



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CENTRO DE CIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**

**MATEUS DE PAULA MIRANDA**

**EMPREGO DE SENSORIAMENTO REMOTO E GAMAESPECTOMETRIA NA  
AVALIAÇÃO DA MINERALIZAÇÃO FÓSFORO-URANÍFERA DE ITATAIA-CE**

**Fortaleza**

**2016**

Mateus de Paula Miranda

**EMPREGO DE SENSORIAMENTO REMOTO E GAMAESPECTOMETRIA NA  
AVALIAÇÃO DA MINERALIZAÇÃO FÓSFORO-URANÍFERA DE ITATAIA-CE**

Monografia submetida a coordenação do curso de Graduação em Geologia, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Geólogo.

Orientadora: Profa. Dra. Cynthia Romariz Duarte.

Coorientador: Prof. Dr. Michael Vandesteem Silva Solto.

FORTALEZA

2016

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)

---

M644e Miranda, Mateus de Paula.

Emprego de sensoriamento remoto e galviaespectrometria na avaliação da mineralização fósforo-uramfera de Itaitaia-CE / Mateus de Paula Miranda. – 2016.  
61 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Curso de Geologia, Fortaleza, 2016.

Orientação: Profa. Dra. Cynthia Romariz Duarte.

Coorientação: Prof. Dr. Michael Vandesteen Silva Solto..

1. Sensoriamento Remoto. 2. Aerogamaespectrometria. 3. Itaitaia. I. Título.

CDD 551

---

Mateus de Paula Miranda

EMPREGO DE SENSORIAMENTO REMOTO E GAMAESPECTOMETRIA NA  
AVALIAÇÃO DA MINERALIZAÇÃO FÓSFORO-URANÍFERA DE ITATAIA-CE

Monografia submetida a coordenação do curso  
de Graduação em Geologia, da Universidade  
Federal do Ceará, como requisito parcial à  
obtenção do título de Geólogo.

Aprovada em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

---

Profa. Dra. Cynthia Romariz Duarte (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Cristiano Magini  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Geol. MsC. Jackson Alves Martins  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

## AGRADECIMENTOS

Os primeiros agradecimentos deste trabalho serão destinados 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. Michael Vandesteem Silva Souto, que nunca mediram esforços para a concretização deste trabalho.

Ao Consórcio Santa Quitéria INB-Galvani pela concessão do projeto. A Galvani pelo apoio financeiro e a INB pelo suporte técnico.

À CPRM pela cessão dos dados gamaespectrométricos.

Agradeço ao Cecílio Aguiar e Rosa Maranhão pelos bons trabalhos de campo em Itataia realizados juntamente com a Profa. Cynthia. Agradeço a Karen Leopoldino pela ajuda no tratamento dos dados gamaespectrométricos. Ao Weber Pongitori pela ajuda na formatação deste TCC. Agradeço também ao João Paulo Araújo Pitombeira por ter enviado sua monografia e me fornecido informações valiosas sobre a região que estudei.

Agradeço aos meus nobres amigos membros do PARTIDO pela companhia nos bares e nas horas de descontração regadas a cerveja. Ao Saulo que me ajudou a beber quantidades industriais de café e pelo apoio durante meus surtos neuróticos.

Agradeço aos meus colegas do Laboratório de Geoprocessamento do Ceará – GEOCE, e aos meus colegas do curso pela companhia nessa louca viagem que é a Geologia.

“The only person you are destined to become  
is the person you decide to be”

-Ralph Waldo Emerson

## RESUMO

Este projeto teve como objetivo principal a caracterização da mineralização fósforo-uranífera de Itataia por meio da utilização de dados gamaespectrométricos e de sensoriamento remoto ótico. A província fósforo-uranífera de Itataia está localizada no município de Santa Quitéria-CE, porção central do Estado, englobada no Domínio Ceará Central. O minério do depósito é o colofanito que ocorre sob diferentes formas e associa-se preferencialmente a mármores e rochas cálcio silicáticas da Formação Alcantil. Os avanços nas técnicas e *softwares* para processamento, bem como a disponibilidade de dados tem ampliado ainda mais o emprego das técnicas de integração de dados multi-fonte na exploração mineral. Foram utilizadas bandas do sensor OLI/ Landsat 8, obtida no site da USGS e dados gamaespectrométricos do Projeto Aerogeofísico Norte do Ceará, cedidos pela CPRM. A partir do Processamento Digital de Imagens (PDI), foram geradas imagens em que se obteve o realce dos litologias presentes na área de estudo. A composição RGB 543 destacou bem o relevo e as estruturas da região, já a composição colorida com as aritméticas de bandas 2/6, 4-2 e 5/7 nos canais do vermelho, verde e azul, respectivamente, realçou bem as principais litologias da região, em especial os marmóres da Formação Alcantil. Os dados gamaespectrométricos foram reamostrados em malhas de 125 metros, gerando imagens para os canais do potássio, urânio, tório e contagem total. Também foram gerados mapas de razão e imagens ternárias (RGB e CMY) com os canais (K, U e Th). A anomalia associada à jazida de Itataia é marcante, caracterizada por valores elevados para os canais da contagem total, urânio e tório. Os resultados oriundos do PDI das imagens de satélite e do processamento dos dados gamaespectrométricos foram integrados em ambiente SIG (Sistema de Informações Geográficas) e permitiram a visualização tanto das unidades geológicas como do corpo encaixante da mineralização.

**Palavras-chave:** Sensoriamento Remoto, Aerogamaespectrometria, Itataia.

## ABSTRACT

This project aimed to characterize the phosphorus-uranium of Itatiaia mineralization using gamma ray spectrometric data and optical remote sensing images. The phosphorus-uranium province is located in the municipality of Santa Quitéria-CE, central of the Ceará state, included in the Central Ceará Domain. The ore deposit is colophanite that occurs in different forms and is primarily associated with silicate and calcium marbles from Alcantil formation. Advances in techniques and software for processing and data availability has increased further the use of multi-source data integration techniques in mineral exploration. The OLI / Landsat 8 bands obtained from the website of USGS. The gamma ray spectrometric data Aerogeophysical North Ceará project were provided by the CPRM. Images generated by digital processing (PDI), allowed the enhancement of lithologies present in the study area. The RGB 543 color composition appreciated the relief and structures in the region, since the colored composition with bands math  $2/6$ ,  $2/4$  and  $5/7$  in the red channel, green and blue, respectively, and showed the main lithologies the region, especially the marbles from Alcantil formation. The gamma ray spectrometric data were resampled to 125 meters, generating images for uranium, thorium and potassium channels, and total count. They were also generated due to ternary maps and images (RGB and CMY) with channels (K, U and Th). The anomaly associated with the deposit of Itatiaia is striking, characterized by high values for the channels of the total count, uranium and thorium. The results obtained in PDI satellite images and processing of gamma ray spectrometric data were integrated into a GIS (Geographic Information System) and allow us to view the geological units and the body of mineralization.

**Keywords:** Remote Sensing, Gamma ray spectrometry, Itatiaia.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de localização.....	16
Figura 2: Mapa Geomorfológico destacando as duas principais unidades morfológicas da região de Itataia. ....	19
Figura 3: Aspectos fisiográficos da área de estudo - (A ) Unidades morfológicas da área de estudo e adjacências: depressão sertaneja e planaltos residuais (Serra do Céu). (B) Caatinga hiperxerófila: vegetação predominante na área de estudo. (C) Açude de Itataia. Imagens capturas na primeira semana de novembro de 2015, representando a época seca da região....	20
Figura 4: Província Borborema: principais domínios tectônicos e zonas de cisalhamento.....	22
Figura 5: Mapa de localização e geológico da área de interesse do projeto.....	26
Figura 6: Mapa geológico da área de estudo. ....	27
<i>Figura 7: Localização da Área do projeto Aerogeofísico Norte do Ceará e Mapa das linhas de voo.....</i>	<i>29</i>
Figura 8: Histogramas das bandas do sensor ETM com indicação do valor digital que mede a quantidade de espalhamento atmosférico adicionada ao sinal .....	33
Figura 9: Espectro de raios gama obtido em levantamento aéreo mostrando os fotopicos diagnósticos e as posições das faixas de energia, correspondentes ao K, U e Th, usadas na gamaespectrometria .....	39
Figura 10: Composição R5G4B3 da área de estudo, destacando em vermelho a vegetação da área. ....	41
Figura 11: Composição R7G6B3I8 da área de estudo, destacando os mármores da Formação Alcantil em tons de azul. ....	42
Figura 12: (a) Razão das bandas 2/6 em pseudocor, destacando Fm. Alcantil; (b) Subtração entre as bandas 4-2 para óxidos, em pseudocor; (c) Razão das bandas 5/7 em pseudocor, destacando Fm. Laranjeiras. (d) RGB 2/6, 4-2, 5/7 respectivamente.....	44
Figura 13: Imagem gerada através da aplicação da técnica Crósta com a PC3- 2567, PC1 e PC4 – 2456 sobreposta a PC1 com as 6 bandas do Landsat 8. ....	46
Figura 14: Distribuição do potássio obtida por aerogamaespectrometria para a área de estudo .....	49
Figura 15: Distribuição do urânio obtida por aerogamaespectrometria para a área de estudo. ....	49
Figura 16: Distribuição do tório obtida por aerogamaespectrometria para a área de estudo. ..	50
Figura 17: Mapa da razão U/K, com valores de razão variando entre 0,28 e 17,05.....	51
Figura 18: Mapa da razão Th/K, com valores de razão variando entre 1,2 e 117,8. ....	51
Figura 19: Mapa da razão U/Th, com valores de razão variando entre 0,06 e 0,49.....	52
Figura 20: Mapa do fator F para a área de estudo. ....	53
Figura 21: Composição colorida C (K) M (Th) Y (U). ....	54
Figura 22: Composição colorida R (K) G (Th) B (U). ....	54
Figura 23: Linhas de voo do Projeto Norte Ceará que cortam a área de estudo. ....	57
Figura 24: Perfil da linha de voo L13860 do aerolevante Norte Ceará, referente ao canal do urânio. ....	57
Figura 25: Integração em ambiente SIG dos dados gamaespectrométricos referentes canais do urânio e tório e imagem em tons de cinza da razão entre as bandas 2/6 do sensor OLI. ....	58

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Principais reservas de urânio do Brasil.....	14
Tabela 2: Coordenadas UTM da área de estudo .....	16
Tabela 3: Esquema da estratigrafia da área de estudo. ....	25
Tabela 4: Características dos sensores embarcados no satélite Landsat-8. ....	29
Tabela 5: Estatística das bandas 2,3,4,5,6 e 7 do sensor OLI, cena 217/63. ....	40
Tabela 6: Matriz de auto vetores utilizando diferentes combinações de bandas do sensor OLI empregadas neste estudo. ....	45

## Sumário

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	14
1.1 Localização e Vias de Acesso .....	15
1.2 Objetivo geral .....	17
<b>2. GEOLOGIA REGIONAL</b> .....	21
2.1 Província Borborema .....	21
2.1.1 Domínio Ceará Central .....	23
2.1.1.1 Embasamento Arqueano .....	23
2.1.1.2 Terrenos Acrescionários do Paleoproterozóico .....	23
2.1.1.3 Cobertura Neoproterozóica .....	24
2.1.1.4 Arco Magmático Santa Quitéria .....	24
2.2 Mineralização Itataia .....	25
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	28
3.1 Materiais .....	28
3.1.1 Dados de Sensoriamento Remoto .....	28
3.1.2 Dados geofísicos do Projeto Norte Ceará .....	29
3.1.3 Softwares .....	31
3.1.4 Dados Geológicos .....	31
3.2 Metodologia empregada .....	31
3.2.1 Processamento Digital de Imagens (PDI) .....	31
3.2.2 Correção Atmosférica .....	32
3.2.3 Espaço RGB .....	33
3.2.4 Aritmética de Bandas .....	34
3.2.4.1 Divisão de Bandas .....	34
3.2.5 Análise por Principais Componentes (APC) .....	35
3.2.6 IHS .....	36
3.2.8 Gamaespectrometria .....	37
<b>4. PROCESSAMENTO E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS</b> .....	40
4.1 Processamento das imagens OLI .....	40
4.1.1 Composição colorida RGB das bandas 5, 4 e 3 .....	41
4.1.2 Composição RGBI das bandas 7, 6, 3 e 8 .....	42
4.1.3 Matemática das bandas 2/6, 4-2, 5/7 em RGB .....	43
4.1.4 Análise por Principais Componentes .....	45
4.2 Processamento dos Dados Gamaespectrometricos .....	47
4.2.1 Canal do Potássio .....	48
4.2.2 Canal do Urânio .....	48
4.2.3 Canal do Tório .....	48
4.2.4 Razões entre os três radioelementos (K, U e Th) .....	50
4.2.5 Fator F .....	52
4.2.6 Mapa Ternário .....	53
4.2.7 Interpretação das Imagens Gamaespectrométricas .....	55
4.3 Integração dos Dados de Sensoriamento Remoto e Gamaespectrometricos em SIG .....	56
<b>5. CONCLUSÃO</b> .....	59
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	60

## 1. INTRODUÇÃO

O urânio (U) é um dos mais importantes materiais energéticos. 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. Aproximadamente 17% da matriz energética global é gerada por 440 reatores nucleares distribuídos por 30 países e 8% da energia elétrica consumida no mundo é de origem nuclear (EIA 2009).

O Brasil possui, hoje, a 6ª maior reserva mundial de urânio com 309.370 toneladas de  $U_3O_8$ , 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), Amorinópolis (GO), Lagoa Real (BA), Quadrilátero Ferrífero (MG), Poços de Caldas (MG), Figueira (PR). (INB, 2011).

Tabela 1: Principais reservas de urânio do Brasil.

Ocorrência	Medidas e Indicadas			Inferidas	TOTAL
Depósito- Jazida	< 40US\$/kg U	< 80US\$/kg U	Sub-Total	< 80US\$/kg U	
Caldas (MG)		500t	500t	4.000t	4.500t
Lagoa Real/Caetité (BA)	24.200t	69.800t	94.000t	6.770t	100.770t
Santa Quitéria (CE)	42.000t	41.000t	83.000t	59.500t	142.500t
Outras				61.600t	61.600t
<b>TOTAL</b>	<b>66.200t</b>	<b>111.300t</b>	<b>177.500t</b>	<b>131.870t</b>	<b>309.370t</b>

Fonte: INB (2011).

Atualmente, dentre as jazidas brasileiras de urânio, destacam-se as de Lagoa Real (BA) e Itataia (CE). A jazida de Itataia é de natureza Fósforo-Uranífera, ocorrendo sob a forma de colofanitouranífero, constituindo-se num exemplo mundial único em áreas cambrianas, onde ocorre mineralização de urânio associada com fosfato, carbonato e matéria orgânica. A sequência metassedimentar de Itataia, de natureza transgressiva, tem na base migmatitos, sotopostos por quartzitos e gnaisses, capeados por mármore calcícticos e dolomíticos. Estes últimos contendo 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 integração 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.

A integração de dados multi-fonte é um dos mais poderosos recursos empregados em Geociências, permitindo uma avaliação de uso combinado, caracterizando assim áreas com maior potencial para exploração. Os avanços nas técnicas e *softwares* para processamento bem como a disponibilidade de dados tem ampliado ainda mais o emprego das técnicas de integração de dados multi-fonte na exploração mineral. Assim, os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) surgem como um conjunto de técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento da informação georreferenciada, as quais permitem o gerenciamento de dados espaciais com realização de análises complexas.

Levantamentos geofísicos e aerogeofísicos, tais como a gamaespectrometria sempre foram empregados como apoio ao mapeamento geológico regional e à prospecção de bens minerais, incluindo de urânio (AMARAL, 2007; RAMOS, 2010; FERREIRA, 1991). A gamaespectrometria é uma técnica geofísica que depende de muitas variáveis, entre elas o movimento das fontes aéreas de radiação na atmosfera baixa no caso de levantamentos aéreos, os efeitos do meio ambiente, contrastes das propriedades físicas e geométricas das fontes radioativas, tamanho e resolução dos detectores. Entretanto, com a introdução de gamaespectrômetros de alta resolução e a transformação de valores qualitativos de K, eU (urânio equivalente) e eTh (tório equivalente), para “semiquantitativos” (de contagem por segundo (cps) para % e ppm), acompanhados pelo avanço das técnicas de geoprocessamento em ambiente SIG e de sistemas de aquisição e de processamento digital de imagens óticas orbitais (satélites de recursos terrestre), permitem extrair informações valiosas dos dados gamaespectrométricos em relação às mineralizações investigadas.

