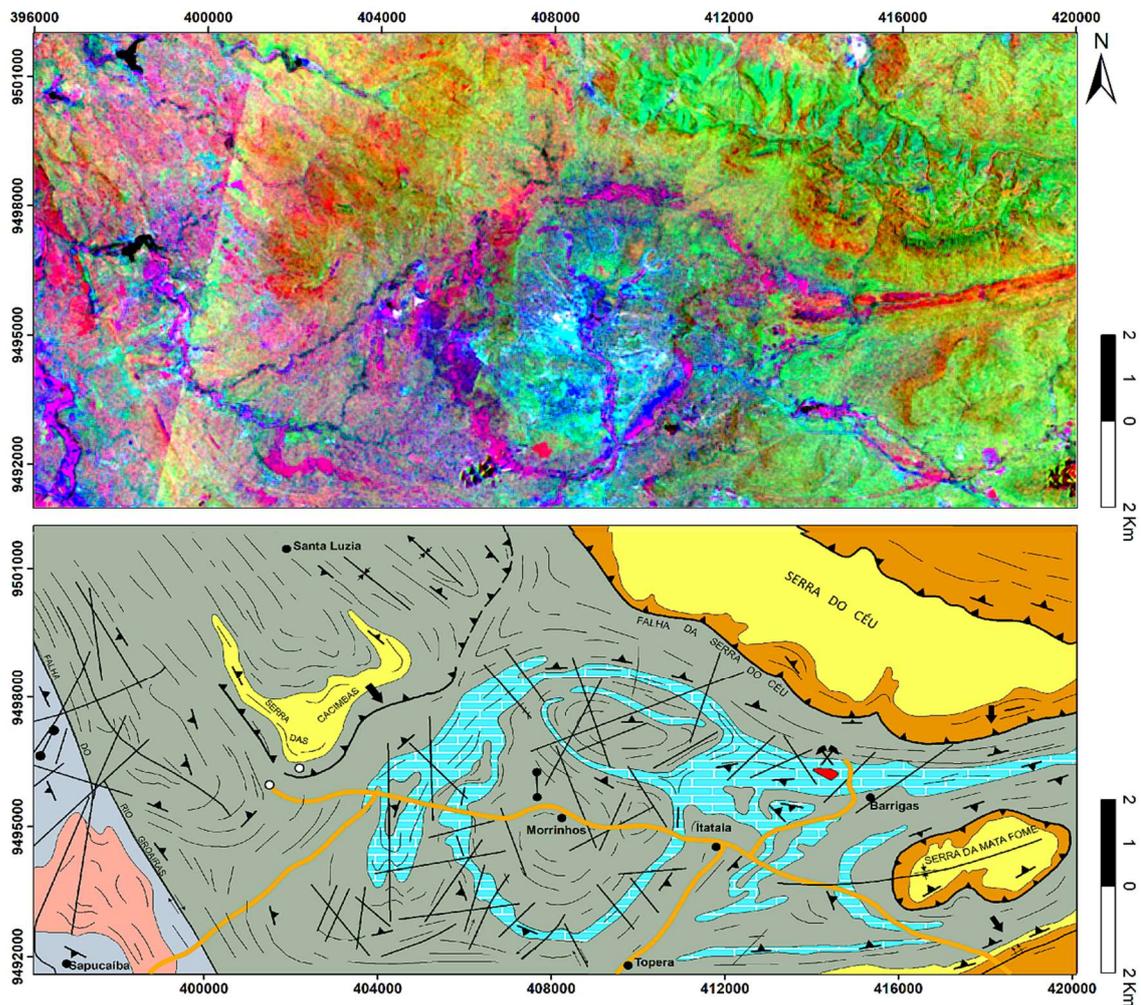
Tabela 11 - Composições coloridas selecionadas a partir da Análise por Principais Componentes.

	R	G	B	Figura
PCs	7	5	1	17
PCs	1	2	3	18
PCs	2	3	4	19

Fonte: Confeccionado pelo autor.

A Figura 18 apresenta a composição R (PC7) G (PC5) B (PC1) comparada com o mapeamento de Mendonça *et al.* (1980) (Figura 6). Nela foi utilizado o filtro passa baixa para diminuir o aspecto “ruidoso” da imagem e realçar as litologias da região. Nota-se uma mudança na tonalidade na porção oeste da área, isso se deve ao ruído na imagem do sensor MSI que foi isolado na banda 7, as demais composições com bandas PCs (Figuras 18 e 19) não apresentam esse problema. Nessa composição temos os mármorem da Formação Alcantil bem marcados em tons de vermelho e magenta. A Formação Serra do Céu ficou destacada em tons de laranja.

