

Emprego de Sensoriamento Remoto e Aerogamaespectrometria na Avaliação da Mineralização Fósforo-Uranífera de Itaitaia-CE

Mateus de Paula Miranda¹
Cynthia Romariz Duarte²
Michael Vandesteen Silva Souto²
Daniel Dantas Moreira Gomes³

¹ Programa de Pós-graduação em Geologia – Universidade Federal do Ceará – UFC
Av. Humberto Monte, s/n, Campus do Pici, Bloco 912 – Fortaleza – CE – 60.455-760
mateuspmiranda@gmail.com

² Laboratório de Geoprocessamento – Departamento de Geologia – Universidade Federal do Ceará – UFC Av. Humberto Monte, s/n, Campus do Pici, Bloco 912 – Fortaleza – CE – 60.455-760 {cynthia.duarte, micalael.souto}@ufc.br

³ Universidade de Pernambuco – Campus de Garanhuns/PE. Rua Cap. Pedro Rodrigues, 105 – São José, Garanhuns/PE CEP: 55294-902. daniel.gomes@upe.br

Abstract. This project aimed to characterize the phosphorus-uranium of Itaitaia 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 color composition with bands math 2/6, 4-2 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. The anomaly associated with the deposit of Itaitaia is notable, 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 using HSI transformation and allow us to view the geological units and the body of mineralization.

Palavras-chave: remote sensing, gamaray espectrometry, geology, sensoriamento remoto, gamaespectrométrica, geologia.

1. Introdução

A jazida fósforo-uranífero de Itaitaia foi descoberta em 1976 pela NUCLEBRÁS (atual INB – Indústrias Nucleares do Brasil S.A.) durante o Projeto Canindé, devido a uma anomalia radiométrica localizada em Santa Quitéria, Ceará (Figura 1). A jazida de Itaitaia possui reservas geológicas de 142,5 mil toneladas de urânio associado ao fosfato, das quais a reserva lavrável tem cerca de 79,5 milhões de toneladas de minério com teores de 11% de P₂O₅ e 998ppm de U₃O₈, contendo neste minério, 8,9 milhões de toneladas de P₂O₅ e 79,3 mil toneladas de U₃O₈. Nesta área, a INB dispõe também de reservas de cerca de 300 milhões de m³ de mármore, totalmente isento de urânio (INB, 2011).

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 voltados à prospecção mineral, atualmente é realizada através de *softwares* 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. Neste trabalho, foram empregados técnicas de processamento digital de imagens (PDI) em dados oriundos do sensor OLI do satélite Landsat 8, integrados a dados gamaespectrométricos do Projeto Aerogeofísico Norte Ceará, através de técnicas de transformação IHS, o que gerou bons resultados, realçando o entorno da mineralização.