### **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, a aproximadamente 210 km da capital Fortaleza, perfazendo um total de 340 km<sup>2</sup>. As coordenadas UTM estão listadas na tabela 2, abaixo:

Tabela 2: Coordenadas UTM da área de estudo

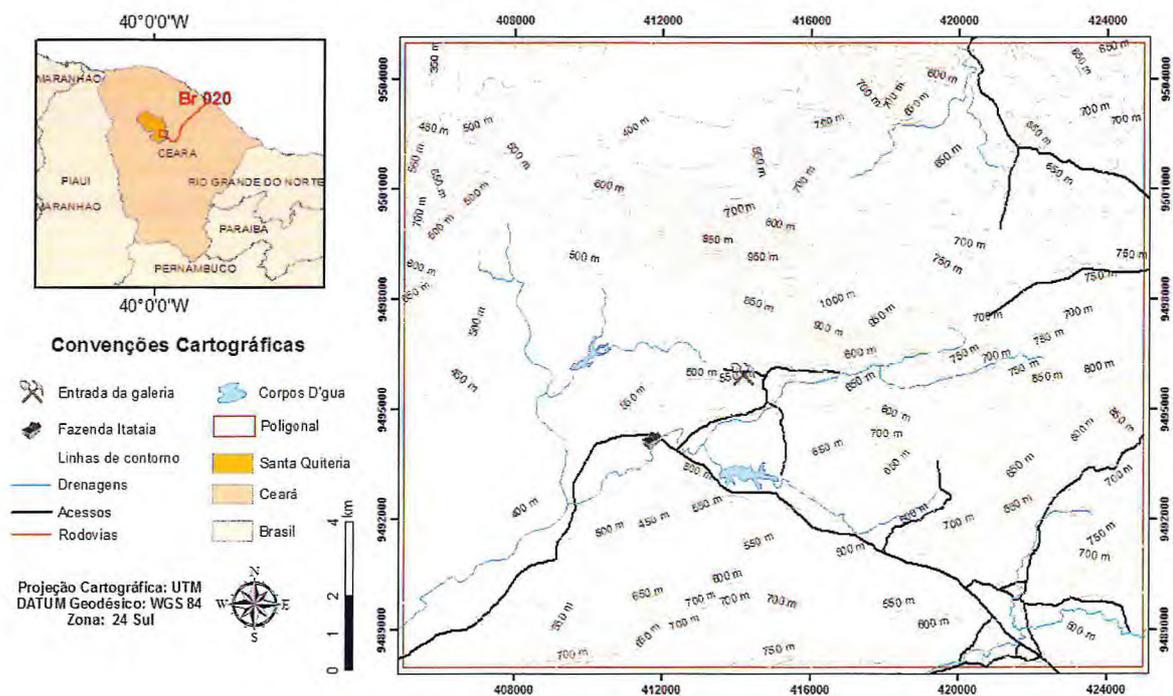
Vértice	Latitude	Longitude
Superior direito	405000	9505000
Superior esquerdo	425000	9505000
Inferior esquerdo	425000	9488000
Inferior direito	405000	9488000

Fonte: elaborado pelo autor.

O acesso é feito a partir da cidade de Fortaleza pela rodovia BR-020, em cerca de 166 km por estrada pavimentada até São José da Macaoca, distrito de Madalena, continuando pela 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 CE-366, por trecho não pavimentado, por cerca de 11 km (Figura 1).

Figura 1: Mapa de localização.

## MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO



Fonte: Confeccionado pelo Autor.

## **1.2 Objetivo geral**

O principal objetivo desta proposta é a integração dos dados gamaespectrométricos, imagens de satélite e dados geológicos, buscando a melhor caracterização da área mineralizada e de seu entorno, gerando mapas indicativos da mineralização.

### **1.2.1 Objetivos Específicos**

- i. Auxiliar no mapeamento geológico da área da mina de Itataia e adjacências, utilizando-se do processamento de dados gamaespectrométricos do Projeto Norte Ceará e imagens do satélite Landsat 8, sensor OLI;
- ii. Gerar cartografia geológica de superfície na escala 1:50.000;
- iii. Dar subsídio a mineradora Galvani Ltda. quanto aos possíveis locais de ocorrência da mineralização fosfática-urinífera (colofano);
- iv. Integrar e interpretar todas as informações em ambiente de Sistema de Informações Geográficas – SIG.

## **1.3 Aspectos Fisiográficos**

### **1.3.1 Clima**

A região de Itataia situa-se na porção do centro noroeste 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, 2011).

### **1.3.2 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 semi-árido dos Sertões Cearenses.

De acordo com o mapeamento fitogeográfico da folha SB.24-V-B, realizado pelo convênio DNPM/RADAMBRASIL (2008), para a NUCLEBRÁS, a região de Itataia foi dividida em 3

sub-regiões fitoecológicas, que correspondem a:

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

### **1.3.3 Relevo**

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 2).

Na Depressão Sertaneja está inserida a jazida de Itataia, 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 metros, 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 metros, 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 (NUCLEBRÁS, 2008).



A figura 3 sintetiza aspectos da geomorfologia e vegetação na área de estudo.

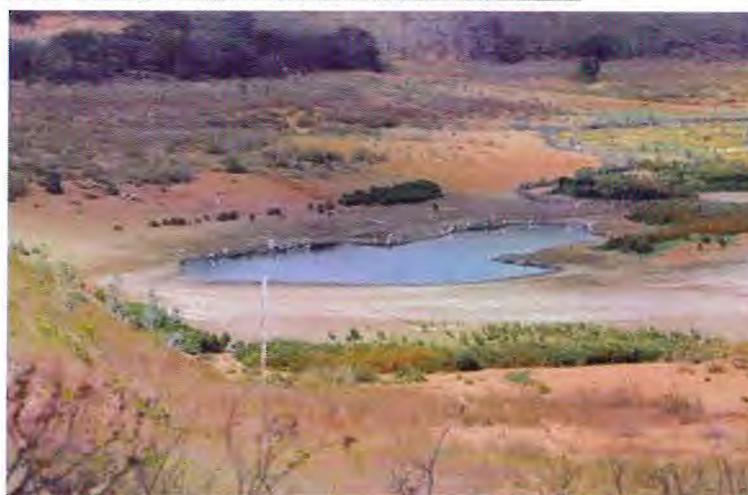
*Figura 3: Aspectos fisiográficos da área de estudo - (A) Unidades morfológicas da área de estudo e adjacências: depressão sertaneja e planaltos residuais (Serra do Céu). (B) Caatinga hiperxerófila: vegetação predominante na área de estudo. (C) Açude de Itataia. Imagens capturas na primeira semana de novembro de 2015, representando a época seca da região.*



(A)



(B)



(C)

Fonte: Fotos de Duarte (2015).

## 2. 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).

### 2.1 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 Coreaú (localizado a norte do Lineamento Transbrasiliano e a sul da margem retrabalhada do Cráton São Luís); Ceará Central (localizado entre os lineamentos Transbrasiliano e Senador Pompeu); Rio Grande do Norte (localizado entre os Lineamentos Senador Pompeu e Patos); 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) (Figura 4). O Domínio Estrutural Central foi subdividido em quatro subdomínios: o Ceará Central; o Seridó, ao norte; o Cachoeirinha-Salgueiro e Riacho do Pontal, ao sul. Porém, somente o subdomínio Ceará Central será dado ênfase por englobar a região, objeto de estudo, desta forma será o único abordado nos itens subsequentes.



## **2.1.1 Domínio Ceará Central**

### **2.1.1.1 Embasamento Arqueano**

Os terrenos arqueanos do Ceará Central estão limitados na porção sul/suldeste, na região de Pedra Branca e Mombaça. Abrangem uma área de aproximadamente 6.000km<sup>2</sup>, 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.

### **2.1.1.2 Terrenos Acrescionários do Paleoproterozóico**

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

### 2.1.1.3 Cobertura Neoproterozóica

O Domínio Ceará Central é caracterizado pela abundância de ocorrências isoladas de sequências supracrustais, que bordejam núcleos anatóticos, como por exemplo: o Complexo Tamboril-Santa Quitéria, na região de Santa Quitéria. Essas unidades foram incluídas no chamado Grupo Ceará por Kegel (1956), 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 rochas pelíticas a semi-pelíticas, mica xistos e paragnaisses da unidade Independência, e gnaisses em nível distinto de metamorfismo e migmatização, incluído mármore, calcário silicático, 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.

### 2.1.1.4 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 Coreaú. 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 calcário-silicatadas 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).

## 2.2 Mineralização Itataia

A província fósforo-uranífera de Itataia está localizada no município de Santa Quitéria-Ceará, porção central do Estado, englobada no Domínio Ceará Central. 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 1983). Em 1980, esses autores reconheceram uma espessa sequência metassedimentar de natureza transgressiva, com rochas migmatíticas, quartzíticas e gnáissicas sendo capeadas por metacalcários cristalinos. Posteriormente Mendonça *et al.* (1983), em um estudo de regionalização, denominaram de Grupo Itataia a sequência metassedimentar anteriormente reconhecida (Tabela 3).

Tabela 3: Esquema da estratigrafia da área de estudo.

ESQUEMA ESTRATIGRÁFICO	
QUATERNÁRIO	Aluviões e Terraços fluviais – sedimentos conglomeráticos, arenosos e argilosos inconsolidados.
JURÁSSICO	Diques Básicos – diabásios.
CAMBRO-ORDOVINANO	Evento Itataia – minério de colofanito.
NEOPROTEROZÓICO (Ciclo Brasileiro)	Complexo Santa Quitéria – migmatitos e granitoides; Estrutura Circular de Morrinhos – granitos pós-tectônicos; granitos filoneanos; pegmatitos.
PALEOPROTEROZÓICO (Ciclo Transamazônico)	Grupo Itatia Formação Alcantil – mármores cristalinos e calcissilicáticas; Formação Barrigas – gnaisses e migmatitos; Formação Laranjeiras – quartzitos; Formação Serra do Céu – migmatitos, leptitos, gnaisses e anfibolitos.

Fonte: Adaptado de Rosa Jr. *et al.*, 2015.

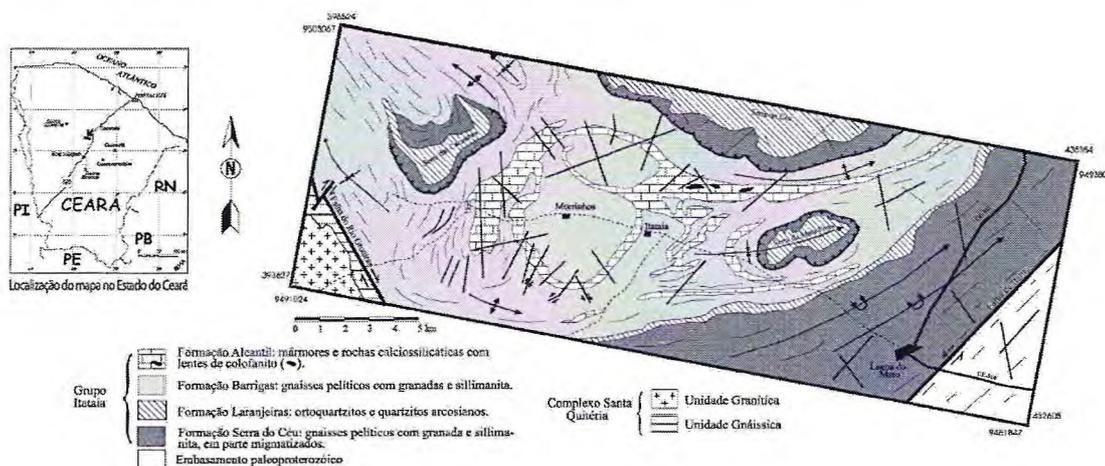
O depósito de Itataia apresenta 142.500 t de  $U_3O_8$  (64% desse total são classificados como medido) e cerca de 18.000.000 t de  $P_2O_5$ . O colofanito exhibe teores médios de  $P_2O_5$  e  $U_3O_8$  igual a 26,35% e 0,19%, respectivamente. Segundo Castro *et al.*, (2005), o depósito fósforo-uranífero é composto por colofanito que ocorre sob diferentes formas e associações, concentrando-se preferencialmente em mármores e rochas calciossilicáticas da Formação Alcantil. Os dividiu em 5 tipos de minério, que, segundo a importância econômica compreendem: (a) colofanito maciço situado especialmente no topo da sequência de mármores e que sustenta pequena elevação associada a mármores brechados;

(b) associado a brechas carbonosas e não carbonosas; (c) veios de pequena espessura que cortam mármore e a foliação milonítica; (d) disseminado em pegmatitos e (e) disseminado em gnaisses pelíticos e calcissilicáticos deformados e acompanhando o bandamento ou a foliação milonítica.

Castro *et al.* (2005) propõem um modelo para a mineralização fósforouranífera onde a sua origem estaria relacionada a rochas sedimentares depositadas em zonas de plataforma marinha rasa e/ou restrita e que o fosfato seria originalmente oriundo do reservatório oceânico. Já a fonte do urânio, seria predominantemente terrígena, relacionada a lixiviação do embasamento continental preexistente e se depositaria em ambiente marinho confinado com fortes influências continentais. Analisando a composição isotópica e química do minério e mármore e rochas calcissilicáticas associados à mineralização, os autores interpretaram que a interação entre esses fluidos pode ter ocorrido durante um estágio pós-deformacional. Desse modo, de acordo com o modelo proposto, a mineralização seria de origem predominantemente sedimentar, com reconcentração por processos tectono-metamórficos e posterior enriquecimento por processos supergênicos.

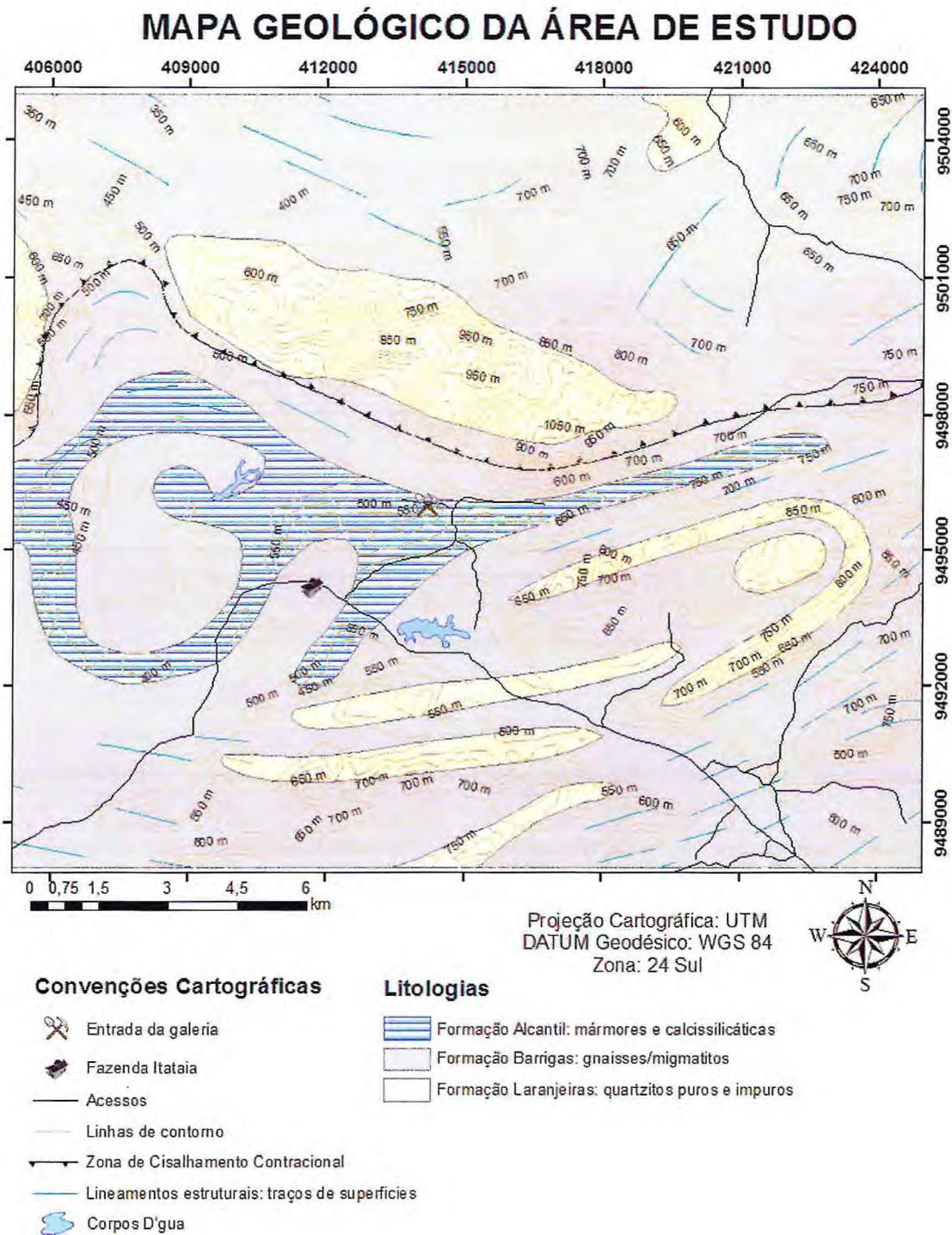
A figura 6 apresenta um mapa geológico para a área de estudo, modificado de CPRM (2003).

Figura 5: Mapa de localização e geológico da área de interesse do projeto



Fonte: Extraído de Castro et al. (2005).

Figura 6: Mapa geológico da área de estudo.



Fonte: CPRM, 2003. Modificado pelo autor.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Materiais

##### 3.1.1 Dados de Sensoriamento Remoto

Em pesquisas de Sensoriamento Remoto, a utilização de imagens de satélite como matéria prima para a produção de mapas é uma das grandes inovações no segmento do geoprocessamento, pois possibilita uma gama enorme de análises espaciais e temporais.