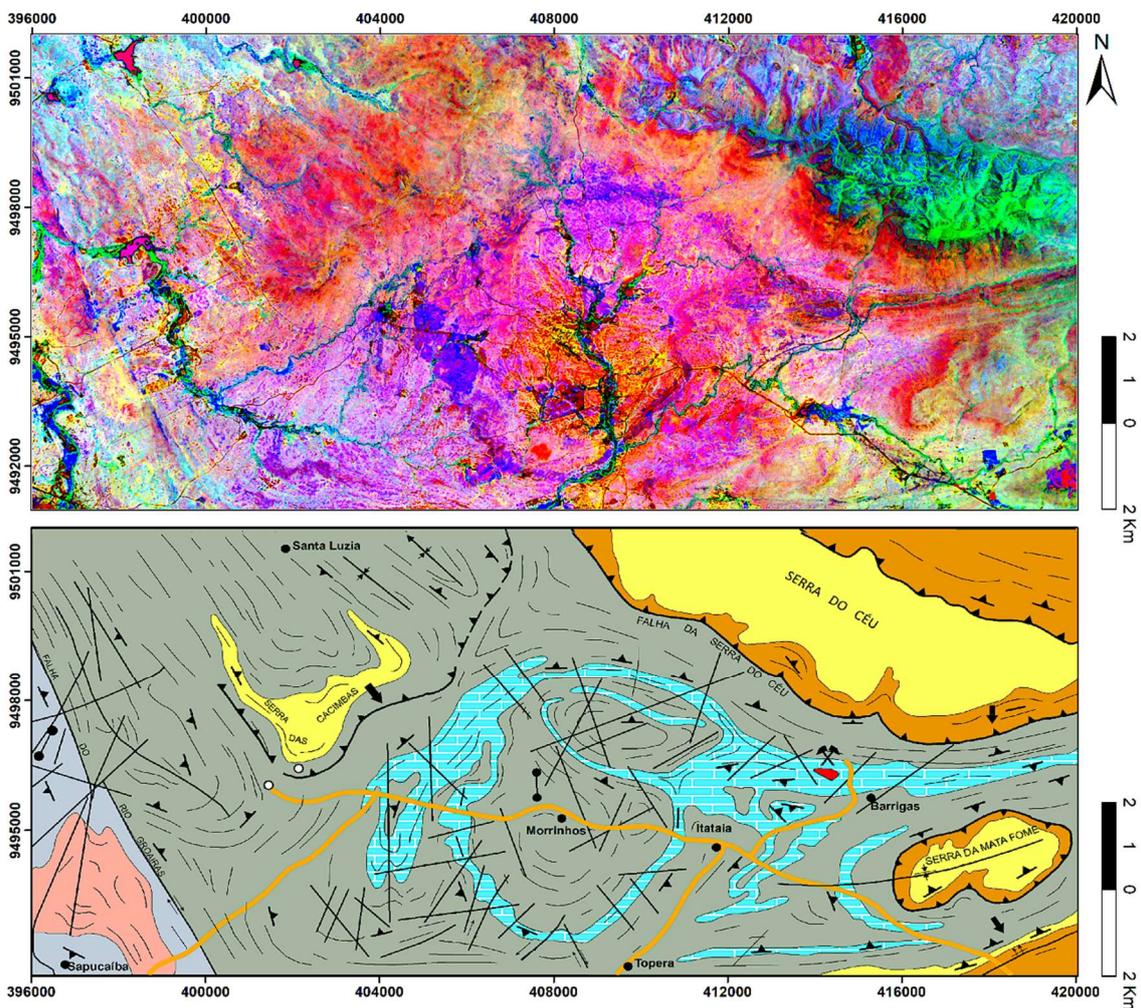
Figura 18 - composição R (PC7) G (PC5) B (PC1) comparada com o mapeamento de Mendonça *et al.* (1980).



Fonte: Confeccionado pelo autor.

A Figura 19 apresenta a composição R (PC2) G (PC3) B (PC4) comparada com o mapeamento de Mendonça *et al.* (1980). Nessa imagem destacam-se os quartzitos da Formação Laranjeiras em azul sendo separados da cobertura vegetal em verde. A Formação Serra do Céu apresenta-se em tons de laranja assim como na composição R (PC7) G (PC5) B (PC1). Os mármores da Formação Alcantil estão com a coloração roxa com destaque para a porção SW da imagem onde podemos ver estruturas deformadas do mármore o que é bem comum na região.

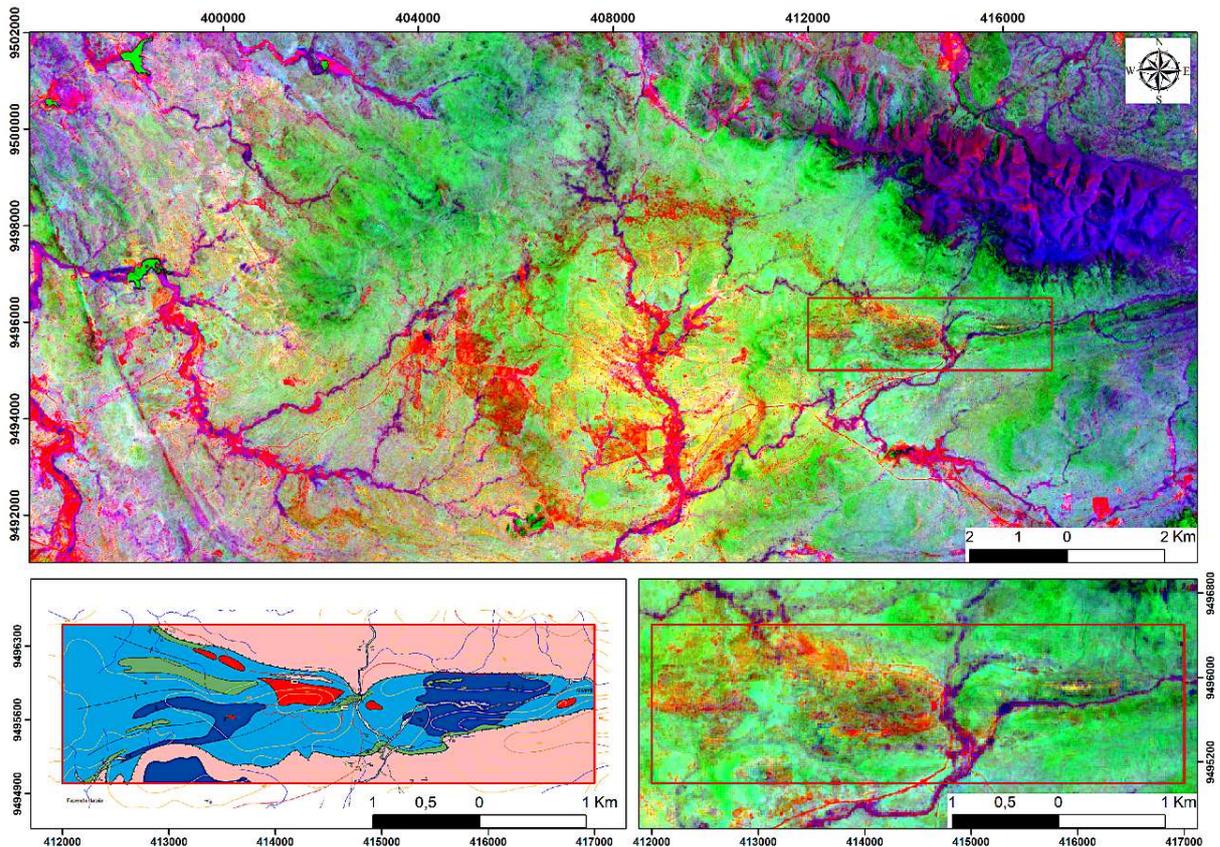
Figura 19 - composição R (PC2) G (PC3) B (PC4) comparada com o mapeamento de Mendonça *et al.* (1980).



Fonte: Confeccionado pelo autor.