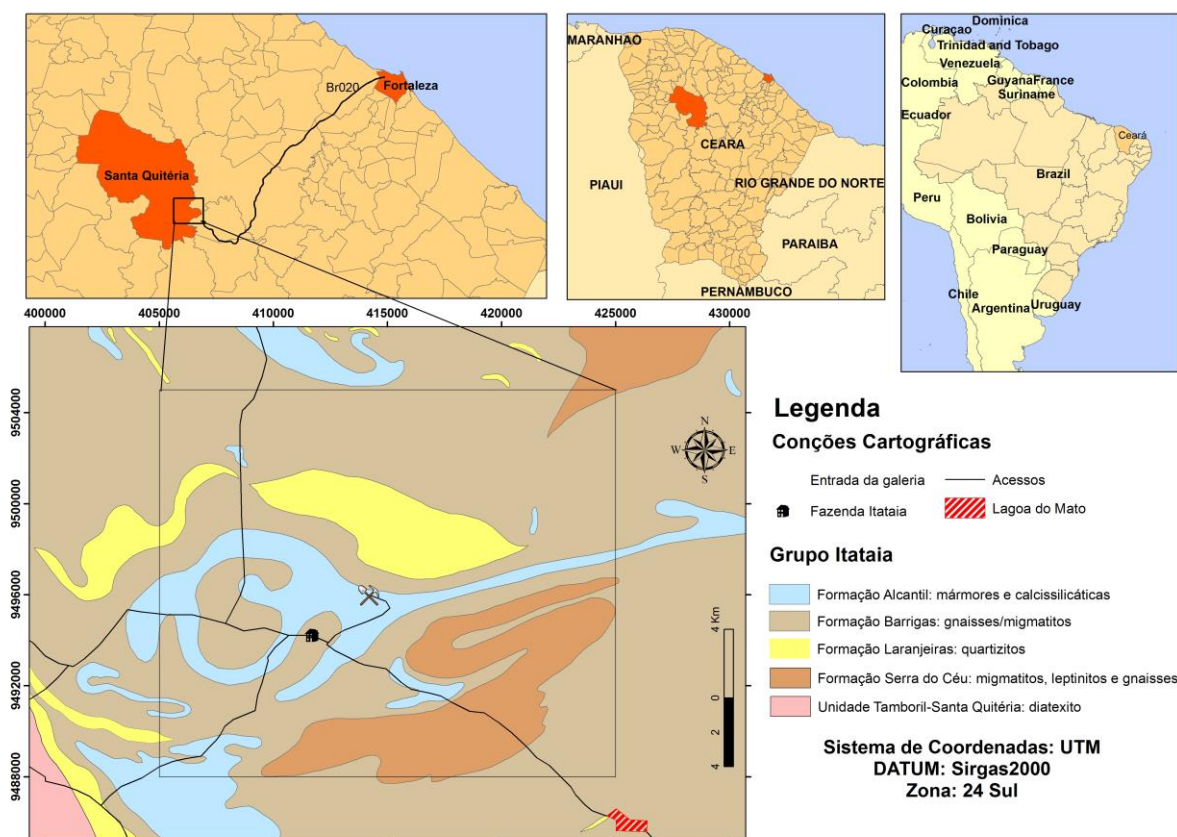


Figura 1: Mapa de localização da área de estudo.

2 Geologia da área

A jazida de Itaitaia 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 Itaitaia, de natureza transgressiva, tem na base migmatitos, sotopostos por quartzitos e gnaiesses, capeados por mármores 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).

Segundo Castro *et al.*, (2005), o colofanito ocorre sob diferentes formas e associações, concentrando-se preferencialmente em mármores e rochas cálcio-silicáticas da Formação Alcantil. De acordo com esses autores, o depósito de Itaitaia contém pelo menos 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 mármores 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. A Tabela 1 apresenta o esquema estratigráfico da área de estudo.

Tabela 1: Esquema estratigráfico da área de estudo. Rosa Jr *et al.* (2015)

ESQUEMA ESTRATIGRÁFICO	
QUATERNÁRIO	Aluviões e Terraços Fluviais – sedimentos conglomeráticos, arenosos e argilosos inconsolidados.
JURÁSSICO	Diques Básicos – diabásios.
CAMBRO-ORDOVICIANO	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 – mármore cristalinos e calcissilicáticas; Formação Barrigas – gnaisses e migmatitos; Formação Laranjeiras – quartzitos; Formação Serra do Céu – migmatitos, leptitos, gnaisses e anfíbolitos.

3. Metodologia do Trabalho

Para a realização deste trabalho foram utilizadas as imagens digitais do Landsat-8/OLI obtidas gratuitamente no site do USGS (<http://earthexplorer.usgs.gov/>) e dados aerogamaespectrométricos oriundos do Projeto Aerogeofísico Norte Ceará, cedidos pela CPRM.

3.1. Processamento das imagens de satélite:

As imagens de satélite usadas neste trabalho são correspondentes órbita 217 / ponto 63, obtidas no dia 24 de outubro de 2015, durante a época da seca que ocorre na região entre os meses de maio a setembro, visando obter uma menor influência da cobertura vegetal e maior exposição do solo. Antes do processamento das imagens de satélite foi necessário minimizar os efeitos do espalhamento atmosférico. Para correção atmosférica foi utilizada a técnica denominada de *Dark Subtraction*, que se baseia na subtração de um valor de cinza que representaria o efeito de espalhamento, determinado para cada banda isolada. As bandas 2, 3, 4, 5, 6 e 7 do sensor OLI foram utilizadas para o PDI, tendo em vista que elas abrangem do visível ao infravermelho de ondas curtas (SWIR). As demais bandas deste sistema foram descartadas, pois não eram pertinentes aos objetivos deste trabalho. Após selecionadas as bandas, com o intuito de melhor representar os litotipos da área, foram geradas imagens coloridas RGB, razões entre bandas e Análise por Principais Componentes (APC).