A série Landsat surgiu no final dos anos 60 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 site do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais).

O mais novo satélite da família Landsat traz importantes novidades para usuários que demandam de imagens de fácil acesso e boa resolução espacial e espectral. A Tabela 4 apresenta as principais características dos sensores embarcados no satélite Landsat 8. A plataforma Landsat 8 opera com dois instrumentos imageadores: *Operational Terra Imager* (OLI) e *Thermal Infrared Sensor* (TIRS). Produtos OLI consistem de nove bandas multiespectrais com resolução espacial de 30 metros (bandas de 1 a 7 e 9). 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 metros. A banda 8 do instrumento OLI é a banda pancromática que possui resolução espacial de 15 metros. 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, 2013).

Tabela 4: Características dos sensores embarcados no satélite Landsat-8.

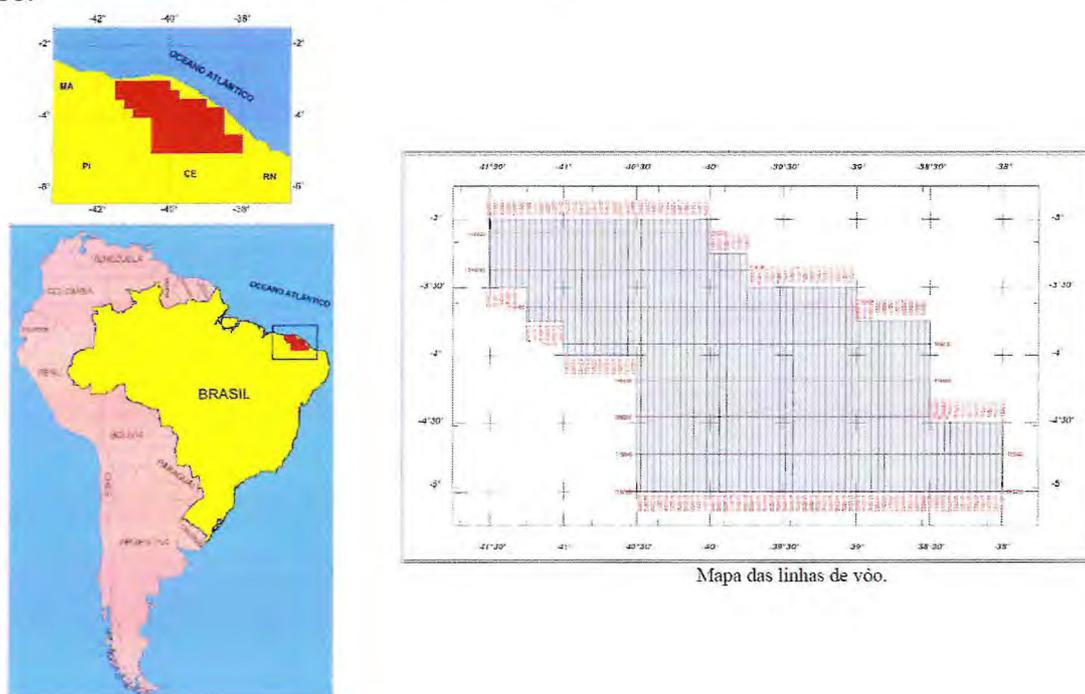
Bandas	Comprimento de Onda (micrômetros)	Resolução Espacial (metros)
Banda 1 - Ultra Azul	(0.43 - 0.45 )	30
Banda 2 – Visível Azul	(0.450 - 0.51 )	30
Banda 3 - Visível Verde	(0.53 - 0.59 )	30
Banda 4 - Visível Vermelho	(0.64 - 0.67 )	30
Banda 5 - Infravermelho Próximo	(0.85 - 0.88 )	30
Banda 6 - Infravermelho Médio/SWIR	(1.57 - 1.65 )	30
Banda 7 - Infravermelho Médio/SWIR	(2.11 - 2.29 )	30
Banda 8 - Pancromática	(0.50 - 0.68 )	15
Banda 9 - Cirrus	(1.36 - 1.38 )	30
Banda 10 – Infravermelho Termal (TIRS)1	(10.60 – 11.19)	100
Banda 11 – Infravermelho Termal (TIRS)2	(11.50 – 12.51)	100

Fonte: adaptado de [http://landsat.usgs.gov/band\\_designations\\_landsat\\_satellites.php](http://landsat.usgs.gov/band_designations_landsat_satellites.php)

### 3.1.2 Dados geofísicos do Projeto Norte Ceará

Os dados gamaespectrométricos empregados neste trabalho, foram obtidos e, posteriormente cedidos para este trabalho pela CPRM, sendo oriundos do Projeto Norte Ceará, localizado na região nordeste do Brasil, como mostra a Figura 7.

Figura 7: Localização da Área do projeto Aerogeofísico Norte do Ceará e Mapa das linhas de voo.



Fonte: CPRM, 2009. Modificado pelo autor.

Para a etapa de aquisição de dados foram utilizadas duas aeronaves Piper Navajo PA31-350, prefixo PR-PRS e PR-PEC, de propriedade da Prospectos Aerolevantamentos e Sistemas Ltda, e uma aeronave Piper Navajo PA31-310, prefixo PT-DYK, de propriedade da Microsurvey Aerogeofísica e Consultoria Científica Ltda., as quais realizaram o projeto no período de 18/10/2008 a 08/07/2009 totalizando 111.080,00 km e perfis. Foi empregado um gamaespectrômetro da RADIATION SOLUTIONS, modelo RS-500, de 1024 canais espectrais, sistema de navegação GPS com receptores de 12 canais da marca AG-NAV, modelo Gold/Guia (PR-PRS), Loaner (PT-DYK) e Gold (PR-PEC).

Para recobrimento do projeto foram utilizadas cerca de 654,56 horas de voo, que resultaram no levantamento efetivo de 111.080,00 km de perfis aprovados pela fiscalização da CPRM em uma área de cerca de 52.181 km<sup>2</sup>. As linhas de voo e de controle tiveram um espaçamento de 0,5 km e 10 km e orientadas nas direções N-S e E-W, respectivamente. O processamento de dados e a elaboração do Relatório Final foram realizados entre os meses de Julho e Agosto de 2009.

O processamento dos dados gamaespectrométricos obedeceu aos procedimentos recomendados na Seção 4 do Relatório Técnico, Número de Séries 323, da Agência Internacional de Energia Atômica, intitulado *Airbone gamma ray spectrometry surveying*. Foi desenvolvido no escritório sede da Prospectos Aerolevantamentos e Sistemas Ltda., no Rio de Janeiro-RJ e evoluiu a aplicação de rotinas do sistema *Oasis Montaj* versão 6.4.1 (GEOSOFT, 2005). A rotina empregada está contida no sistema de processamento radiométrico *OASIS-RPS* da *GEOSOFT*. Nos quais constam:

1. Correção do Tempo Morto;
2. Aplicação de Filtragem (filtragem não linear e filtragem do tipo passa-baixa);
3. Correlação do Erro de Paralaxe;
4. Cálculo da Altura Efetiva ( $h_c$ ) de Vôo;
5. Remoção do *background* da Aeronave e Cósmico;
6. Remoção do *Background* do Radônio;
7. Estimativa dos Coeficientes *Skyshine* ( $a_1$  e  $a_2$ );
8. Correção do Efeito *Compton*;
9. Correção Altimétrica (Coeficiente de Atenuação Atmosférica);
10. Conversão para Concentração de Elementos;

Maiores detalhes sobre as etapas de processamentos dos dados do Projeto

Aerogeofísico Norte Ceará estão descritos no Volume I do Relatório Final do Levantamento e Processamento dos Dados Magnetométricos e Gamaespectrométricos (CPRM, 2009).

### **3.1.3 Softwares**

Os *softwares* utilizados foram os seguintes:

- ENVI 4.8 e ER Mapper 7.0: pré-processamento e processamento das imagens de Sensoriamento Remoto;
- OASIS MONTAJ 7.1: processamento dos dados aerogamaespectroétricas;
- ArcGis 10.2.2.: para análise das imagens em ambiente SIG;

### **3.1.4 Dados Geológicos**

Os dados geológicos locais baseiam-se nos trabalhos pretéritos de mapeamento geológico que abrangem a área de estudo, tais como Pitombeira (2011); Castro (2005) e Amaral (2007). Visitas técnicas ao campo possibilitaram o reconhecimento dos litotipos da mineralização Itataia e seu entorno.

## **3.2 Metodologia empregada**

### **3.2.1 Processamento Digital de Imagens (PDI)**

Existem várias definições no que se diz respeito ao 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 o uso do termo sensoriamento remoto fica restrito que 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). Com essa afirmação é comum

considerar como sensoriamento remoto as imagens obtidas de satélites. Mas uma classe de sensores remotos que vêm sendo usado por mais de um século com forma de observar a Terra, são as fotografias aéreas. Visto que o filme fotográfico foi o primeiro material construído pelo homem capaz de registrar a radiação eletromagnética e de transformá-la na imagem do objeto fotografado.

O processamento de imagens digitais é a etapa pós aquisição realizada pelo sensor, onde serão tratados os dados obtidos afim 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 seguir serão apresentadas as técnicas usadas nesse trabalho.

### **3.2.2 Correção Atmosférica**

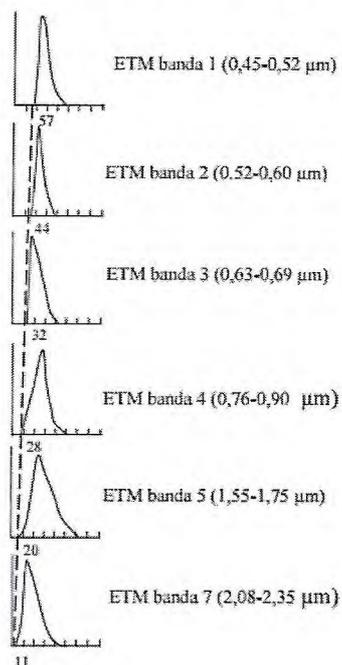
Existe uma relação entre a reflectância (ou radiância) e os valores digitais correspondentes nas imagens das superfícies observadas que pode ser afetada por perturbações do próprio sensor imageador, bem como efeitos atmosféricos e ou ainda disposição do relevo. Os erros ou distorções que as imagens estão 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 contraditórias. 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 8 ilustra os histogramas das bantas do sensor ETM+, com indicação do valor digital que mede a quantidade de espalhamento atmosférico adicionada ao sinal.

A técnica mais aceita para a remoção desse valor a mais no histograma é a *dark subtraction* ou *haze removal*. Desse modo, temos a conversão dos números digitais (*digital numbers* DN's para reflectância.

Figura 8: 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).

### 3.2.3 Espaço RGB

O sistema RGB (*Red, Green, Blue*) é o mais usado entre os modelos de cores, e está fundamentada 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 triplete 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: cyan (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 ser formar diferentes combinações de bandas dos sensores remotos nos canais do vermelho, verde e azul, afim 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 (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.

### ***3.2.4 Aritmética de Bandas***

Aritmética de bandas é uma das mais simples formulações algorítmicas de processamento de imagens e que pode ter resultados expressivos. É um processo bastante rápido para ajustar e suavizar imagens com muito ruídos ou para se obter realces de toda a área de uma imagem ou de alvos específicos de interesse do analista. As operações aritméticas (soma, multiplicação, subtração e divisão) são uma forma de recurso para reduzir o número de imagens, o que é uma vantagem em termos de armazenamento em disco. Em termos gerais, a soma e a multiplicação servem para realçar similaridades espectrais entre imagens de diferentes bandas ou datas, enquanto a subtração e a divisão são utilizadas para realçar diferenças espectrais dos alvos (MENESES & ALMEIDA, 2012).

#### ***3.2.4.1 Divisão 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).

### *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 produzido 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. No caso do sensor OLI, empregou-se as 6 bandas que abrangem do visível ao infravermelho de ondas curtas, excetuando-se a banda do ultra-azul. 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 significativas 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 auto-vetores 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 auto-vetor 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 auto-valores, 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 auto-valor estão os auto-vetores (ou *eigenvectors*), que indicam as direções dos eixos das PCs. Os auto-vetores 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 auto-vetores.

### 3.2.6 IHS

O espaço de cores IHS (*Intensity, Hue, Saturation*), também conhecido como HSI, é uma forma alternativa ao espaço RGB de representação de cores. No espaço IHS, as cores são definidas por três atributos: intensidade (*Intensity-I*), matiz (*Hue-H*) e saturação (*Saturation-S*); ao invés de cores primária.

A componente I é a medida da energia total envolvida em todos os comprimentos de onda, sendo, portanto, responsável pela sensação de brilho dessa energia incidente sobre o olho. Tem como característica principal a propriedade de preservar o atributo da resolução espacial das imagens transformadas, evidenciando com clareza as variações morfológicas do terreno em função da intensidade luminosa mínima percebida pelo olho humano. A componente H é o matiz de um objeto, ou seja, é a medida de onda médio da luz que ele reflete ou emite, definindo, portanto, a cor espectral dominante do objeto. A componente S representa é o grau de diluição de uma cor pura por luz branca, ou seja, a pureza das cores dos alvos onde os níveis de cinza mais claros são relacionados a cores com maior pureza (quantidade de branco).

É possível manipular cada componente separadamente, obtendo dessa forma, maior controle sobre o realce de cores. Devido a essa flexibilidade, o espaço IHS pode ser usado para melhoramento de imagens RGB.

Outro emprego importante do espaço IHS é de combinar e integrar dados multifontes para aplicações geológicas. Podendo assim, integrar dados com diferentes resoluções espaciais, por exemplo, integrar uma banda pancromática, ou ainda dados de aerogefísica, como a gamaespectrometria e magnetometria.

### **3.2.8 Gamaespectrometria**

A partir da descoberta da radioatividade por Becquerel em 1896, diversos avanços ocorreram na compreensão deste fenômeno. A radioatividade pode ser definida pelas transformações nucleares (decaimento) acompanhadas da emissão de partículas ou energias características da instabilidade do núcleo de determinados elementos. Tem grande aplicação em prospecção mineral e no mapeamento geológico. Como pode-se citar a CPRM que, desde dos anos 70, vem usando a radioatividade natural em seus trabalhos de mapeamento. A procura por concentrações explotáveis de radioelementos nas décadas subsequentes baseou-se fortemente na gamaespectrometria aérea (IAEA, 2003).

Na natureza existem 51 nuclídeos instáveis que durante o processo de desintegração atômica natural dos elementos radioativos emitem tipos diferentes de partículas radioativas, são elas: a radiação alfa ( $\alpha$ ), beta ( $\beta$ ) e gama ( $\gamma$ ). Os raios gama são ondas eletromagnéticas que representam o excesso de energia emitido a partir de átomo excitados. Sua energia penetrativa é cem vezes maior que a dos raios beta (que por sua vez já é maior que a da radiação alfa). Isto faz com que as medições radiométricas sejam essencialmente superficiais, tendo um alcance médio de 30 a 40 cm de profundidade (MINTY, 1988). Como a gamaespectrometria tem pouco alcance em profundidade, as informações obtidas para interpretação limitam-se a contatos geológicos superficiais e/ou afloramentos de uma formação.

A radiação gama no solo é inversamente proporcional à densidade do meio que atravessa, sendo que qualquer matéria contida entre o emissor e o sensor pode afetar significativamente a detecção dos raios gama. Entre os principais fatores que influenciam as medidas, pode-se citar:

- Cobertura de solo (35 cm de solo são capazes de atenuar cerca de 95% da emissão gama);

- Vegetação densa (a vegetação é capaz de absorver esses elementos atenuando as medidas de urânio e tório e diminuindo em até 15% as de potássio);
- Variações de temperatura atmosférica (que influencia a densidade do ar), umidade relativa e presença de nuvens;
- Fenômeno de inversão térmica, que pode impedir a dissipação do radônio livre na atmosfera gerando falseamento dos dados;
- Umidade do solo (a presença de água fresca não-radioativa pode diminuir as medições para quase zero);
- Variação topográfica;
- Efeitos direcionais (quando a janela do detector não está paralela ao plano de medida – Gunn, 1998);

Além dos fatores citados, os dados gamaespectrométricos são diretamente afetados pelas características do levantamento efetuado como: distância entre o sensor e a superfície amostrada (altura de voo em levantamentos aéreos), espaçamento entre as linhas de aquisição e entre os pontos de medida, entre outros. Desse modo, algumas correções devem ser feitas nos dados adquiridos durante o levantamento, com o intuito de remover efeitos indesejáveis. São realizados procedimentos para a correção do espalhamento Compton, da radiação proveniente da aeronave e de raios cósmicos (correção de background), correção da altura de voo e finalmente a transformação de contagens para concentração dos radioelementos. A descrição pormenorizada desses procedimentos pode ser encontrada em IAEA (2003).