A Figura 20 apresenta a composição R (PC1) G (PC2) B (PC3) comparada com o mapeamento de Pitombeira (2011). Nessa imagem os mármores da Formação Alcantil em vermelho e nota-se um pequeno corpo alongado de orientação E-W com coloração amarelada à direita da jazida Itataia, possivelmente trata-se das rochas calciossilicáticas mapeadas por Pitombeira (2011).

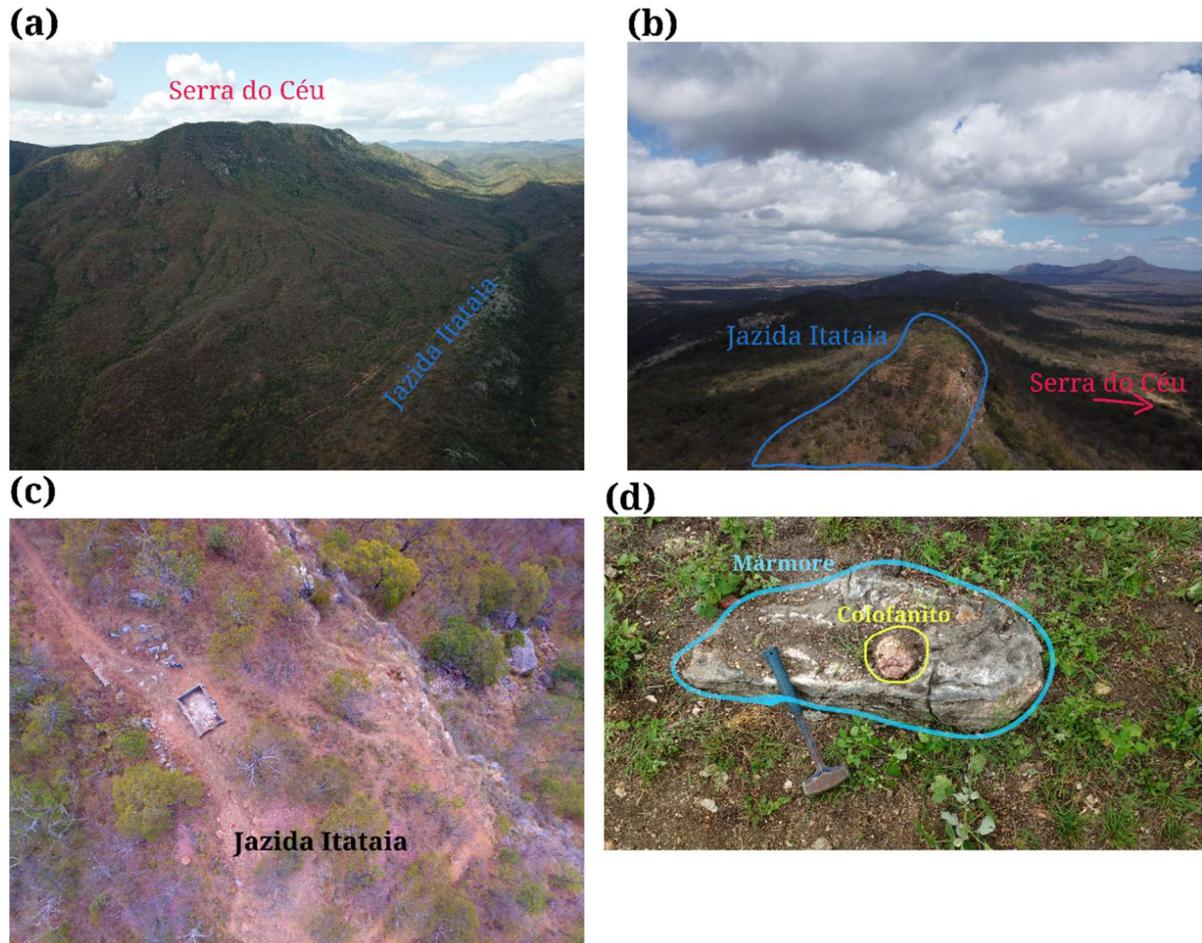
Figura 20 - composição R (PC1) G (PC2) B (PC3) comparada com o mapeamento de Pitombeira (2011).



Fonte: Confeccionado pelo autor.

A confirmação dessas imagens foi feita, além dos mapeamentos realizados pelos autores citados, com levantamento de campo em julho de 2018 onde foi realizado um reconhecimento da Jazida Itataia com levantamento por meio da RPAS (*Remotely Piloted Aircraft Systems*) Phantom 4 Pro. A Figura 21 apresenta imagens da Jazida de Itataia mostrando o local da exposição do colofanito. As composições coloridas com as bandas ICAs R (6) G (5) B (3) (Figura 16) e bandas MNFs R (3) G (4) B (7) (Figura 15) destacam essa área exposta em tons de amarelo e dourado, respectivamente.

Figura 21: (a) Imagem expõe a mineralização Itataia em relação a Serra do Céu. (b) e (c) Área aflorante do colofanito da Jazida Itataia. (d) Colofanito (minério da Jazida Itataia) e sua rocha hospedeira: mármore da Formação Alcantil.



Fonte: Confeccionado pelo autor.

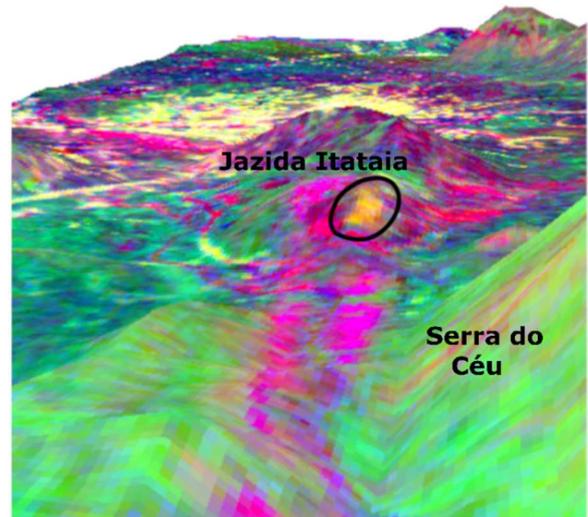
A Figura 22(b) apresenta a composição colorida MNFs R (3) G (4) B (7) integrada com imagens Alos/Palsar (Modelo Digital de Elevação – MDE) afim de demonstrar a disposição dos litotipos realçados com a técnica MNF em relação ao relevo da região. A Figura 22(a) apresenta uma foto aérea apresentando a área da Jazida Itataia com o colofanito exposto, em comparação com a Figura 21(b) fica evidente que a região com o colofanito exposto da Jazida Itataia está realçada em amarelo-dourado na composição MNF.