A 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 razão entre bandas consiste na divisão de pixel de uma banda pelo pixel de posição correspondente de outra banda.

A Análise por Principais Componentes (APC), também chamada de Transformação por Principais Componentes ou Transformada de Karhunen-love, é uma das funções de processamento de imagens mais poderosas na manipulação de dados multiespectrais, cuja a principal função é determinar a correlação entre as bandas multiespectrais e, através de uma transformação matemática apropriada, removê-la (CRÓSTA 1992).

3.2. Processamento dos dados gamaespectrométricos

Rotinas de micronivelamento desenvolvida por Blum (1999) com base nas técnicas propostas de Minty (1991) foram aplicadas aos dados gamaespectrométricos, visando eliminação de distorções (tendências) presentes nas linhas de voo. Após o micronivelamento foi realizada a normalização dos canais K, eU, eTh e CT, pelo ajuste das médias, a fim de eliminar os valores negativos (*dummies*). Para gerar as grades regulares (*Grids*) adotou-se o método de interpolação por curvatura mínima (célula de 125 m), segundo Briggs (1974). Cabe ressaltar que esta etapa de pré-processamento não incluiu as correções de rotina de levantamentos aerogamaespectrométricos, como as de altura, de *background*, e do efeito Compton, uma vez que os dados digitais brutos de K, eU, eTh e contagem total, foram cedidos pela CPRM já corrigidos.

Após essa fase foram gerados os seguintes produtos: mapas radiométricos de concentrações de potássio (K em %), equivalente Tório (eTh em ppm), equivalente Urânio (eU em ppm) e Contagem Total (CT em $\mu\text{R/h}$), razão entre os canais eTh/K, eU/K e eU/eTh. Por fim, foram elaboradas composições ternárias em falsa-cor RGB (Red, Green, Blue) e CMY (Cyan, Magenta, Yellow).

3.3. Integração das imagens de satélite e dados gama

A integração das imagens geradas pelo PDI das bandas 2, 3, 4, 5, 6 e 7 com as imagens gama (K, eTh, eU, CT, RGB, CMY, U/Th, U/K e Th/K) se deu pela aplicação de técnicas de transformação IHS (*Intensity, Hue, Saturation*), tendo sido testadas diferentes combinações até obter-se uma imagem que melhor as características da área estudada.

4. Resultados e Discussão

As técnicas de PDI empregadas neste trabalho objetivaram ressaltar a distribuição dos diferentes litotipos presentes na área. A figura 2 apresenta as imagens geradas através da matemática das bandas 2/6, 4-2, 5/7 em pseudocor e em composição colorida RGB.

A imagem da Figura 2a apresenta a razão entre as bandas 2/6 em pseudocor. A partir dessa razão foi possível destacar em vermelho os mármores da Formação Alcantil. A imagem apresentada na Figura 2b apresenta a subtração de bandas 4-2 em pseudocor e destaca os corpos ricos em óxidos e hidróxidos de ferro (vermelho) que se encontram distribuídos na porção sudoeste e norte da área de estudo. 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 evidenciando menores teores de óxidos e hidróxidos de ferro.

Rosa Jr *et al.* (2015) utilizaram a razão entre as bandas 4 (infravermelho próximo – NIR) e 7 (infravermelho médio – MIR) com o Landsat 5 para realçar a Formação Laranjeiras. Utilizando como base essa metodologia, aplicou-se o mesmo tratamento às bandas correspondentes do sensor OLI, sendo respectivamente as bandas 5 e 7 (Figura 2-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 quartzitos da Formação Laranjeiras (em vermelho) e os migmatitos/gnaisses da Formação 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 quartzitos nas drenagens que cortam a área.

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 2-d). Essa composição apresentada na Figura 2d possibilitou visualizar os mármores da Formação Alcantil em tons vermelho-alarajando e os quartzitos da Formação Laranjeiras em azul.