Os levantamentos gamaespectrométricos aéreos registram uma faixa energética que se situa exclusivamente na zona de predominância do efeito Compton(ou o espalhamento Compton é a diminuição de energia (aumento de comprimento de onda) de um fóton, devido à interação com a matéria), sendo desprezíveis os efeitos dos outros processos sobre os dados obtidos por essa técnica (como o efeito fotoelétrico, que resulta da absorção total da energia do raio gama pelo elétron de um átomo, sob a forma de energia cinética). Os radioisótopos mais abundantes na natureza e que permitem sua utilização nos levantamentos aéreos são:

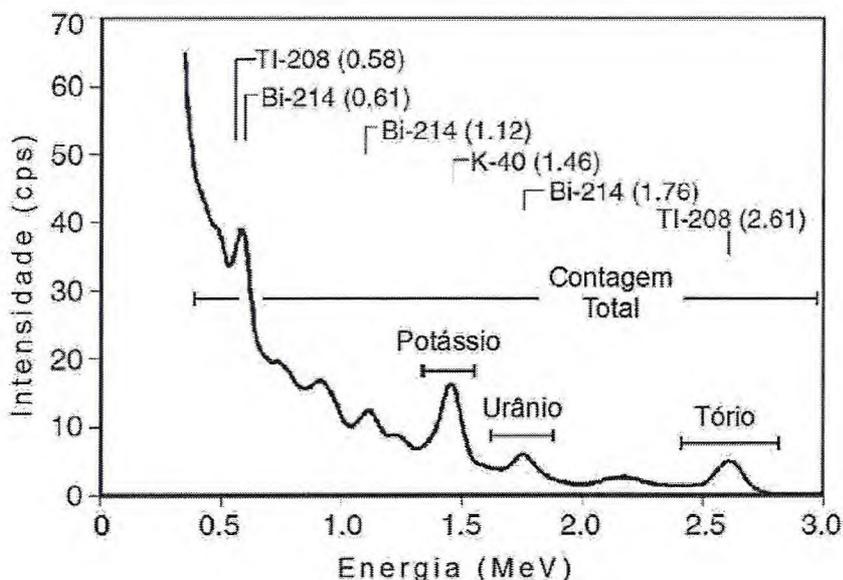
- $^{40}\text{K}$  que representa 0,012% do K total (outros isótopos,  $^{39}\text{K}$  e  $^{41}\text{K}$  não são radioativos e representam respectivamente 93,2581% e 6,7302% do K total);
- Série de decaimento do  $^{238}\text{U}$  (representa 99,2743% do U total, sendo o

restante composto pelos isótopos  $^{235}\text{U}$  e  $^{234}\text{U}$  que não são medidos em levantamentos);

- Série de decaimento do  $^{232}\text{Th}$  (100% do Th total). A concentração média na crosta superior do elemento K é de 2,5%, do elemento U é de 2,8 ppm e do elemento Th é de 12 ppm (IAEA, 2003).

As concentrações desses elementos podem ser estimadas por meio da análise do espectro gama registrado durante os levantamentos aéreos. A figura 9 exemplifica um espectro de raios gama obtido em levantamento aéreo mostrando os fotopicos diagnósticos e as posições das faixas de energia, correspondentes ao K, U e Th usadas na gamaespectrometria.

Figura 9: Espectro de raios gama obtido em levantamento aéreo mostrando os fotopicos diagnósticos e as posições das faixas de energia, correspondentes ao K, U e Th, usadas na gamaespectrometria



Fonte: MINTY, 1997 in RAMOS, 2010.

## 4. PROCESSAMENTO E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS

### 4.1 Processamento das imagens OLI

Para aplicação das técnicas de sensoriamento remoto foi utilizada a cena 217/63 do sensor OLI do satélite Landsat 8 adquirida em 24 de outubro de 2015, obtidas gratuitamente no site da USGS (<http://earthexplorer.usgs.gov/>), os programas utilizados foram ENVI 4.8 e ER Mapper 7.0. As bandas de interesse foram importadas para o software ENVI, compactadas para um único arquivo e recortada a área de interesse.

A fase de pré-processamento contou com a correção do espalhamento atmosférico (*atmospheric scattering*) da radiação solar que vai afetar diretamente a cada banda e os ruídos. Para correção do espalhamento atmosférico foi utilizada a técnica denominada de subtração de *pixel* escuro (*darck subtraction*), que se baseia na subtração de um valor de cinza, que representaria o efeito de espalhamento determinado para cada banda isolada. Após esse processo foi gerada a estatística para análise individual de cada banda, apresentadas na tabela 5. Não foi necessário georreferenciar pois as imagens já estão disponibilizadas georreferenciadas.

Tabela 5: Estatística das bandas 2,3,4,5,6 e 7 do sensor OLI, cena 217/63.

	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	Banda 6	Banda 7
a) Estatística de banda da imagem Landsat OLI						
Mínimo	0	0	0	333	1016	556
Máximo	6729	9209	12086	18704	23680	18331
Média	985.96	1517.65	2618.55	7077.95	11509.67	7401.64
Autovalor	93.07%	98.01%	99.50%	99.87%	99.99%	100.00%
b) Matriz de Correlação da imagem Landsat OLI						
Banda 2	1.00					
Banda 3	0.95	1.00				
Banda 4	0.94	0.98	1.00			
Banda 5	0.69	0.83	0.82	1.00		
Banda 6	0.87	0.91	0.93	0.82	1.00	
Banda 7	0.90	0.93	0.95	0.78	0.98	1.00

Fonte: Elaborado pelo autor

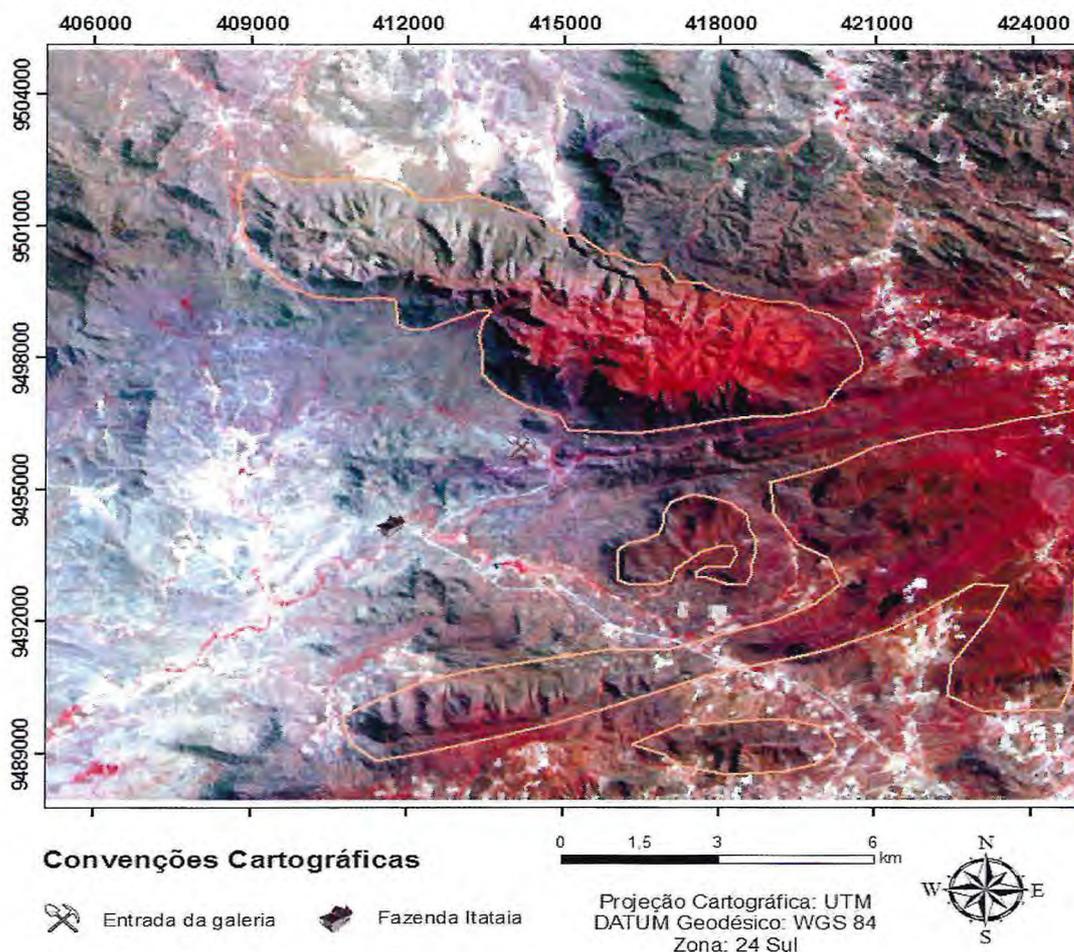
Os produtos gerados na fase de pdi foram salvos em formato geotif. Para visualização e interpretação em sistema SIG, foi utilizado o programa ArcGis 10.2.2.

#### 4.1.1 Composição colorida RGB das bandas 5, 4 e 3

A figura 10 mostra a composição colorida RGB das bandas 5, 4 e 3. A imagem gerada apresenta uma extensa área em vermelho, associada a resposta espectral da vegetação. Esta vegetação recobre principalmente a Serra do Céu, composta pelas formações Laranjeiras (quartzitos) e Serra do Céu (gnaisses e migmatitos), e a porção sudeste da área. É destacada também a vegetação ciliar, que ocorre associada a drenagens e leitos de rios.

Ao redor da mineralização Itataia está marcada pela coloração verde-azulada, gerada pela junção da banda 4 com a banda 3, o que espectralmente representa áreas descampadas e ricas em ferro. Nota-se também a influência marcante da atividade antrópica em toda a região, principalmente com a construção de estradas carroçáveis.

Figura 10: Composição R5G4B3 da área de estudo, destacando em vermelho a vegetação da área.

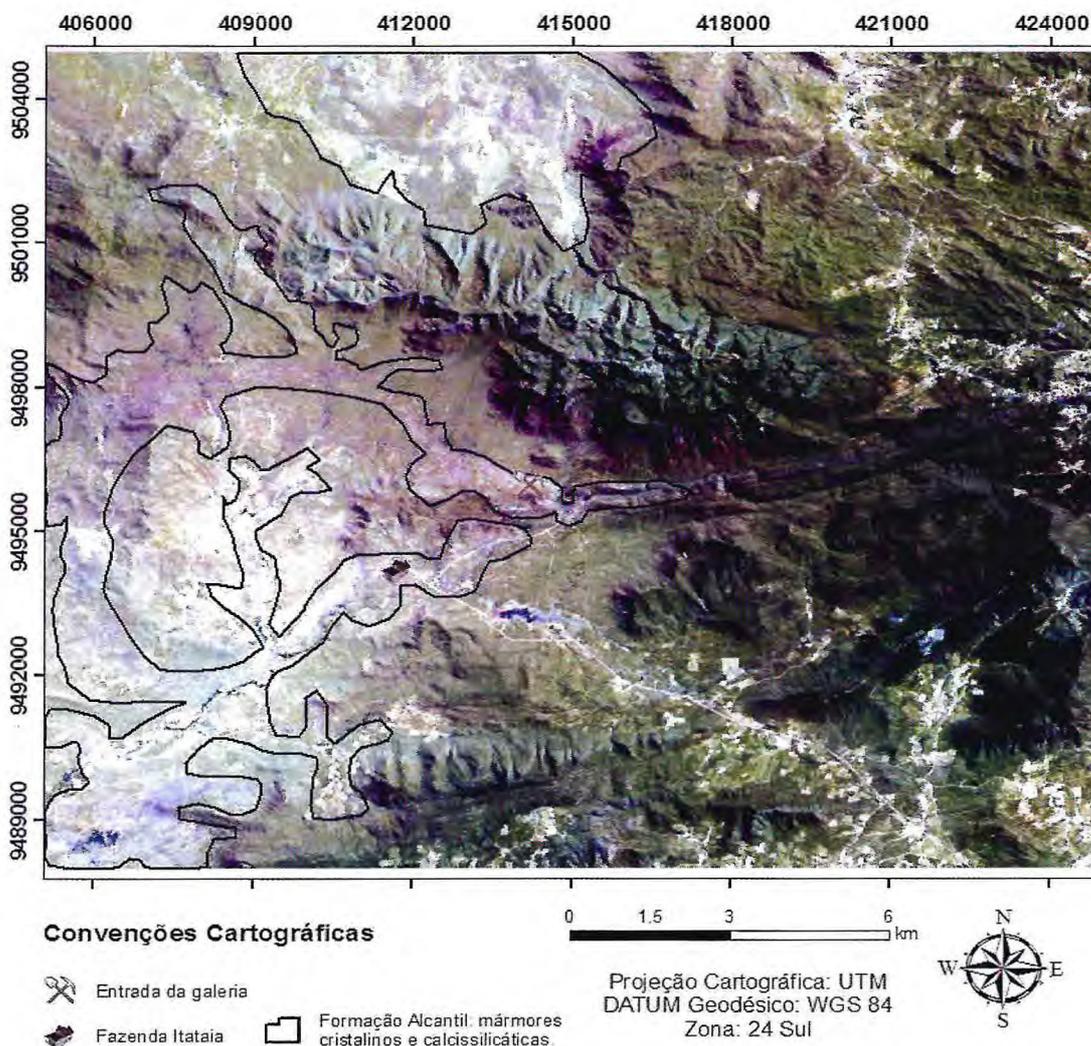


Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.1.2 Composição RGBI das bandas 7, 6, 3 e 8

A composição colorida utilizando as bandas 7 no canal do vermelho, 6 no canal do verde e 3 no canal do azul permitiu destacar a Formação Alcantil em tons de azul, composta por mármore e calcissilicáticas, a qual a mineralização fósforo-uranífera está associada. Para melhorar a resolução espacial (de 30 para 15 metros) e realçar as feições morfológicas da região, aplicou-se a composição colorida R7G6B3I8, onde a banda 8 encontra-se no canal *Intensity* (IHS), fundindo numa só imagem. Com isso, temos um realce da estrutural da região, onde associa-se a Fm. Alcantil a uma faixa disposta na direção E-W (Figura 11).

Figura 11: Composição R7G6B3I8 da área de estudo, destacando os mármore da Formação Alcantil em tons de azul.



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.1.3 Matemática das bandas 2/6, 4-2, 5/7 em RGB

Muitas vezes é desejável que a informação espectral contida num conjunto de bandas de sensores multi-espectrais seja comprimida em um número menor de bandas, sendo esse número idealmente igual a 3 bandas, para que possam ser combinadas em espaço RGB. Isso é conhecido como redução da dimensionalidade dos dados originais. Técnicas aritméticas possibilitam essa redução, pois cada imagem resultante dessas operações representará uma função da informação espectral originalmente contida em duas ou mais bandas originais usadas na equação aritmética (CRÓSTA, 1992).

Com o objetivo de obter-se uma melhor representatividade das informações contidas na imagem da área de estudo, foi realizada matemática nas bandas do sensor OLI.

A figura 12 apresenta as imagens geradas através da matemática das bandas 2/6, 4-2, 5/7 em pseudocor e em composição colorida RGB, objetivando ressaltar a distribuição dos diferentes litotipos presentes na área.

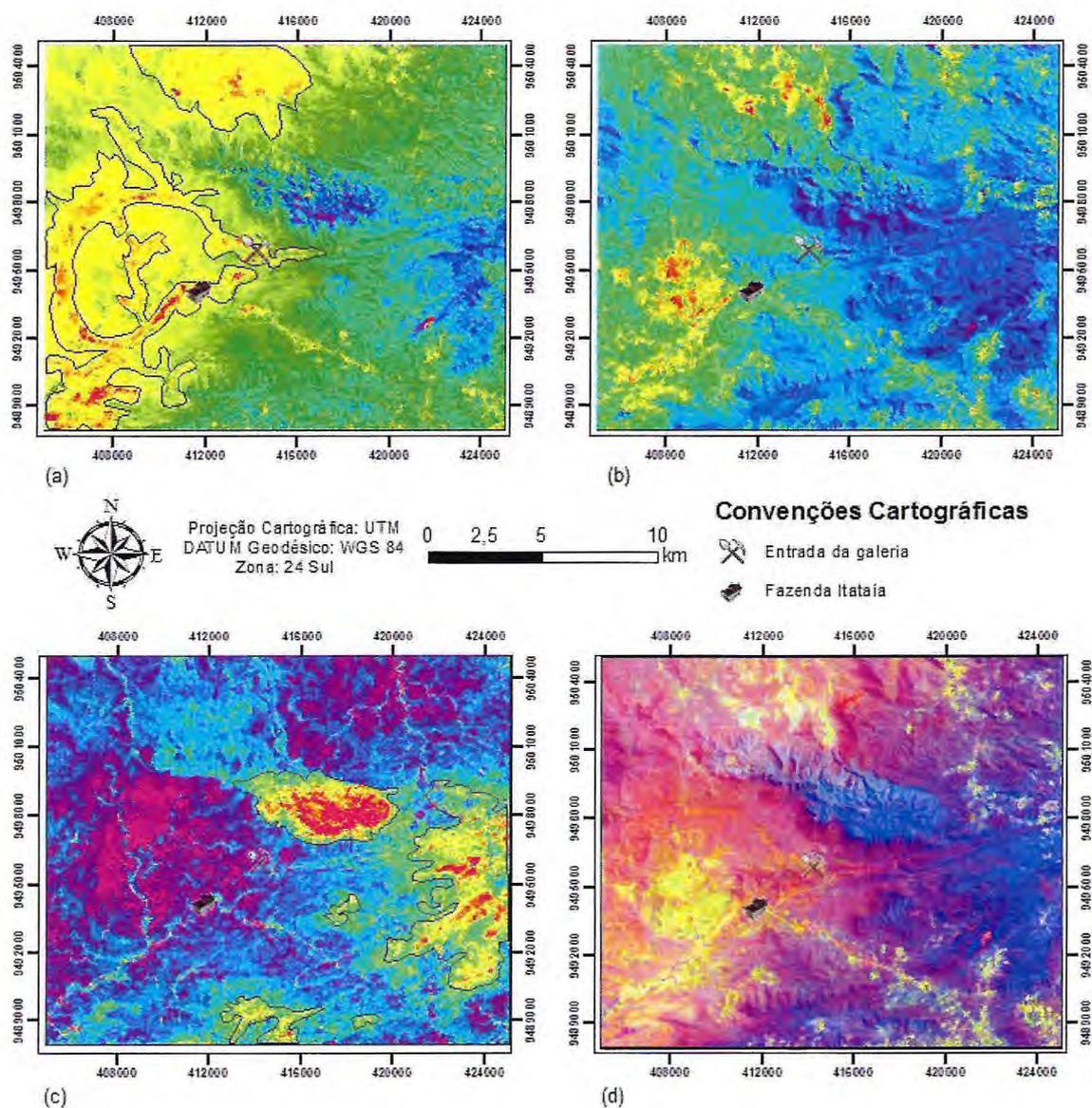
A imagem (a) apresenta a razão entre as bandas 2/6 em pseudocor. A partir dessa razão foi possível destacar em vermelho os mármorees da Fm. Alcantil. A imagem (b) apresenta a subtração de bandas 4-2 em pseudocor, destaca os corpos ricos em óxidos e hidróxidos de ferro (vermelho) que se encontram distribuídos na porção sudoeste e norte da área de estudo (MOORE & LIU, 1990). Destacam-se principalmente aos solos acumulados em relevo relativamente mais baixo, oriundos da erosão dos gnaisses da formação Barriga. As zonas com relevos mais elevados encontram-se espectralmente realçadas evidências menores de óxidos e hidróxidos de ferro.