Figura 22 - (a) apresenta uma foto aérea apresentando a área da Jazida Itataia com o colofanito exposto; (b) apresenta a composição colorida MNF R (3) G (4) B (7) integrada com imagens Alos/Palsar (MDE).

(a)



(b)

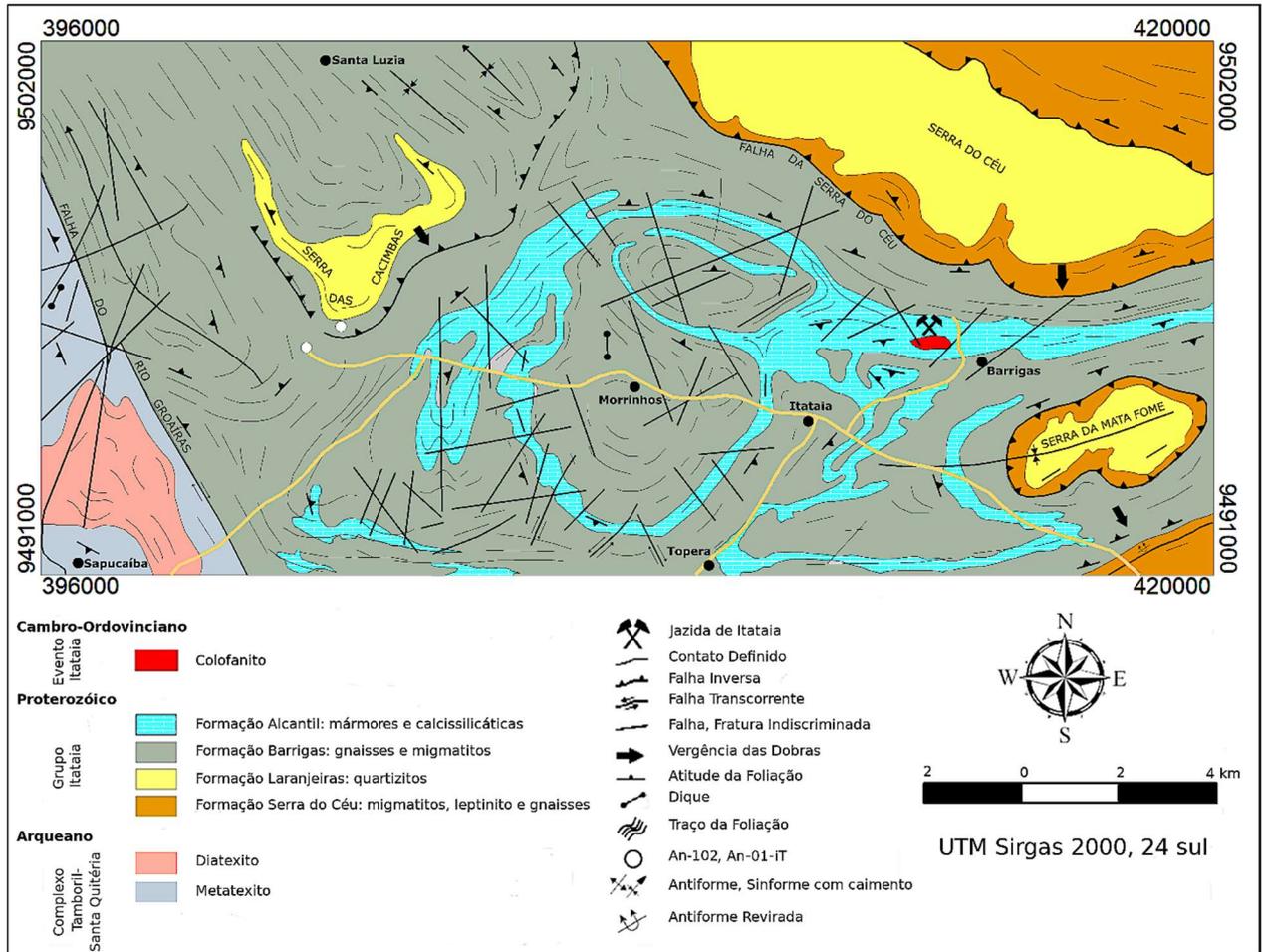


Fonte: Confeccionado pelo autor.

4.3 Cartografia proposta

Com base nas imagens Sentinel-2A processadas no item 4.2 e nos mapeamentos da Parente *et al.*, 2008 (Folha Itatira) e Mendonça *et al.* (1980), foi gerado um mapa como resultado final desta dissertação (Figura 23).

Figura 23 - Mapa da região de Itatãia modificado de Mendonça *et al.* (1980) a partir da interpretação das imagens do sensor MSI/Sentinel-2A.