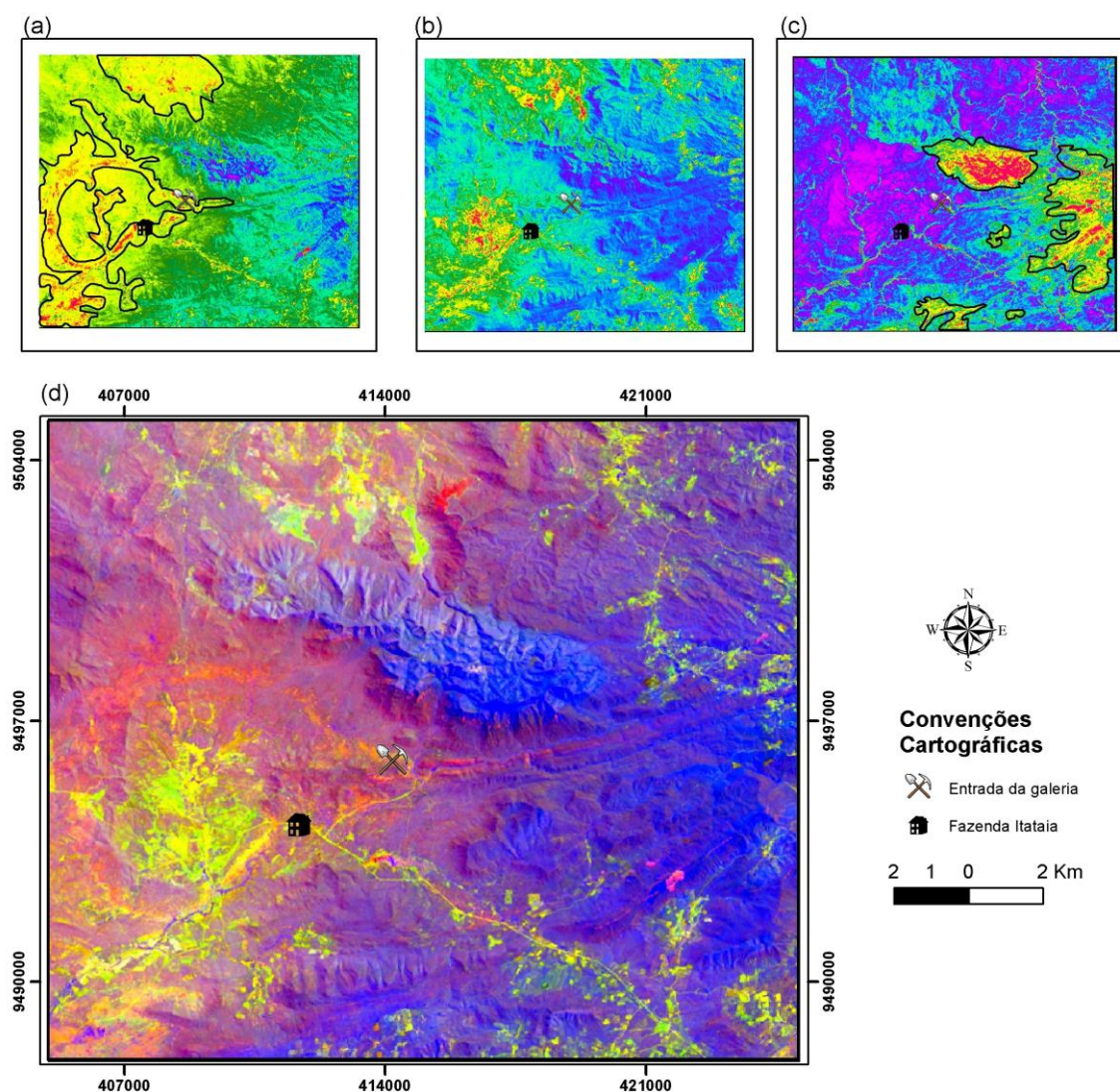


Figura 2: (a) Razão das bandas 2/6 em pseudocor, destacando Fm. Alcantil; (b) Subtração entre as bandas 4-2 para óxidos, em pseudocor; (c) Razão das bandas 5/7 em pseudocor, destacando Fm. Laranjeiras. (d) RGB 2/6, 4-2, 5/7 respectivamente.

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 2, onde foram empregadas 6 bandas que abrangem os espectros do visível e infravermelho do sensor OLI.

Tabela 2: Matriz de autovetores da ACP com as bandas 2, 3, 4, 5, 6 e 7 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

Na Análise por Principais Componentes, rotaciona-se as 6 bandas do sensor e obtêm-se seis dados de saída, que são as bandas PCs. Essas novas bandas não apresentam nenhuma correlação entre si, sendo que a 1PC representa cerca de 90% da variância do conjunto de dados. Sendo que esse valor diminui à medida que se aproxima das últimas PCs. Ou seja, as três primeiras PCs contém quase que a totalidade da informação e as três últimas apresentam apenas “ruídos”. Tendo isso em vista foi gerada uma composição colorida com as três primeiras PCs onde, a PC1 foi colocada no canal do vermelho, a PC2 no verde e a PC3 no azul (Figura 3). Nessa imagem nota-se claramente a Formação Alcantil em tons de vermelho e a Formação Laranjeiras em tons verde claro.