Rosa Jr *et al.* (2015) utilizou a razão entre as bandas 4 (infravermelho próximo – NIR) e 7 (infravermelho médio – MIR) com o Landsat 5 para realçar a Fm. Laranjeiras. Utilizando como base essa metodologia, aplicou-se o mesmo tratamento com as bandas correspondentes do sensor OLI, sendo respectivamente as bandas 5 e 7 (Figura 12-c). Também foi aplicada a técnica de realce pelo histograma, em que possibilitou uma melhor diferenciação entre as litologias da área. Pode-se observar em os quartizitos da Fm. Laranjeiras (em vermelho) e os migmatitos/gnaisses da Fm. Barrigas (variando entre tons amarelo e verde), no topo das Serras do Céu no centro da área de estudo e da Serra da Mata Fome logo a baixo, na porção sudoeste. Observa-se, também, respostas espectrais similares aos quartizitos nas drenagens que cortam a área. Devido a cena ter sido obtida na estação seca, essas respostas espectrais podem caracterizar os depósitos aluviais (coberturas terció-quadernárias). São constituídos por sedimentos quartzosos inconsolidados de cor creme e granulação predominantemente arenosa envolvendo blocos centimétricos arredondados e

subarredondados de silimanita-granada-biotita gnaisses bandados, silimanita-muscovita quartzito, anfibolito e mármore (PITOMBEIRA, 2011).

Para uma melhor representatividade das informações da área de estudo, os resultados obtidos das operações matemáticas com as bandas do sensor OLI foram apresentados em composição colorida RGB. Onde a razão 2/6 está no canal do vermelho, a subtração 4-2 no canal do verde, e a razão 5/7 no azul (Figura 12-d).

Figura 12: (a) Razão das bandas 2/6 em pseudocor, destacando Fm. Alcantil; (b) Subtração entre as bandas 4-2 para óxidos, em pseudocor; (c) Razão das bandas 5/7 em pseudocor, destacando Fm. Laranjeiras. (d) RGB 2/6, 4-2, 5/7 respectivamente.



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.1.4 Análise por Principais Componentes

A transformação por principais componentes e a obtenção da matriz de autovetores e autovalores, aplicadas à imagem OLI utilizada neste trabalho está descrita na Tabela 6, onde foram empregadas 6 bandas que abrangem os espectros do visível e infravermelho do sensor OLI, excetuando-se a banda 1 (região do ultra-azul) como dados de entrada.

Tabela 6: Matriz de auto vetores utilizando diferentes combinações de bandas do sensor OLI empregadas neste estudo.

a) Matriz de autovetor da ACP com as bandas 2567 do sensor OLI.				
Autovetor	Banda 2	Banda 5	Banda 6	Banda 7
PC 1	0.908793	-0.114399	0.394387	0.073933
PC 2	-0.087347	0.883396	0.460194	-0.014256
PC 3	-0.237359	-0.179231	0.326791	0.897076
PC 4	0.331852	0.417613	-0.725181	0.435415

b) Matriz de autovetor da ACP com as bandas 2456 do sensor OLI.				
Autovetor	Banda 2	Banda 4	Banda 5	Banda 6
PC 1	0.881109	-0.217606	0.419192	-0.023939
PC 2	0.073371	-0.810606	-0.568052	0.121866
PC 3	0.387785	0.401569	-0.636995	-0.531604
PC 4	-0.260551	-0.366480	0.309568	-0.837838

c) Matriz de autovetor da ACP com as bandas 234567 do sensor OLI.						
Autovetor	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	Banda 6	Banda 7
PC 1	0.884346	-0.163968	0.432832	0.007618	-0.060088	-0.005790
PC 2	-0.068518	0.862495	0.472398	-0.137608	0.014187	0.095450
PC 3	0.391632	0.325827	-0.654517	-0.515480	0.112396	-0.183619
PC 4	-0.124371	-0.198318	0.293804	-0.303692	0.818556	-0.310834
PC 5	-0.210532	-0.251809	0.272284	-0.715809	-0.523691	-0.177469
PC 6	0.008292	-0.142534	-0.025392	-0.332677	0.198166	0.910509

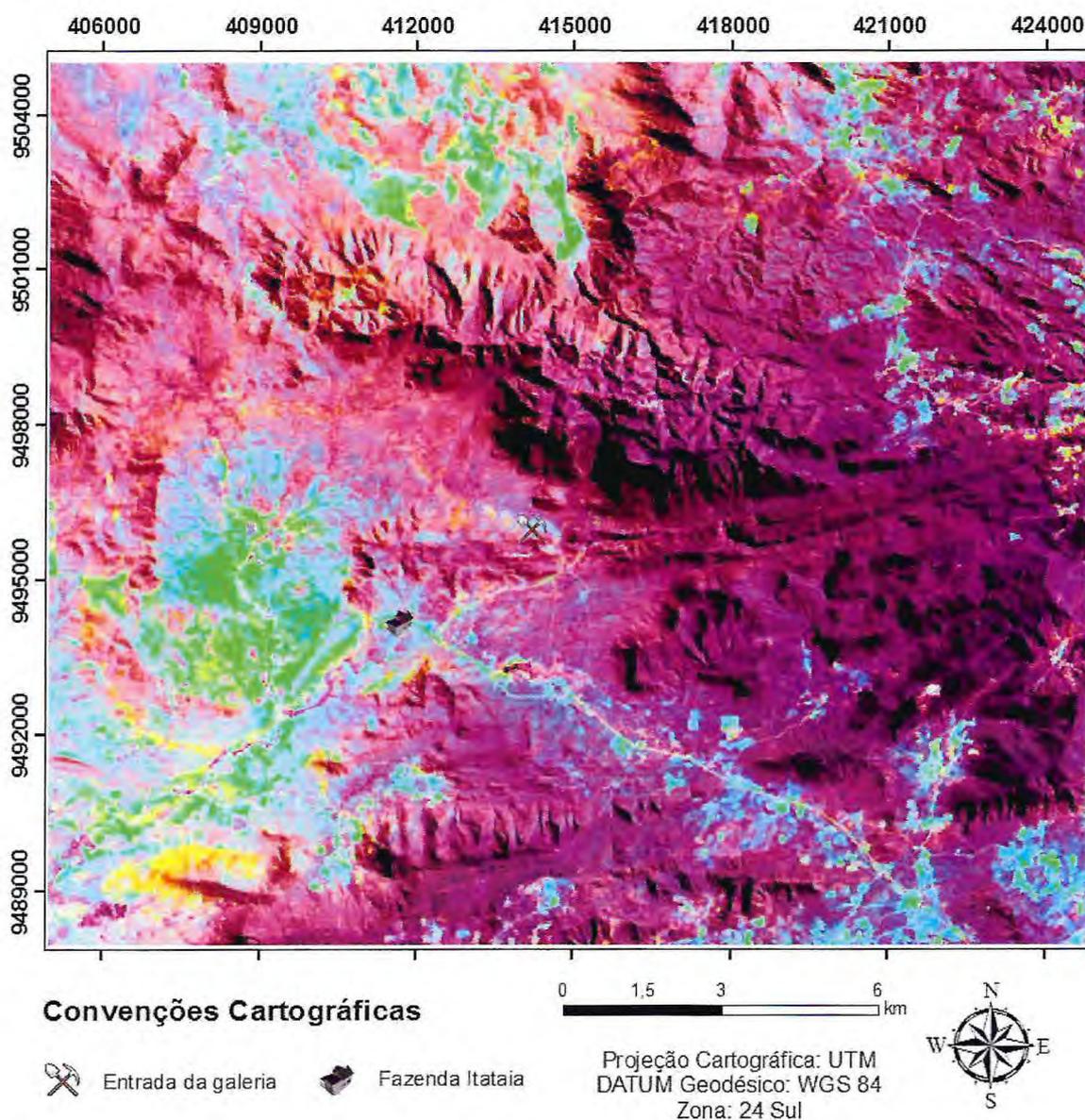
Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com Crósta (1992), para obter melhor resultados com a Análise por Principais Componentes, deve utilizar 4 bandas em que 2 sejam de maior reflectância e 2 com maior absorção. Assim foram selecionadas bandas para realização da ACP visando o mapeamento de argilominerais e óxidos de ferro.

A figura 13 apresenta a imagem obtida a partir da aplicação da técnica Crósta ou *Feature-Oriented Principal Components Selection*, com a PC3-OLI2567 (H-argilominerais), PC1-FeH e PC4-OLI2456 (óxidos e hidróxidos de ferro-Fe) em RGB sobreposta a PC1 das seis bandas espectrais. Na formação da ACP, uma banda do infravermelho foi omitida para

evitar mapeamento de hidroxilas, enquanto na outra ACP, as bandas OLI 3 e 4 foram omitidas para evitar o mapeamento de óxidos de ferro. Nota-se ocorrências de argilominerais são representadas pela cor vermelho-alaranjada, acompanhando a estruturação dos mármores da Fm. Alcantil. As ocorrências de óxidos e hidróxidos de ferro (azul) associam-se as rochas da Fm. Barrigas. Nesta última unidade litológica destaca-se a presença de ferro ao longo das drenagens, estradas e áreas descampadas como ao redor da área da mina de Itataia

Figura 13: Imagem gerada através da aplicação da técnica Crósta com a PC3- 2567, PC1 e PC4 – 2456 sobreposta a PC1 com as 6 bandas do Landsat 8.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Osako e Amaral (1998) e Rajesh (2007) aplicaram essa técnica utilizando imagens do Landsat 5 e 7 ao mapeamento de zonas províncias uraníferas de Caetité e Rockhole (Austrália), respectivamente.

#### 4.2 Processamento dos Dados Gamaespectrométricos

Os dados aerogamaespectrométricos utilizados foram fornecidos em formato GDB. (*Geosoft Data Base*) pela Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais (CPRM) já com devidas correções e processamentos feitos.

Para gerar as imagens dos canais do urânio, tório, potássio e contagem total, os dados foram reamostrados. Foram, também, executados alguns processamentos para melhoria da qualidade dos dados. Nos dados gamaespectrométricos foram encontrados valores negativos nos canais de urânio (eU), Tório (eTh) e potássio (K). Isso pode ser atribuído a possíveis erros na correção atmosférica e/ou má calibração dos instrumentos (RAMOS, 2010). Assim, esses valores gamaespectrométricos que apresentaram valores negativos foram eliminados do banco de dados, considerados como *dummies*. Para tal foi aplicado uma fórmula de correção no *software OASIS MONTAJ 7.1* nos três canais, sendo ela:

$$C0: (C1 < 0) ? (DUMMY) : (C1)$$

Após feito esse procedimento o próximo passo foi a escolha do método de interpolação dos dados em linha para a geração de uma malha regular (*grid*). A escolha da técnica de interpolação mais apropriada é feita em função da natureza dos dados e o algoritmo utilizado deve respeitar os valores originais e ao mesmo tempo gerar uma superfície contínua e suave (IAEA, 2003).

O método que produziu resultados mais satisfatórios no processamento de dados aerogamaespectrométricos é a interpolação por curvatura mínima, sendo utilizado por diversos autores, tais como AMARAL (2007) e RAMOS (2010). Este método de gridagem satisfaz condições específicas inerentes ao dado geofísico, onde o dado é suavemente distribuído, a 2ª derivada do dado é contínua e a curvatura quadrada integrada sobre a superfície inteira é minimizada. A superfície gerada na curvatura mínima é análoga a uma placa fina e linearmente elástica, deformada de forma a passar pelos valores dos dados com uma quantidade mínima de flexão (BRIGGS, 1974).

Depois da escolha do método de interpolação dos dados é estabelecido o tamanho da célula unitária a ser utilizado na confecção dos *grids*. Vasconcellos *et al.* (1994) sugerem células unitárias com valores entre 1/4 e 1/8 do espaçamento nominal das linhas de voo. Estes valores evitam a perda de informação e a incorporação de ruídos, denominados *aliasing*

(superposição de frequência). Assim, neste trabalho as células tiveram dimensões de 125 metros, representando 1/4 do espaçamento das linhas de vôo do Projeto Aerogeofísico Norte Ceará, cujo espaçamento original, no momento da aquisição dos dados foi de 500 metros.

O processamento dos dados aerogeofísicos empregados neste trabalho possibilitou a obtenção dos produtos, na forma de imagens para os canais do potássio, do urânio e do tório, além do mapa de razões e do mapa ternário.

#### **4.2.1 Canal do Potássio**

O potássio aparece com abundância média de 1,50% (1,81% K<sub>2</sub>O) ao longo da crosta continental, concentrando-se em maior quantidade na parte superior, da mesma. O potássio apresenta alta mobilidade durante o intemperismo e em ambientes de alteração hidrotermal, principalmente ambientes de clima tropical a subtropical (WILFORD *et al.*, 1997). A figura 14 apresenta a distribuição do potássio obtida por aerogamaespectrometria.

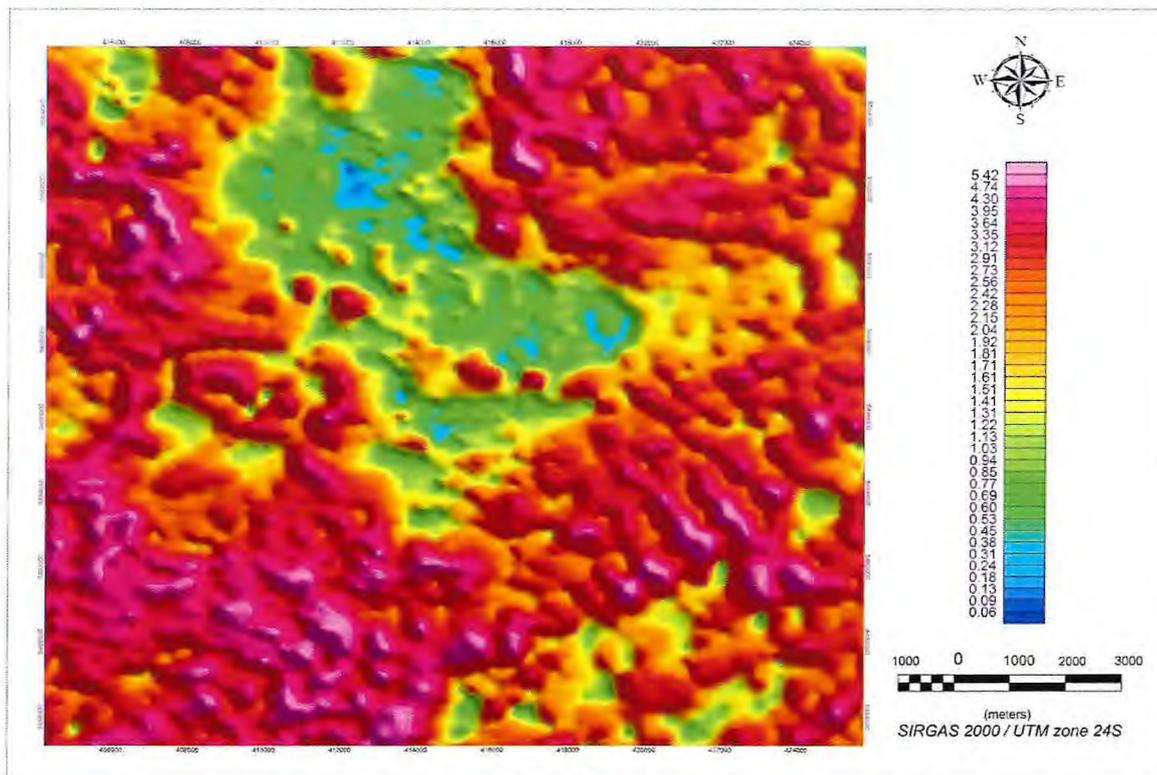
#### **4.2.2 Canal do Urânio**

Na crosta continental, o urânio apresenta um valor médio de 1,3 ppm, sendo sua concentração maior na parte superior da crosta (2,7 ppm) do que na inferior (0,2 ppm). Em ambiente oxidante é solúvel, formando minerais com óxidos de ferro e carbonatos. A figura 15 apresenta a distribuição do urânio obtida por aerogamaespectrometria para a área de estudo.