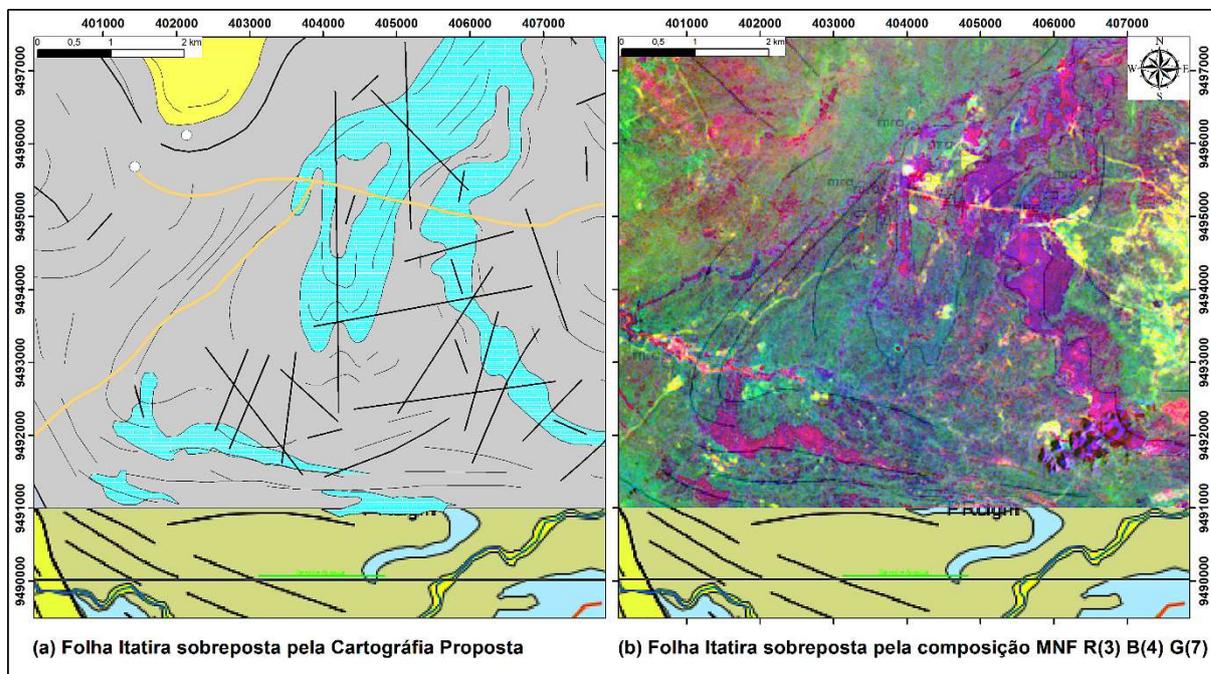
Fonte: Confeccionado pelo autor.

Para delimitação da Formação Alcantil e do colofanito, foi usada a imagem MNF R (3) G (4) B (7) obtidas pelo OIF. E a composição colorida R (PC2) G (PC3) B (PC4) foi utilizada para delimitação dos limites entre a Formação Serra do Céu e Laranjeiras na região da Serra do Céu.

A partir das da análise da imagem MNF R (3) G (4) B (7) foi possível não só confirmar os limites entre a Formação Alcantil e Formação Barrigas como também delimitar novas ocorrências dos mármore da Formação Alcantil na porção sudoeste da área, à direita do Complexo Tamboril-Santa Quitéria. Fora do mapeamento Mendonça *et al.* (1980), existe uma

ocorrência de mármore mapeados na Folha Itatira, como mostra a Figura 24.

Figura 24 – Folha Itatira sobreposta pela Cartografia Proposta (a) e composição MNF R(3) B(4) G(7)(b).



Fonte: Confeccionado pelo autor.

Na Figura 24(b), apresenta a composição MNF R (3) B(4) G(7), onde temos porções na imagem com a mesma resposta espectral de áreas onde o mármore foi mapeado, tanto em Mendonça *et al.* (1980) quanto por Parente *et al.*, 2008 (Folha Itatira). O formato do corpo de mármore na Folha Itatira, a disposição dos alvos com mesma reflectância dos mármore em ambos mapeamentos. Permitem a proposta de que essas áreas destacadas sejam mármore da Formação Alcantil não mapeados.

Os mármore da Formação Alcantil são a litologia hospedeira do colofanito (mineralização fósforo-uranífera de Itataia). O colofanito destacado na região da jazida de Itataia pela composição MNF R (3) B(4) G(7) estava exposto, mas como apresentado no mapeamento de Pitombeira (2011) existem pequenas ocorrências do colofanito ao redor na jazida. Essas pequenas ocorrências não foram realçadas ou devido a presença de cobertura vegetal ou tamanho do corpo de colofanito não ser expressivo o suficiente a ponto de compatível com a resolução espacial do Sentinel-2A.

Com o seu realce da litologia hospedeira da mineralização Itataia por meio de imagens de satélite e a possibilidade de pequenas ocorrências nesses alvos, justifica trabalhos de campo nessa região em futuras campanhas prospectivas.

5 CONCLUSÃO

As imagens Sentinel-2 analisadas nesse trabalho apresentaram forte correlação com as imagens do Landsat-8, com coeficientes de Pearson variando entre 0,857 e 0,930. As razões de bandas apresentaram um coeficiente menor, variando entre 0,772 e 0,910, devendo-se ao fato de que a razão de bandas é uma técnica que realça as diferenças das bandas utilizadas. Os coeficientes mais altos se deram justamente nas bandas e razões entre bandas utilizando o SWIR, as bandas 6 (OLI) e 11 (MSI) com uma correlação de 0,930, e as bandas 7 (OLI) e 12 (MSI) com 0,925. A correlação entre as bandas de ambos os sensores fica mais forte quando o recorte da área é limitado pelos contatos das litologias da região. Apresentando valores acima de 0,880 e máximo de 0,996 para a correlação entre a razão de bandas 6/7 (OLI) e 11/12 (MSI). Essa forte correlação com as bandas do SWIR de ambos os sensores, isso pode ser explicado pelo fato da largura de faixa espectral dessas bandas dos sensores MSI e OLI possuir maior similaridade em relação as demais bandas dos sensores.

A partir dos resultados com o coeficiente de Pearson, em especial os obtidos da comparação entre as bandas do SWIR dos sensores MSI e OLI que apresentaram os maiores valores, fica claro que as imagens Sentinel-2A apresentam empregabilidade para fins de mapeamento geológico. Também, vale ressaltar a melhor resolução espacial do Sentinel-2A em relação às imagens Landsat-8, o que permite o uso em trabalhos de campo em áreas que necessitem uma escala de maior detalhe.

Ao passar pelo processamento digital de imagens (PDI) as imagens Sentinel-2A apresentaram excelentes resultados na aplicação em mapeamento geológico e prospecção mineral, sobretudo devido a sua alta resolução espacial que permite delimitar corpos menores na superfície. As técnicas *Independent Component Analysis* e *Minimum Noise Fraction* mostraram-se eficientes quando utilizadas nas imagens Sentinel-2A, onde destacaram o principal minério da Jazida de Itataia (colofanito) além de sua litologia hospedeira, os mármores da Formação Alcantil.

Em suma, pôde-se atestar a viabilidade da aplicação das bandas do sensor MSI em abordagens geológicas, pois suas bandas e razões entre bandas apresentação altas correlações com as suas correspondentes do satélite Landsat-8, cujos produtos já possuem farta literatura neste contexto. O diferencial da melhor resolução espacial das imagens Sentinel-2, aliada a eficientes técnicas de processamento digital de imagens, proporciona o emprego desses dados em trabalhos de mapeamento em escala de maior detalhe auxiliando a delimitação do contato entre litologias.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B. B.; FUCK, Reinhardt Fuck. Províncias estruturais brasileiras. *In: VIII SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, 1977, Campina Grande, Atas...*, Campina Grande. p. 363-391. 1977.
- AL-NAHMI, F.; SADDIQI, O.; HILALI, A.; RHINANE, H.; BAIDDER, L.; KHANBARI, K. Application of remote sensing in geological mapping, case study Al Maghrabah area–Hajjah region, Yemen. **Isprs Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 4, p. 63-71, out. 2017.
- AMARAL, W.S. **Caracterização estrutural, geoquímica, geocronológica e aerogeofísica das sequências de rochas máfica e ultramáfica da região de Novo Oriente-CE, Domínio Ceará Central, NE do Brasil**. Projeto Universal CNPq, Fortaleza. 2011.
- ANGEIRAS, A.G.; NETTO, A.M. **Mineralização Fósforo-Uranífera no Escudo Cearense**. Relatório de Viagem. DEGE/DRM - NUCLEBRÁS. Rio de Janeiro. 1977.
- ANGEIRAS, A.G. Geology and metallogeny of the northeastern Brazil uraniumphosphorous province emphasizing the Itataia deposit. **Ore Geology Reviews**, v.3, p.211-225. 1988.
- ARTHAUD, M.H.; VASCONCELOS, A.M.; OLIVEIRA, F.V.C. As sequências metasedimentares do Ceará Central. *In: XL CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, Anais...* Belo Horizonte-MG. p. 16. 11-16 out. 1998. Disponível em: http://sbg.sitepessoal.com/anais_digitalizados/1998-BELO%20HORIZONTE/CBG1998.pdf Acesso em: 20 fev. 2018.
- BOARDMAN, J.W.; KRUSE, F.A. Automated spectral analysis: a geological example using AVIRIS data, north Grapevine Mountains, Nevada: in Proceedings, ERIM Tenth Thematic Conference on Geologic Remote Sensing. **Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, MI**. p. 1407-1418. 1994.
- BRITO NEVES, B.B. Tectonic history of the Borborema Provinve, NW Brazil. *In: CORDANI, U.G.; MILANI, E.J.; THOMAZ FILHO, A.; CAMPOS, D.A. Tectonic Evolution of South American*, Rio de Janeiro, p. 151-182. 2000.
- CABY, R.A.; ARTHAUD, M.H. Major Precambrian nappes of the Brazilian belt, Ceará, northeast Brazil. **Geology**, v. 14; p. 871 e 874. 1986.
- CASTRO, N.A. **Evolução Geológica Proterozóica da Região entre Madalena e Taparuaba, Domínio Tectônico Ceará Central (Província Borborema)**. 2004. Tese de Doutorado. Inst. Geociências, USP, São Paulo, 2004.
- CASTRO, G.L.; PARENTE, C. V.; VERÍSSIMO, C. U. V.; SIAL, A. N.; GARCIA, M. G. M.; SANTOS, R. V.; MELO, R. C. & SANTOS, A. A. Isótopos de carbono e oxigênio dos mármores associados com odepósito fósforo-uranífero de Itataia, Ceará. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v.32, n.2, p.199-208. 2005.
- CAVALCANTE, J.C.; VASCONCELOS, A.M.; MEDEIROS, M.F.; PAIVA, I.P.; GOMES,

F.E.M.; CAVALCANTE, S.N.; CAVALCANTE, J.E.; MELO, A.C.R.; DUARTE, V.C.; BENEVIDES, H.C. **Mapa Geológico do Estado do Ceara**. Fortaleza, 2003. Ministério das Minas e Energia/Companhia de Pesquisa de Recurso Minerais. Escala 1:500.000.

CAVALCANTI, J.A.D; BESSA, M.D.M.R. XI - **Depósito fósforo-uranífero de Itaitaia: um depósito paleocárstico hidrotermal de idade cretácea, relacionado com a abertura do oceano atlântico (síntese)**. In: ABRAM, M. B. *et al.* **Projeto Fosfato Brasil-parte II**. Série Insumos Minerais para Agricultura. Salvador: CPRM, 2016. n°17. Cap.11.

CAVALCANTI, J. A. D., BESSA, M. D. M., SANTOS, R. V., VERÍSSIMO, C. U., & PARENTE, C. V. A hydrothermal karst-hosted UP deposit related to Pangea break-up: Itaitaia deposit, Borborema Province, Northeastern Brazil—a review. **Journal of the Geological Survey of Brazil**. 2018. v. 2, n. 1, p. 43-60. 2018.

CHAVEZ, P.S.; BERLIN, G.L.; SOWERS, L.B. 1982. Statistical method for selecting Landsat MSS ratios. **Journal of Applied Photographic Engineering**. 1982, v. 8, n.1, p.23–30.

CHAVEZ, P.S.; GUPTILL, S.C.; BOWELL, J.A. Image processing techniques for ThematicMapper data. **Proceedings, ASPRS Technical Papers**, v. 2, p.728–742. 1984.

COMON, P. Independent component analysis—a new concept? **Signal Processing**. v. 36, p. 287–314. 1994.

CRÓSTA, A.P.; MOORE, J. M. Geological mapping using Landsat Thematic Mapper Imagery in Almeria Province, Se Spain. **International Journal of Remote Sensing**. V.10 n.3, p. 1147-1160, 1989.

CRÓSTA, A.P. **Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto**. 1. ed. Campinas, SP, Brasil: IG-UNICAMP, 1992. v. 1. 170 p.

CRÓSTA, A.P. Caracterização espectral de minerais de Interesse-prospecção mineral e sua utilização em processamento digital de imagens. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 7, 1993, Curitiba. **Artigo completo**, Curitiba, INPE, p. 202-209. 1993.

D'ODORICO, P.; GONSAMO, A.; DAMM, A.; SCHAEPMAN, M.E. Experimental evaluation of Sentinel-2 spectral response functions for NDVI time-series continuity. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**. v. 51, p. 1336–1348. 2013.

ESA. **European Spatial Agency**. 2018. Disponível em: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>. Acesso em: 22 mar. 2018.