#### **4.2.3 Canal do Tório**

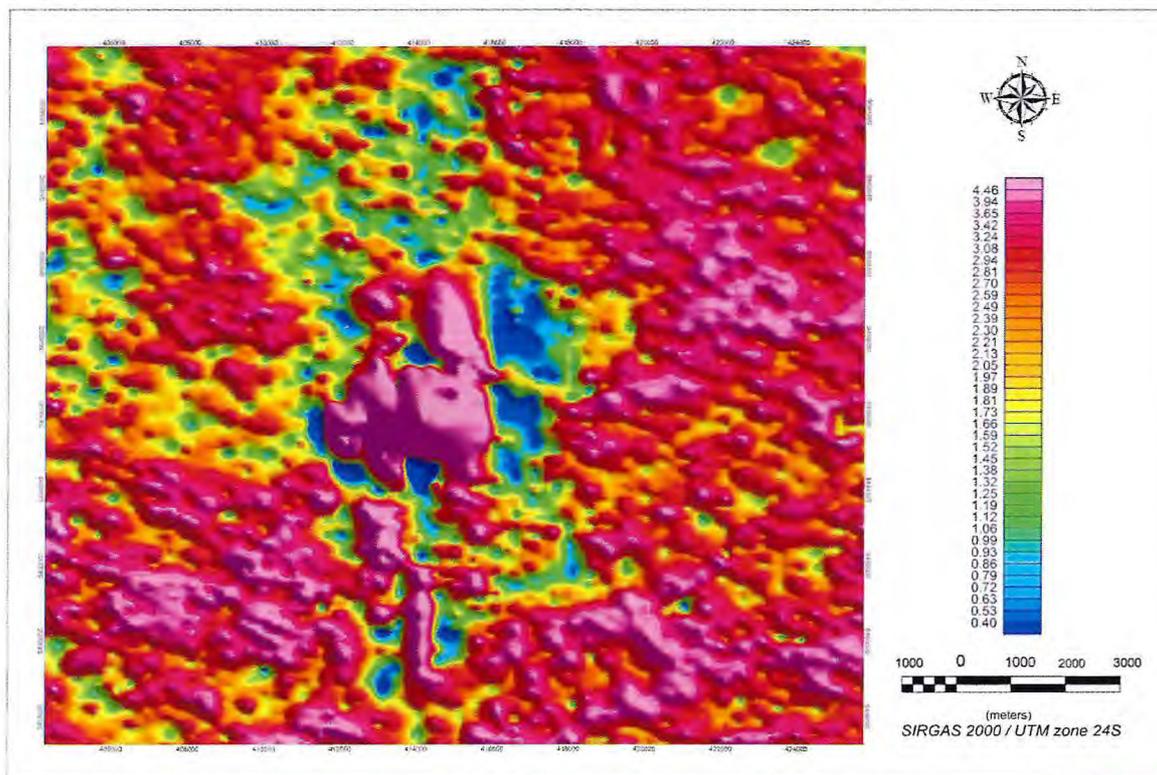
O tório, por sua vez, apresenta valor médio de 5,6 ppm ao longo da crosta continental, podendo atingir teor de até 10,5 ppm na parte superior enquanto que na parte inferior, bem mais exaurida, a concentração de tório é de aproximadamente 1,2 ppm (RUDNICK & GAO, 2004). É o elemento mais inerte dentre os três radioelementos estudados. Quando sua concentração é maior do que os demais, pode caracterizar regiões de maior intemperismo químico, marcando enriquecimento nesse elemento. O tório como radioisótopo de menor mobilidade química no ambiente natural, é normalmente considerado como o melhor “mapeador” geológico entre os três elementos utilizados em gamaespectrometria. Apesar de sua abundância na crosta ser pequena, é suficiente para delinear diferenças composicionais relevantes. A figura 16 apresenta a distribuição do tório obtida por aerogamaespectrometria.

Figura 14: Distribuição do potássio obtida por aerogamaespectrometria para a área de estudo



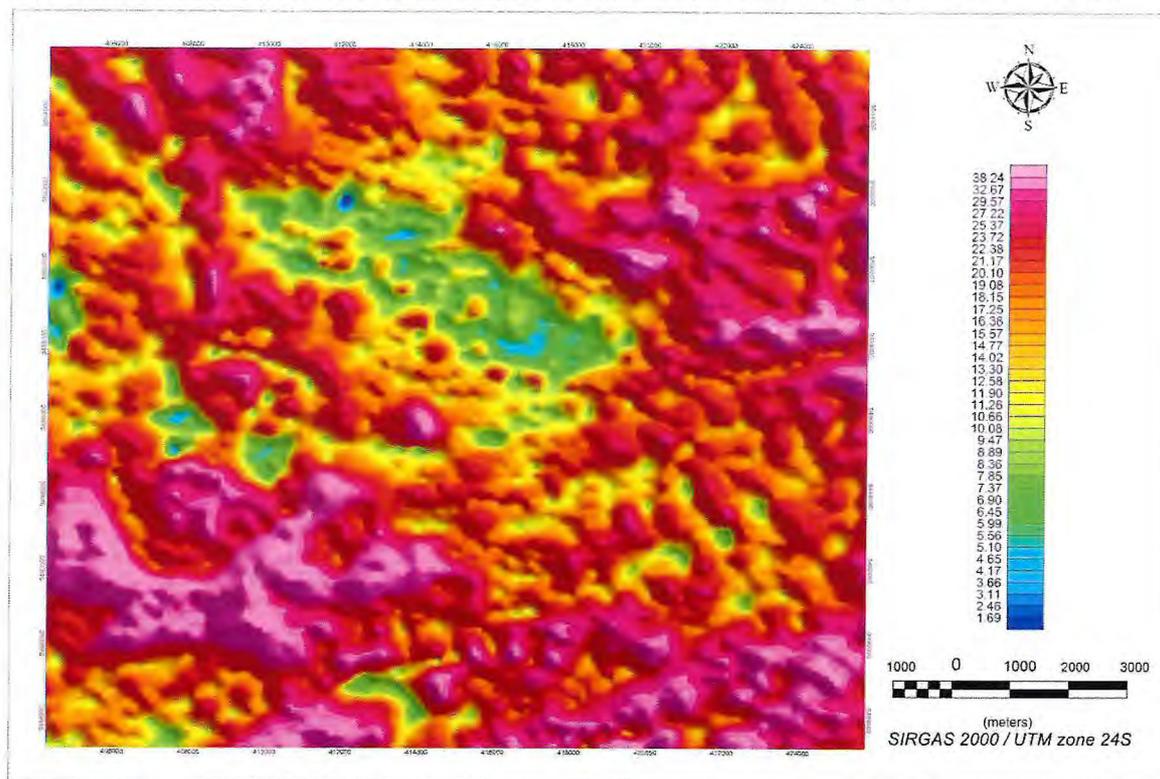
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 15: Distribuição do urânio obtida por aerogamaespectrometria para a área de estudo.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 16: Distribuição do tório obtida por aerogamaespectrometria para a área de estudo.

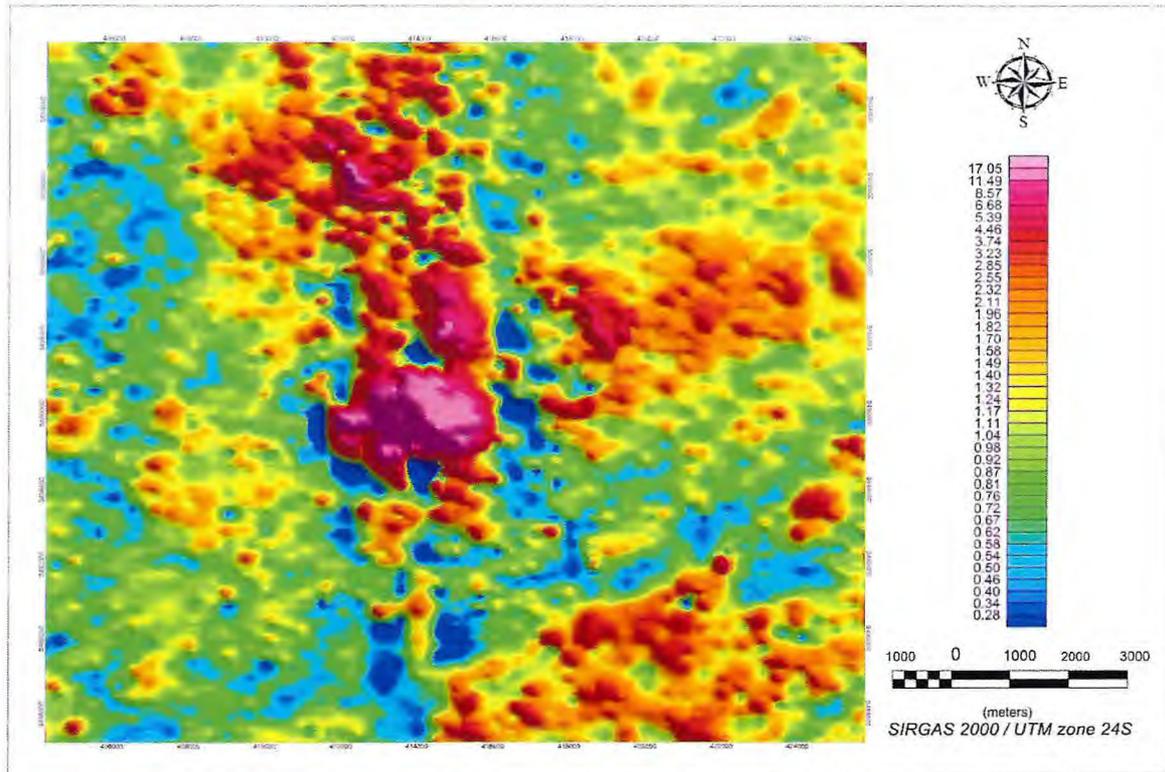


Fonte: elaborado pelo autor.

#### 4.2.4 Razões entre os três radioelementos (K, U e Th)

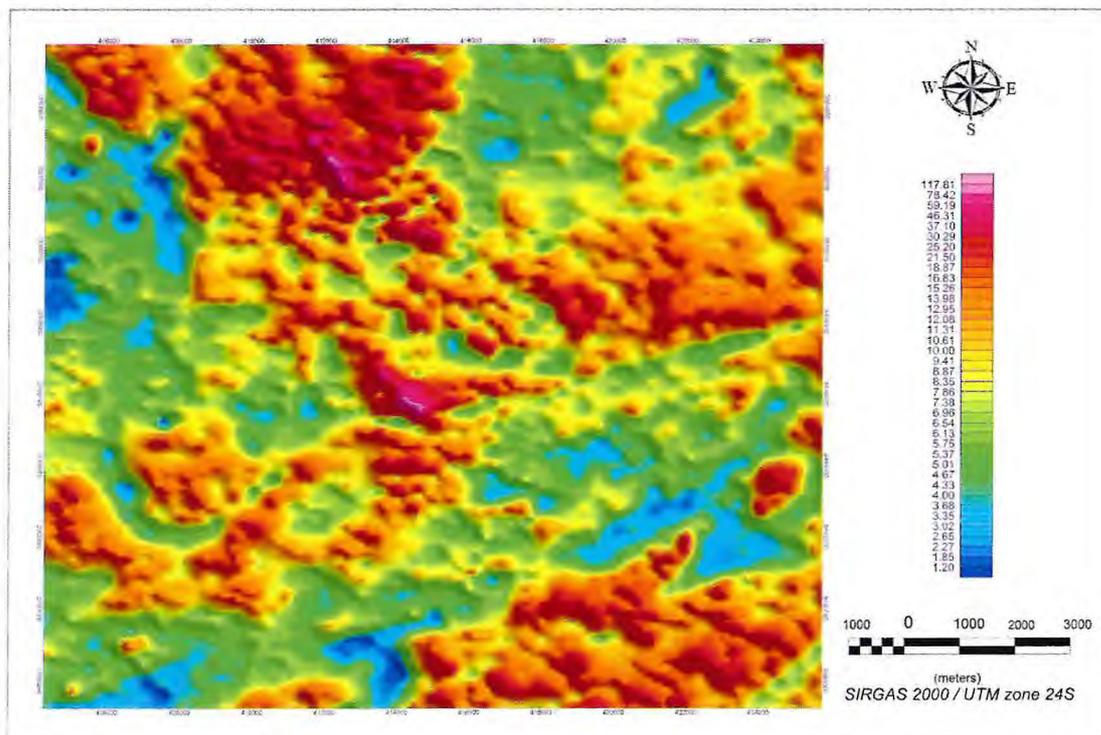
A partir das contagens individuais dos radioelementos é possível gerar os mapas de razões entre eles (U/Th, U/K e Th/K). Os mapas são utilizados para destacar a diferença observada entre as concentrações dos elementos radiométricos em corpos graníticos em uma mesma região ou mesmo identificação de áreas com forte alteração hidrotermal do tipo potássica e/ou sílica (dois tipos de alteração com maior concentração do elemento K). A diferença nos teores dos radioelementos fica evidente principalmente nos mapas de razão U/K (figura 17) e Th/K (figura 18), enquanto que o mapa de razão U/Th (figura 19) apresenta contraste menos significativo.

Figura 17: Mapa da razão U/K, com valores de razão variando entre 0,28 e 17,05.



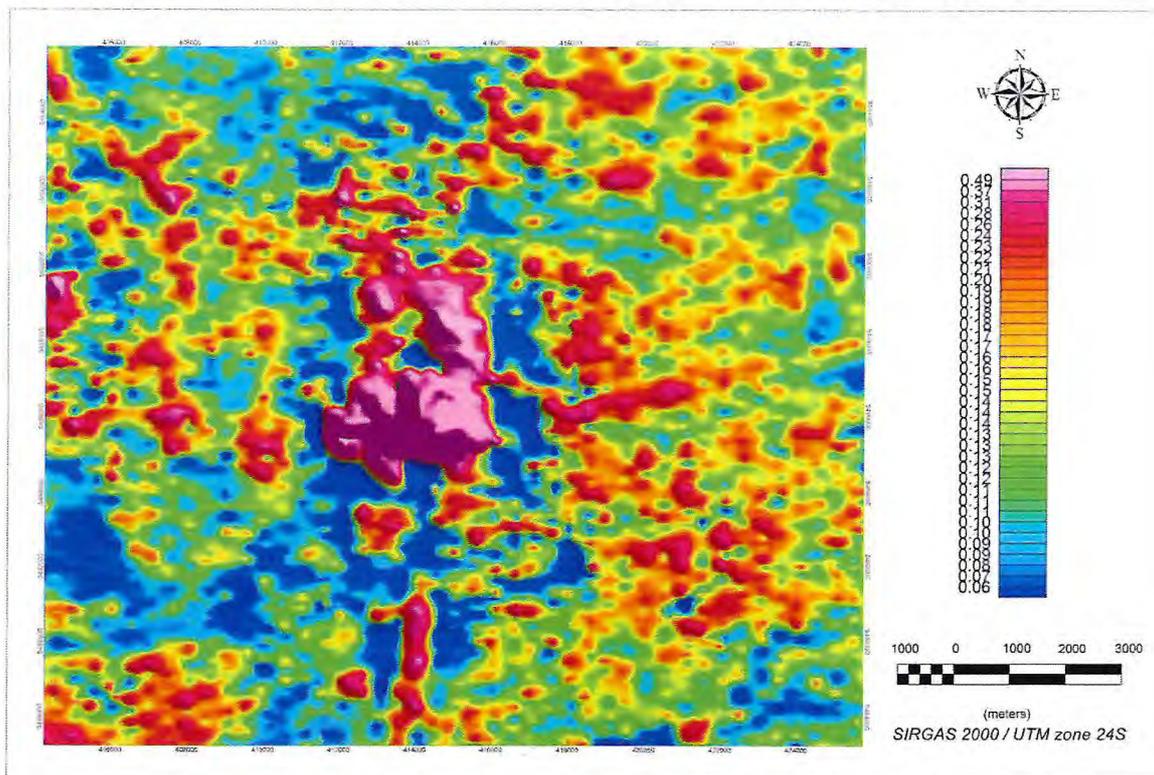
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 18: Mapa da razão Th/K, com valores de razão variando entre 1,2 e 117,8.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 19: Mapa da razão U/Th, com valores de razão variando entre 0,06 e 0,49.



Fonte: elaborado pelo autor.

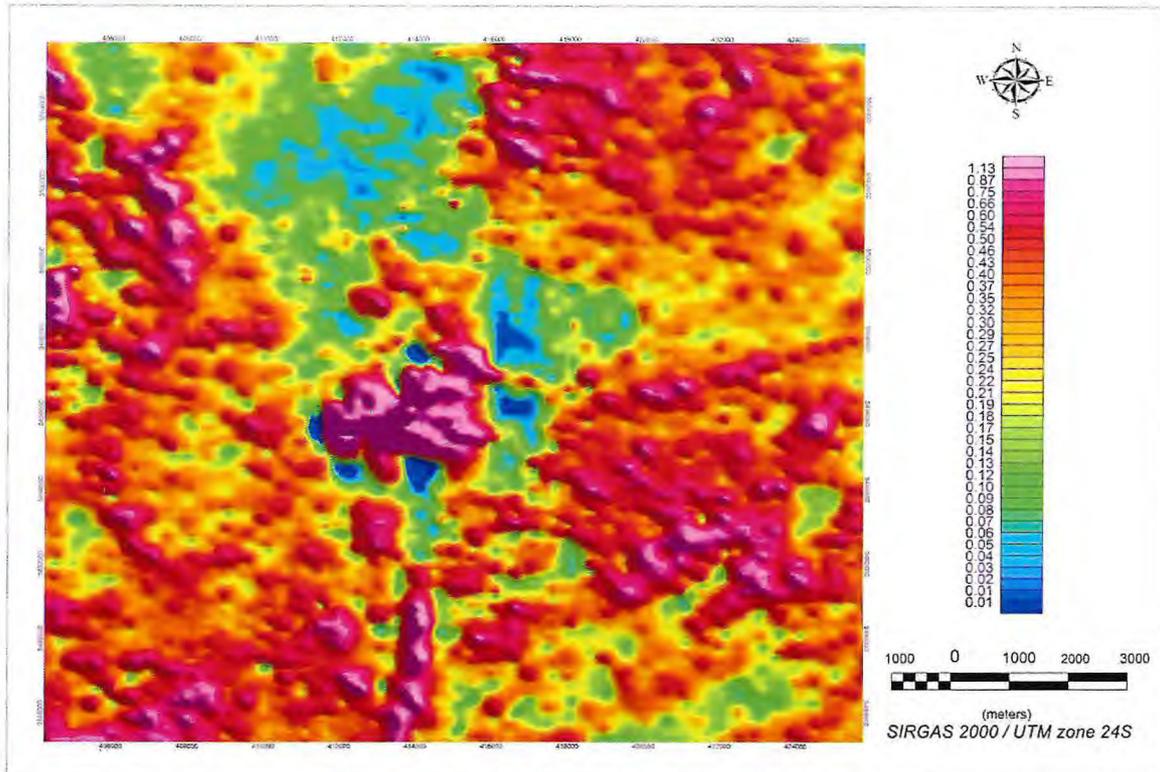
#### 4.2.5 Fator $F$

É possível analisar a razão entre os elementos radiométricos a partir do cálculo do parâmetro  $F$  (Gnojek & Prichystal 1985), que é definido por:

$$F = K \times \frac{eU}{eTh}$$

O mapa do parâmetro  $F$  (figura 20) realça o enriquecimento de potássio e urânio em relação ao tório, principalmente quando associado a áreas com alteração hidrotermal associado a mineralização (FERREIRA, 1991). Áreas com forte intemperismo e alta lixiviação do potássio tendem a apresentar valores para o parâmetro  $F$  muito baixos, enquanto que maciços rochosos que foram submetidos ao enriquecimento de potássio e urânio por alteração hidrotermal tendem a apresentar altos valores.

Figura 20: Mapa do fator F para a área de estudo.

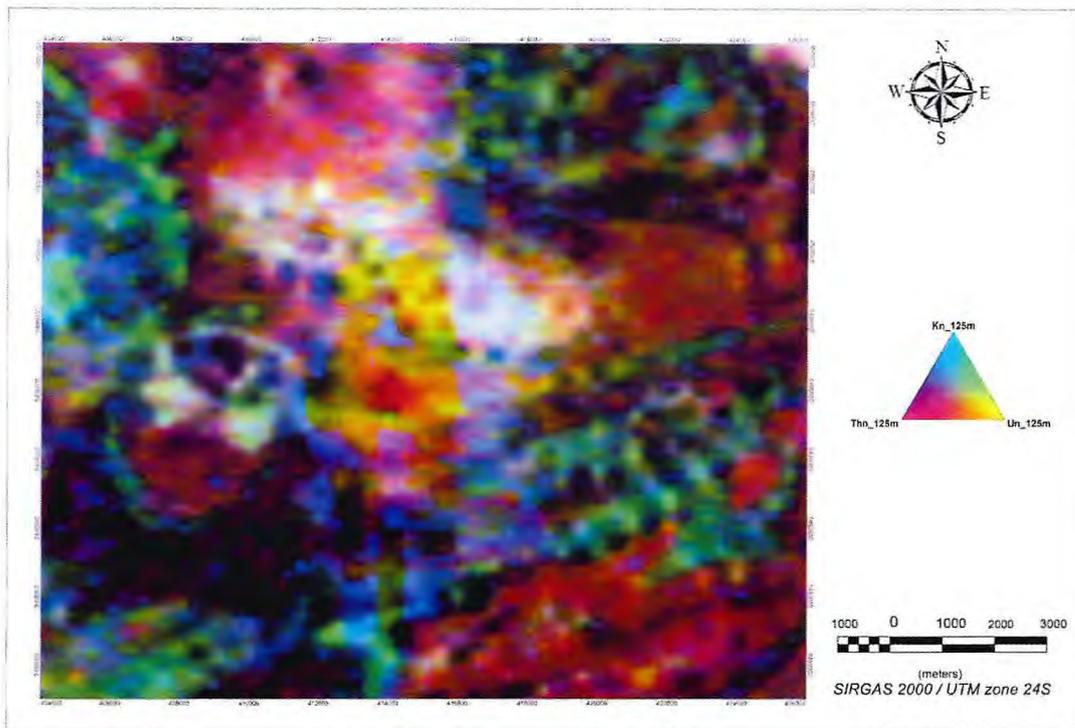


Fonte: elaborado pelo autor.

#### 4.2.6 Mapa Ternário

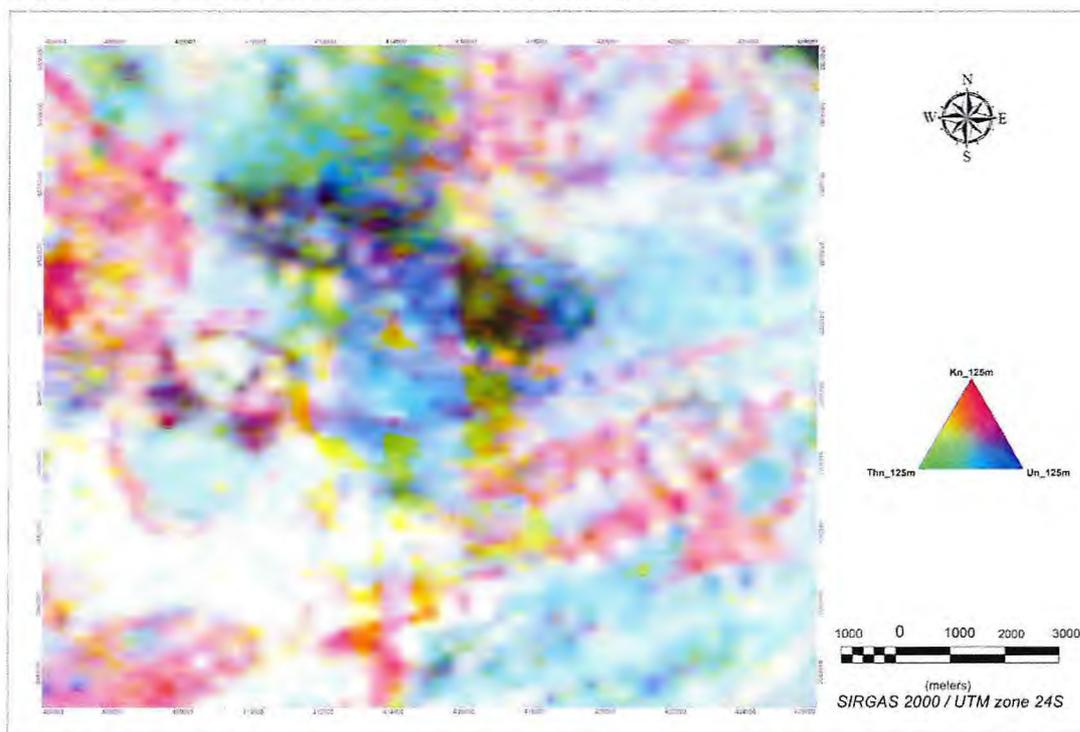
O mapa ternário dos elementos radiométricos é gerado a partir da associação de uma determinada cor a cada um dos radioelementos dependendo do padrão de coloração utilizado (RGB ou CMY). O padrão CMY por sua vez considera as cores ciano, magenta e amarelo (*Cyan, Magenta, Yellow*) como base para composição do mapa (Figura 21). O padrão RGB associa as cores vermelho, verde e azul (*Red, Green, Blue*) ao potássio (em %), tório e urânio (em ppm) respectivamente (Figura 22). Em ambos os padrões, as cores são associadas a cada um dos vértices de um triângulo equilátero, com gradações das cores variando de acordo com o teor de cada um dos elementos considerados.

Figura 21: Composição colorida C (K) M (Th) Y (U).



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 22: Composição colorida R (K) G (Th) B (U).



Fonte: elaborado pelo autor.

#### 4.2.7 Interpretação das Imagens Gamaespectrométricas

Para a interpretação de imagens gamaespectrométricas deve-se levar em consideração o conceito de desequilíbrio, que ocorre quando um ou mais produtos são completa ou parcialmente removidos ou adicionados ao sistema, devido a mecanismos químicos ou físicos (WILFORD *et al.*, 1997). São processos bastante comuns, especialmente em ambientes tropicais, e por esse motivo a utilização das imagens deve ser feita com cuidado, levando-se em consideração a possibilidade das concentrações medidas não representarem exclusivamente feições geológicas.

A interpretação das imagens gamaespectrométricas dos canais de tório, urânio e potássio é dependente do grau e natureza dos processos intempéricos e do transporte do material que constitui o regolito. Nas áreas onde o intemperismo ocorreu *in situ*, sem transporte de material, os solos tenderão a refletir as concentrações dos radioelementos subjacentes, porém em concentrações menores (GUNN, 1998). As concentrações geoquímicas superficiais dos radioisótopos tendem a se refletir nos levantamentos aéreos. O potássio e o tório correlacionam-se razoavelmente bem com as medidas aéreas, enquanto o mesmo não ocorre com o urânio. Isto deve-se à ocorrência de radônio na atmosfera, o qual é também um produto da cadeia de decaimento do Urânio. Esta pobre correlação pode explicar os valores baixos de eU normalmente medidos nos levantamentos gamaespectrométricos, bem como alto nível de ruído neste canal.

Na imagem RGB (figura 22) é possível identificar faixas de cor mais avermelhada/magenta, relativas às contagens de K, que se associam a ocorrência dos gnaisses da Fm. Barrigas. A cor azulada na composição RGB é devido aos altos valores de U.

A imagem do canal de tório foi bastante relevante para delinear as feições estruturais permitindo discriminar algumas unidades geológicas, definindo com bastante precisão seus limites. Em especial a estruturação de direção E-W ao qual o Litodema Alcantil: constituída por mármore puros e impuros, calcissilicáticas e hospeda a mineralização fóforo-uranífera (PITOMBEIRA, 2011) está associada. Essa delimitação fica mais visível ainda na imagem razão Th/K (figura 18). Ainda na imagem do canal do Tório, podemos verificar regiões com tons de azul, que representam anomalias negativas de Th. Elas caracterizam rochas de composição mais ácida, no caso da área de estudo, os quartizitos da Fm. Laranjeiras.

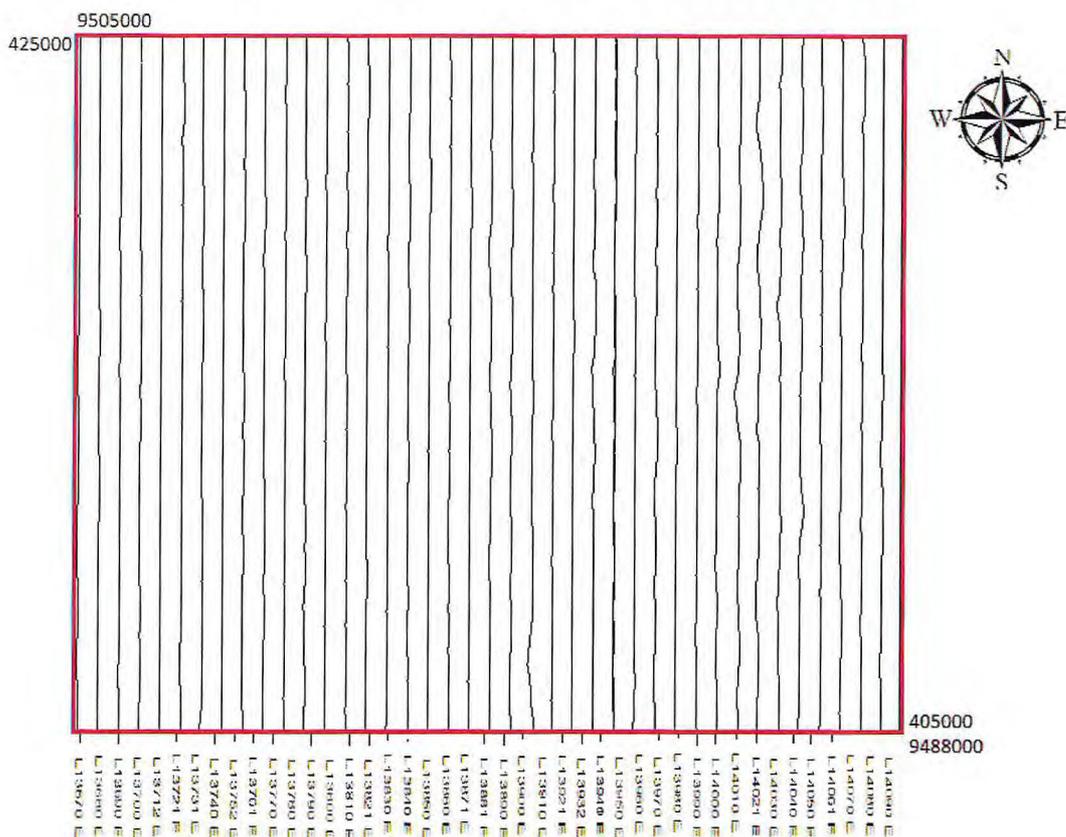
### 4.3 Integração dos Dados de Sensoriamento Remoto e Gamaespectrométricos em SIG

A partir das análises preliminares das imagens geradas dos canais dos raios elementos, as que melhor apresentaram informações relevantes ao estudo da área foram referentes aos canais do urânio e do tório. Desse modo, foi realizada uma análise mais criteriosa dos dados desses canais, onde foram exportados para ambiente SIG e sobrepostos aos resultados obtidos do PDI das imagens do sensor OLI.

Devido à grande quantidade de informações presentes no dado gamaespectrométrico, foi levado em conta alguns critérios para a seleção dos dados. Foram selecionadas apenas as linhas que cortam a área de estudo (Figura 23), que ao todo são 41 linhas de voo, e a maior anomalia de eU e eTh de cada linha. Depois, foi gerada uma tabela no *software* Excel e exportada para o *software* Arcgis 10.2.2 para sobrepor na imagem em tons de cinza da razão 2/6 na qual melhor representou a Formação Alcantil, hospedeira da mineralização. Podemos perceber que anomalias de tório marcam bem o *trend* da estrutural em que os mármores acompanham. Em cima da mineralização passam 3 linhas de voo que marcaram elevados valores de radiação para o canal do urânio. A maior anomalia de urânio apresenta-se bem no centro da jazida, onde a linha L13860 passa, com valor de 342,71 ppm. A figura 24 apresenta o perfil da linha L13860, representando o valor anômalo de urânio. À esquerda e à direita da jazida, apresenta valores também elevados com 130,32 e 133,15, respectivamente.