FAVALI, J.C.; LEAL, J.R.L.V. Contribuição ao estudo das mineralizações fosfática e uranífera da jazida de Itaitaia., Ceará. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA,32., 1982, Salvador. **Anais...** Salvador: SBG, v.5, p.2022-2034. 1982.

FETTER, A. **U/Pb and Sm/Nd geochronological constraints on the crustal framework and geologic history of Ceará State, NW Borborema Province, NE Brazil: implications for the assembly of Gondwana**.1999. Tese de Doutorado. Departamento de Geologia,

Kansas University, Lawrence, KS, USA. 1999.

FETTER, A.H.; SANTOS, T.J.S.; VAN SCHMUS, W.R.; HACKSPACHER, P.C.; BRITO NEVES, B.B.; ARTHAUD, M.H.; NOGUEIRA, J.A.; WERNICK, E. Evidence for Neoproterozoic Continental Arc Magmatism in the Santa Quitéria Batholith of Ceará State, NW Borborema Province, NE Brazil: Implications for the Assembly of West Gondwana. **Gondwana Research**, v. 6, n. 2, p. 265-273. 2003.

GE, W.; CHENG, Q.; TANG, Y.; JING, L.; GAO, C. Lithological classification using sentinel-2A data in the Shibanjing ophiolite complex in inner Mongolia, China. **Remote Sensing**. v. 10, n. 4, p. 638. 2018.

GOETZ, A.F.H.; ROCK, B.N; ROWAN, L.C. Remote Sensing for Exploration: An Overview. **Economic Geology**. v. 78, n.4, p. 573 – 590. 1983.

GREEN, A.A.; BERMAN, M.; SWITZER, P.; CRAIG, M.D. A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**. v. 26, n. 1, p. 65-74. 1988.

GUPTA, R.P. **Remote sensing geology**.3. ed. Springer, 2018.

IBGE, INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **IBGE Cidades**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/cidadesat/xtras/perfil.php?codmun=231220&r=2>. Acesso em: 09 fev. 2017.

IBRAHIM, E.; BARNABÉ, P.; RAMANAIDOU, E.; PIRARD, E. Mapping mineral chemistry of a lateritic outcrop in New Caledonia through generalized regression using Sentinel-2 and field reflectance spectra. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**. v. 73, p. 653-665. 2018.

JUTTEN, C.; HERAULT, J. Blind separation of sources, part I: an adaptive algorithm based on neuromimetic architecture. **Signal Processing**. v. 24, p. 1–10. 1991.

HÉRAULT, J.; JUTTEN, C.; ANS, B. “Détection de grandeurs primitives dans un message composite par une architecture de calcul neuromimétique en apprentissage non supervisé”. **Actes du Xième colloque GRETSI**. Nice, France, v. 2, p. 1017–1022. mai 1985.

HENRIQUES, A.P.M.; NETO, A.D.D.; DO AMARAL, R.F. Utilização de análise de componentes independentes (ica) para o mapeamento de ambientes coralinos com base em imagens de sensores remotos orbitais. *In*: IX CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO/II CONGRESSO DO QUATERNÁRIO DE PAÍSES DE LÍNGUAS IBÉRICAS/II CONGRESSO SOBRE PLANEJAMENTO E GESTÃO DA ZONA COSTEIRA DOS PAÍSES DE EXPRESSÃO PORTUGUESA. 2003. Recife. **Associação Brasileira de Estudos do Quaternário**. São Paulo, 2003. Publicação em CD Rom.

HYVÄRINEN, A; OJA, E. Independent component analysis: algorithms and applications. **Neural networks**. v. 13, n. 4-5, p. 411-430. 2000.

INB. **Indústrias Nucleares do Brasil**. 2019. Disponível em: <http://www.inb.gov.br/pt->

br/Nossas-Atividades/Ur%C3%A2nio/Reservas. Acesso em: 09 jul. 2019.

KEGEL, W.; SCORZA, E.P.; COELHO, F.C.P. Estudos geológicos no Norte do Ceará. **DNPM/DGM**. Rio de Janeiro. Boletim 184. 46 p. 1958.

KUMAR, C.; SHETTY, A.; RAVAL, S.; SHARMA, R. & RAY, P.C. Lithological discrimination and mapping using ASTER SWIR Data in the Udaipur area of Rajasthan, India. **Procedia Earth and Planetary Science**. v. 11, p. 180-188. 2015.

LIU, W.T.H. **Aplicações de sensoriamento remoto**. Campo Grande, MS: Uniderp. 2007. 881 p.

MANDANICI, E.; BITELLI, G. Preliminary comparison of Sentinel-2 and Landsat 8 imagery for a combined use. **Remote Sensing**. v. 8, n. 12, p. 1014 -1025. 2016.

MARTINS, G. **Litogeoquímica e Controle Geocronológicos da Suíte Metamórfica Algodões-Choró**. 2000. Tese de Doutorado. Inst. De Geociências, UNICAMP, Campinas-SP, 2000.

MEDEIROS, V.C.D.; MEDEIROS, W.E.D.; SÁ, E.F.J.D. Utilização de imagens aerogamaespectrométricas, Landsat 7 ETM+ e aeromagnéticas no estudo do arcabouço crustal da porção central do domínio da zona transversal, província Borborema, NE do Brasil. **Revista Brasileira de Geofísica**. v. 29, n. 1, p. 83-97. 2011.

MENDONÇA, J.C.G.S.; BRAGA, A.P.G.; CAMPOS, M. Considerações sobre a mineralização fósforo-uranífera da jazida de Itataia-CE. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 31., 1980, Balneário Camboriú. **Anais...** Balneário de Camboriú: SBG, v.4, p.2472-2486. 1980.

MENDONÇA, J.C.G.S.; CAMPOS, M.; BRAGA, A.P.G.; SOUZA, E.M.; FAVALI, J.C.; LEAL, J.R.L.V. Jazida de Urânio de Itataia-CE. *In*: SCHOBENHAUS, C. (Coord.). **Principais Depósitos Mineraiis do Brasil, DNPM**. 1984. v.1, p.121-131.

MENDONÇA, J.C.G.S. *et al.* Jazida de Urânio de Itataia-CE. *In*: SCHOBENHAUS, C. (Coord.) **Principais depósitos mineraiis do Brasil: recursos mineraiis energéticos**. Convênio DNPM/Vale do Rio Doce/CPRM. Brasília: DNPM, 1985. v.1, p.121-131.

MENESES, P.R.; ALMEIDA, T. **Introdução ao processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto**. UNB -Universidade de Brasília. CNPQ –Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. Brasília, 2012. Disponível em: <http://www.cnpq.br/documents/10157/56b578c4-0fd5-4b9f-b82a-e9693e4f69d8>. Acesso em: 09 jun. 2017.

MIRANDA, M.P.; PONTES, M.P.; DE MORAIS, P.Â.S.; UCHOA, E.B.; DUARTE, C.R.; SOUTO, M.V.S. Emprego de Técnicas de Processamento Digital em Imagens Landsat 8 Para Mapeamento Geológico. **Revista de Geologia**. v. 29, n. 1, p. 71 - 80. 2016.

MIRANDA, M. P.; DUARTE, C. R.; GOMES, D. D. M.; SOUZA, C. D.; NETO, C. A. S. Análise Comparativa de Imagens Sentinel-2A (MSI) e Landsat-8(OLI) Aplicadas ao Mapeamento Geológico, Região de Itataia, Santa Quitéria, CE. **Anuário do Instituto de**

Geociências – UFRJ. v. 42, n. 2/2019, p. 366-377. 2019.

MORETO, F.A.L. **Análise de componentes independentes aplicada à separação de sinais de áudio.** 2008. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.

MUKAKA, M.M. A guide to appropriate use of correlation coefficient in medical research. **Malawi Medical Journal.** v. 24, n.3, p. 69-71. 2012.

NETTO, A.M.; MEYER, A.; CUNEY, M.; POUPEAU, G. A thermogeochronological study of the Itataia phosphoro-uraniferous deposit (Ceará, Brazil) by apatite fission track analysis: Genetic implications. 1991. *In:* PAGEL M., LEROY J. L. **Source, transport and deposition of metals.** Balkema, 1991. CRC Press, p. 409-411.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações.** – São Paulo: Blucher. 2008. 308 p.

NUCLEBRÁS. **Jazida de Itataia:** relatório de pesquisa mineral. Fortaleza: INB, 1984. p. 330.

OSAKO, L.S. **Estudo do potencial mineral do deposito urinifero de Lagoa Real, BA, com base em dados geológicos, aerogeofísicos e de sensoriamento remoto.** 1999. Dissertação de Mestrado. Pós-Graduação em Geociências. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 1999.

PARENTE, C. V., ALMEIDA, A. R. D., & ARTHAUD, M. H. (2008). **Geologia da folha Itatira SB. 24-VBV.** Escala 1:100.000.

PITOMBEIRA, J. P. A. **Geologia da região de Itataia (Santa Quitéria –CE).** 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Curso de Geologia. Centro de Ciências. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2011.

QAID, A.M. & BASAVARAJAPPA, H.T. Application of optimum index factor technique to Landsat-7 data for geological mapping of north east of Hajjah, Yemen. **American-Eurasian Journal of Scientific Research.** v. 3, n. 1, p. 84-91. 2008.

ROWAN, L.C.; WETLAUFER, P.H.; GOETZ, A.F.H. & STEWART, J.H. Discrimination of rock types and detection of hydrothermally altered areas in south-central Nevada by the use of computer-enhanced ERTS images. **U.S.Geological Survey Professional.** paper 883, p. 35. 1976.

SANTOS, T.J.S.; FETTER, A.; HACKSPACHER, P.; VAN SCHUMS, W.; NOGUEIRA NETO, J. Structural and geochronological studies of the Médio Coreau Domain, NE Brazil: Constraints on Brasiliano/Pan-African tectonic evolution in the NW part of the Borborema Province. 2004. *In:* WEINBERG, R., TROUW, R., FUCHS, R. AND HACKSPACHER, P. **The 750-550 Ma Brasiliano Event of South America,** Journal of the Virtual Explorer, Electronic Edition. v. 17. 2004.

SHIMABUKURO, Y.E.; PONZONI, F.J. **Mistura espectral: modelo linear e aplicações.** São Paulo, Oficina de Textos, 2017.

TEIXEIRA, M.L.A. **Integração de Dados aerogeofísicos, Geológicos e Isotópicos do**

Limite Norte do Complexo Tamboril-Santa Quitéria-CE, Província Borborema. 2005. Dissertação de Mestrado. Inst. de Geociências. Universidade de Brasília, Brasília, 2005.

UCHÔA, E.B. **Uso de Sensoriamento Remoto (Lansat-5 TM e ASTER) para realçar depósitos de minerais carbonáticos em Independência/CE.** 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Curso de Geologia. Centro de Ciências. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2011.

UCHOA, E. B. **Integração de dados multifonte com base em lógica fuzzy na modelagem prospectiva do depósito de ferro de Quiterianópolis/CE.** 2016. Dissertação de Mestrado. Curso de Geologia. Centro de Ciências. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

USGS/NASA. **United States Geological Survey/National Aeronautics and Space Administration.** Disponível em: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/sentinel-2a-launches-our-compliments-our-complements/> Acesso em: 20 mar. 2018 e 19 out. 2018.

VAN DER MEER, F.D.; VAN DER WERFF, H.M.A. & VAN RUITENBEEK, F.J.A. Potential of ESA's Sentinel-2 for geological applications. **Remote sensing of environment.** v. 148, p. 124-133. 2014.

VAN DER WERFF, H. & VAN DER MEER, F. Sentinel-2 for mapping iron absorption feature parameters. **Remote sensing.** v. 7, n. 10, p. 12.635-12.653. 2015.

VAN DER WERFF, H.; VAN DER MEER, F. Sentinel-2A MSI and Landsat 8 OLI provide data continuity for geological remote sensing. **Remote sensing.** v. 8, n. 11, p. 883-889. 2016.

WEBER, E.; HASENACK, H.; FERREIRA, C.J.S. 2004. **Adaptação do modelo digital de elevação do SRTM para o sistema de referência oficial brasileiro e recorte por unidade da federação.** Porto Alegre, UFRGS Centro de Ecologia. ISBN 978-85-63843-02-9. Disponível em <http://www.ecologia.ufrgs.br/labgeo>. Acesso em: 20 julho. 2019

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. **Nuclear Power in the World Today.** 2019. Disponível em: <https://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-power-in-the-world-today.aspx>. Acesso em: 2 agost. 2019.