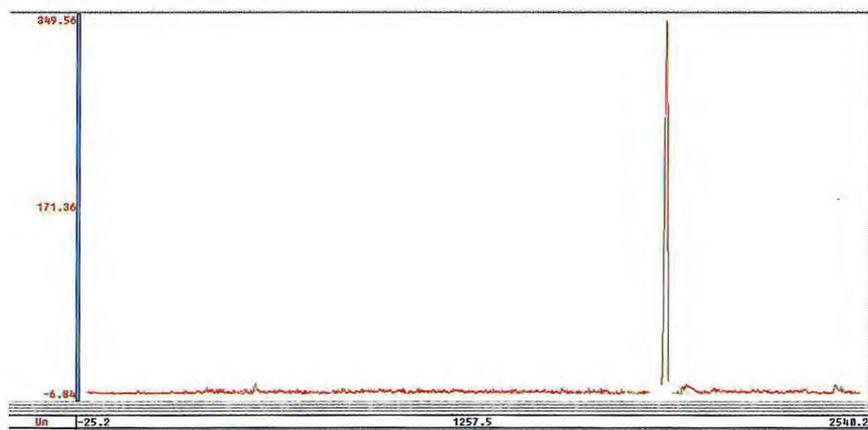
A Figura 25 apresenta a integração entre a imagem em tons de cinza da razão entre as bandas 2/6 da área em estudo e os dados gamaespectrométricos referentes canais do urânio e tório.

Figura 23: Linhas de voo do Projeto Norte Ceará que cortam a área de estudo.



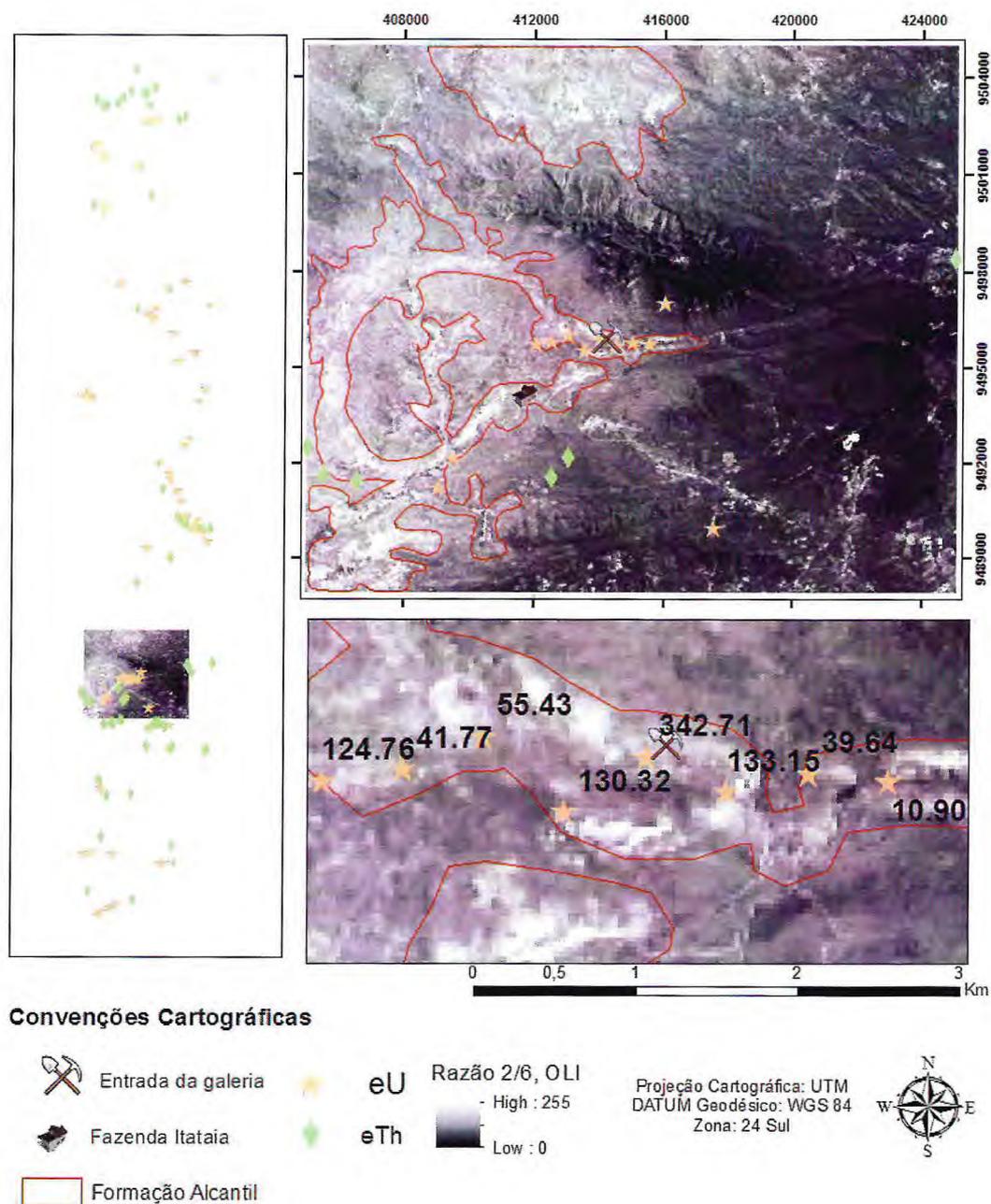
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 24: Perfil da linha de voo L13860 do aerolevante Norte Ceará, referente ao canal do urânio.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 25: Integração em ambiente SIG dos dados gamaespectrométricos referentes canais do urânio e tório e imagem em tons de cinza da razão entre as bandas 2/6 do sensor OLI.



Fonte: Elaborado pelo autor.

## 5. CONCLUSÃO

As técnicas de PDI aplicadas às bandas 2,3,4,5,6,7 e 8 do satélite Landsat 8, geraram bons resultados, permitindo o realce dos contatos entre as principais litologias da área de estudo. A composição R5, G4, B3 destacou bem o relevo e as principais estruturas da região. As imagens em pseudocor em que apresentam as razões entre as bandas 2/6 e 5/7, e a subtração entre as bandas 4-2, destacaram as Formações Laranjeiras e Alcantil. Ao apresentar essa matemática entre bandas no espaço RGB, onde a razão 2/6 no vermelho, 4-2 no verde e 5/7 no azul, demonstrou a interação entre as litologias predominantes na área.

As imagens geofísicas geradas para este trabalho foram avaliadas individualmente e permitiram a delimitação de regiões de diferentes características gamaespectrométricas, principalmente do canal do Tório, a razão U/Th e o fator F, que possibilitaram uma melhor definição dos controles da mineralização de urânio presente. As imagens que apresentam a contribuição do canal do tório marcaram bem as feições estruturais E-W que acompanham os mármores da Formação Alcantil. A imagem do fator F evidenciou as regiões com enriquecimento de urânio por alteração hidrotermal, onde tendem a apresentar altos valores.

Os dados gamaespectrométricos foram apresentados em ambiente SIG sobrepostos à imagem da razão entre bandas 2/6 do sensor OLI, representaram qualitativamente a anomalia de urânio presente na Mina de Itataia e seu entorno.

Os resultados obtidos nos processamentos aplicados as imagens orbitais e gamaespectrométricas indicaram algumas áreas-alvo, entretanto testes mais apurados devem ser conduzidos.

Devido a resolução espectral da imagem Landsat 8 não foi possível o realce do minério colofanito. Assim para trabalhos posteriores de sensoriamento remoto, sugere-se o emprego sensores multiespectrais com um maior número de bandas no SWIR (*Short Wave Infrared*), como por exemplo, o sensor ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) que possui 6 bandas no SWIR, ou ainda, o emprego de sensores hiperespectrais, tais como o HYPERION.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, A. R., PARENTE, C. V., ARTHAUD, M. H., (2008) **Geologia da Folha Itatira (SB.24-V-B-V), CPRM.**

ALMEIDA, F. F. M.; Hasui, Y.; Brito Neves, B.B.; Fuck, R. (1977) **Províncias estruturais brasileiras.** In: VIII Simp. Geol. Nordeste, Campina Grande, Atas, p. 363-391.

AMARAL, Wagner da Silva. **Integração de dados Aerogeofísicos e sua contribuição a evolução geodinâmica do Domínio Ceará Central, Província Borborema.** 2007. 165 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geociências, Instituto de Geociências, Unicamp, Campinas, 2007.

AMARAL, W. S., 2011. **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. 22p.

ARTHAUD, M.H., VASCONCELOS, A.M. & OLIVEIRA, F.V.C. 1998. **As sequências metasedimentares do Ceará Central.** XL Congresso Brasileiro de Geologia, Belo Horizonte-MG, Anais, pág. 16

ARTHAUD, M. H. (2007). **Evolução neoproterozóica do grupo Ceará – domínio central, NE Brasil: da sedimentação à colisão continental brasiliana.** Tese (Doutorado em Geociências). Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília. 132 p.

BRIGGS, I. C., 1974. **Machine contouring using minimum curvature.** Geophysics, 39 (1): 38-48

BRITO-NEVES, B.B. 2000. **Tectonic history of the Borborema Province, NW Brazil.** In: Cordani U.G. Milani, E.J., Thomaz Filho A., Campos D.A. (eds) Tectonic Evolution of South American, Rio de Janeiro, 151-182 p.

CASTRO, N. A., 2004. **Evolução Geológica Proterozóica da Região entre Madalena e Tapera, Domínio Tectônico Ceará Central (Província Borborema).** Inst. Geociências, USP, São Paulo, Tese de Doutorado, 221p.

CASTRO, G. L.; PARENTE, C. V.; VERÍSSIMO, C. U. V; SIAL, A. N.; GARCIA, M. G. M. SANTO, R. V.; MELO, R. C.; SANTOS, A. A. (2005) **Isótopos de carbono e oxigênio dos mármores associados com o depósito fósforo uranífero de Itataia, Ceará.** *Rev. Bras. Geoc.*, 35(2):199-208.

CABY, R. A. & ARTHAUD, M.H. (1986). **Major Precambrian nappes of the Brazilian belt, Ceará, northeast Brazil.** *Geology*, v. 14; p. 871 e 874.

CABY, R.; SIAL, A. N.; ARTHAUD, M. AND VANCHEZ, A., 1990. **The west African Orogens and Circun – Atlantic Correlatives.** R. D. Dallmeyer S.P. Lecorché (ed) Springer. Verlg. 405, 196.

CABY, R.; SIAL, A.; ARTHAUD, M. H.; VAUCHEZ, A., 1991. **Crustal evolution and Brasiliano orogeny in Northeast Brazil.** In: DALLMEYER, R.D. & LECORCHÈ, J.P. (ed.) **The West African Orogens and Circun Atlantic Correlatives**, Springer-Verlag, 373-397.

CAVALCANTE, J. C. 1999. **Limites e evolução do Sistema Jaguaribeano, Província Borborema, Nordeste do Brasil.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil.

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., BE NEVIDES, H.C. 2003. **Mapa Geológico do Estado do Ceara - Escala 1:500.000.** Fortaleza, Ministerio das Minas e Energia/Companhia de Pesquisa de Recurso Minerais.

CPRM -2009. **Projeto Aerogeofísico Norte do Ceará. Relatório Final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos.** Brasília, 300p.

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, kp.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.

FETTER, A. (1999). **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.** Ph.D. thesis. Department of Geology, Kansas University, Lawrence, KS, USA. 164 p.

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., 2003. **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, No. 2, 265-273 p.

FERREIRA, F. J. F. **Aerogamaespectrometria e aeromagnetometria de um trato ocidental do Pré-Cambriano paulista.** São Paulo, 1991. Tese de doutoramento Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 170p.

GNOJEK I., PRICHYSTAL A. 1985. **A new zinc mineralization detected by airborne gamma-ray spectrometry in Northern Moravia (Czechoslovakia).** *Geoexploration*. 23(4):491-502.

GUNN P.J. 1998. **Interpretation of airborne magnetic and radiometric surveys.** Course. Canberra: AGSO Australian Geological Survey Organisation. 150p.

HARRIS, J. R., BOWIE, C. , RENCZ, A. N., GRAHAM, D. **Computer-enhancement techniques for the integration of remotely sensed, geophysical, and thematic data for the geosciences.** *Canadian Journal of Remote Sensing*, [S.l.], v. 20, n. 3, p. 210-221, 1994.

IAEA, **International Atomic Energy Agency, 2003. Guidelines for radioelement using gamma ray spectrometry data.** Viena, 173p

INB, **Indústrias Nucleares do Brasil. INB Santa Quitéria.** 2011. Disponível em: [http://www.inb.gov.br/inb/webforms/interna.aspx?secao\\_id=52](http://www.inb.gov.br/inb/webforms/interna.aspx?secao_id=52). Acesso em: 09 fev. 2011.

IBGE, **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Santa Quitéria (CE)**. In: IBGE Cidades. Disponível em:

<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/xtras/perfil.php?codmun=231220&r=2>. Acesso em: 09 fev. 2011.

MARTINS, G., 2000. **Litogeoquímica e Controle Geocronológicos da Suíte Metamórfica Algodões-Choró**. Inst. De Geociências, UNICAMP, Campinas-SP, Tese de Doutorado, 218p.

MENDONÇA, J.C.G.S.; BRAGA, A.P.G.; CAMPOS, M. (1980) **Considerações sobre a mineralização fósforo-uranífera da jazida de Itataia-CE**. Anais do XXXI Congr. Bras. Geol., Santa Catarina, vol. 4, p.2472-2486.

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

MENEZES, P. R.; ALMEIDA, T. 2012. **Introdução ao processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto**. UNB - Universidade de Brasília; CNPQ – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. Brasília, 2012, 276p. Disponível em: <http://www.cnpq.br/documents/10157/56b578c4-0fd5-4b9f-b82a-e9693e4f69d8>

MINTY B.R.S. 1988. **A review of airborne gamma-ray spectrometric data-processing techniques**. Canberra: Australian Gov. Publ. Service. 48 p.

Neves, S. B. (2009). **The age distributions of detrital zircons in metasedimentary sequences in eastern Borborema Province (NE Brazil): Evidence for intracontinental sedimentation and orogenesis?** . *Precambrian Research*, V.175: 187-205.

NOVO, E. M. L. DE M.. 2008. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**. – São Paulo: Blucher. p. 152-161.

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

OSAKO, L.S.; AMARAL, G. **Extração de informações espectrais do Landsat-5/TM na Província Uranífera de Lagoa**. In: IX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2015, João Pessoa – PB. Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Santos - SP, 11-18 setembro 1998, INPE, p. 431-441.

PITOMBEIRA, J. P. A. **Geologia da região de Itataia (Santa Quitéria – CE)**. 2011. 81 f. TCC (Graduação) - Curso de Geologia, Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

RAJESH, H.m.. **Mapping Proterozoic unconformity-related uranium deposits in the Rockhole area, Northern Territory, Australia using landsat ETM+**. Disponível em: <[www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)>. Acesso em: 11 fev. 2007

RAMOS, L. N. R. A. **Dados gamaespectrométricos e magnetométricos aéreos aplicados ao mapeamento geológico e à exploração de ouro na região de fazenda Nova, porção leste do arco magmático de Arenópolis-GO**. 2010. 148 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Laboratório de Geofísica Aplicada, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2010

ROSA JUNIOR, C.A.; MARANHAO, R.M.R.; DUARTE, C.R. **Contribuição à Geologia da Região da Jazida de U-P de Itataia /CE a Partir de Estatística de Bandas e Processamento Digital de Imagens Landsat**. In: XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2015, João Pessoa – PB. Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. São José dos Campos – SP: INPE, 2015. p. 4123-4130.

RUDNICK R., GAO S. 2004. **Composition of the continental crust**. In: Holland H.D., Turekian N.N. eds. Treatise on geochemistry. Oxford: Elsevier Per Oxford: Elsevier Pergamon. 3:1-64

SANTOS, T. J. S., FETTER, A., HACKSPACHER, P., VAN SCHUMS, W. AND NOGUEIRA NETO, J. 2004. **Structural and geochronological studies of the Médio Coreaú Domain, NE Brazil: Constraints on Brasiliano/Pan-African tectonic evolution in the NW part of the Borborema Province**. In: 158 (eds.) Weinberg, R., Trouw, R., Fuck, R. and Hackspacher, P., The 750-550 Ma Brasiliano Event of South America, Journal of the Virtual Explorer, Electronic Edition, ISSN 1441-8142, Volume 17, Paper 9.

Silva, J.R.A. **Caracterização hidrogeológica da jazida de Itataia-CE**. 2003 – Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2003.

TEIXEIRA, M.L.A. 2005. **Integração de Dados aerogeofísicos, Geológicos e Isotópicos do Limite Norte do Complexo Tamboril-Santa Quitéria-CE, Província Borborema.** Inst. de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, Dissertação de Mestrado, 86 p.

UCHÔA, E. B. **Uso de Sensoriamento Remoto (Lansat-5 TM e ASTER) para realçar depósitos de minerais carbonáticos em Independência/CE.** 2011. 71 f. TCC (Graduação) - Curso de Geologia, Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

VASCONCELLOS, R. M.; Metelo, M. J.; Motta, A. C.; Gomes, R. D. **Geofísica em levantamentos geológicos no Brasil.** Rio de Janeiro: CPRM, 1994.

WILFORD J.R., BIERWIRTH P.N., CRAIG M.A. 1997. **Application of airborne gamma-ray spectrometry in soil/ regolith mapping and applied geomorphology.** Journal of Australian Geology & Geophysics, 17(2): 201-216.

Wilford, J., Worrall, L. and Minty, B., 2009. **Radiometric Map of Australia provides new insights into uranium prospectivity.** AUSGEO News, 95 (Sep 2009), 7-10.