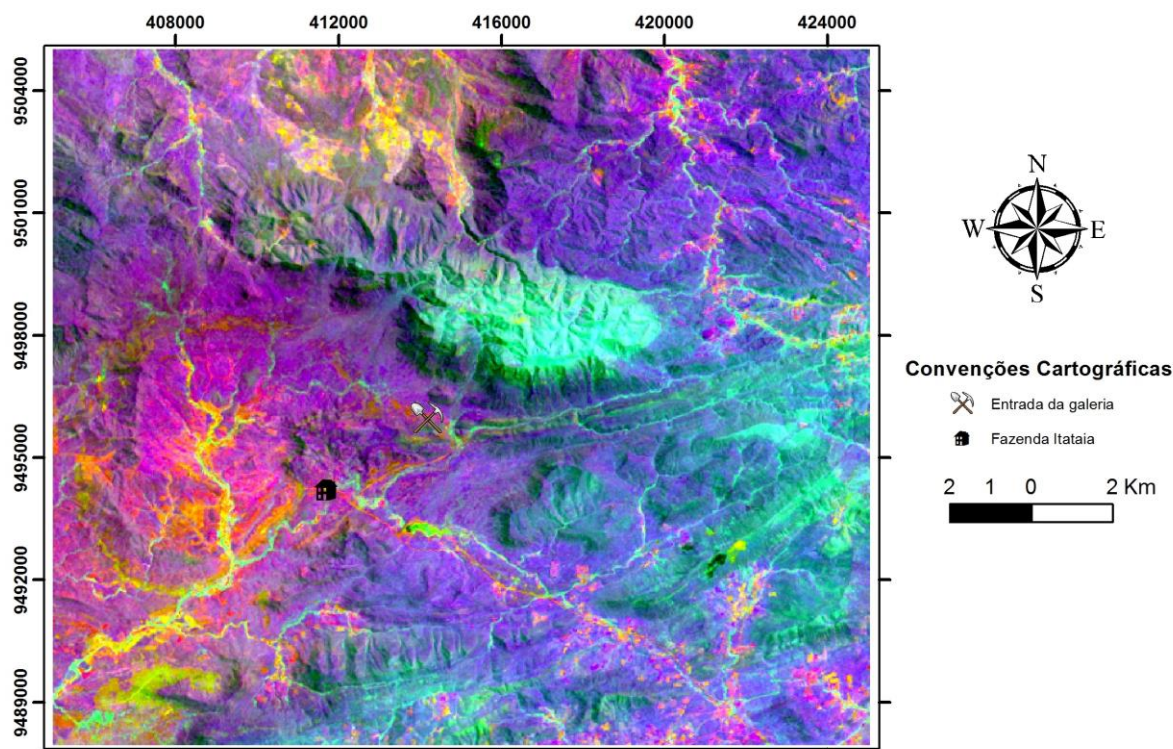


Figura 3: Composição colorida R PC1, G PC2, B PC3.

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 eTh/K 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. Assim a imagem q melhor delimitou a área da mineralização foi a imagem gerada pela razão eTh/K , marcando zonas que sofreram alterações supergênicas.

Corroborando com o modelo da mineralização fósforo-uranífera proposto por Castro *et al.* (2005), que associa a origem da mineralização como predominantemente sedimentar, com reconcentração por processos tectono-metamórficos e posterior enriquecimento por processos supergênicos.

A imagem com a razão eTh/K (Figuras 4 a), foi integrada a 1PC (Figuras 4 b), oriunda da rotação das bandas 2, 3, 4, 5, 6 e 7 OLI, por meio da transformação IHS. Onde a PC1 foi substituída no canal da intensidade (I) e os canais do matiz (H) e saturação (S) foram mantidos. A imagem gerada esta apresentada na Figura 4 c, em que delimita bem o entorno da mineralização uranífera de Itataia (circulada em amarelo) e marca novas zonas a norte da área de estudo que apresentam respostas similares a da mina.

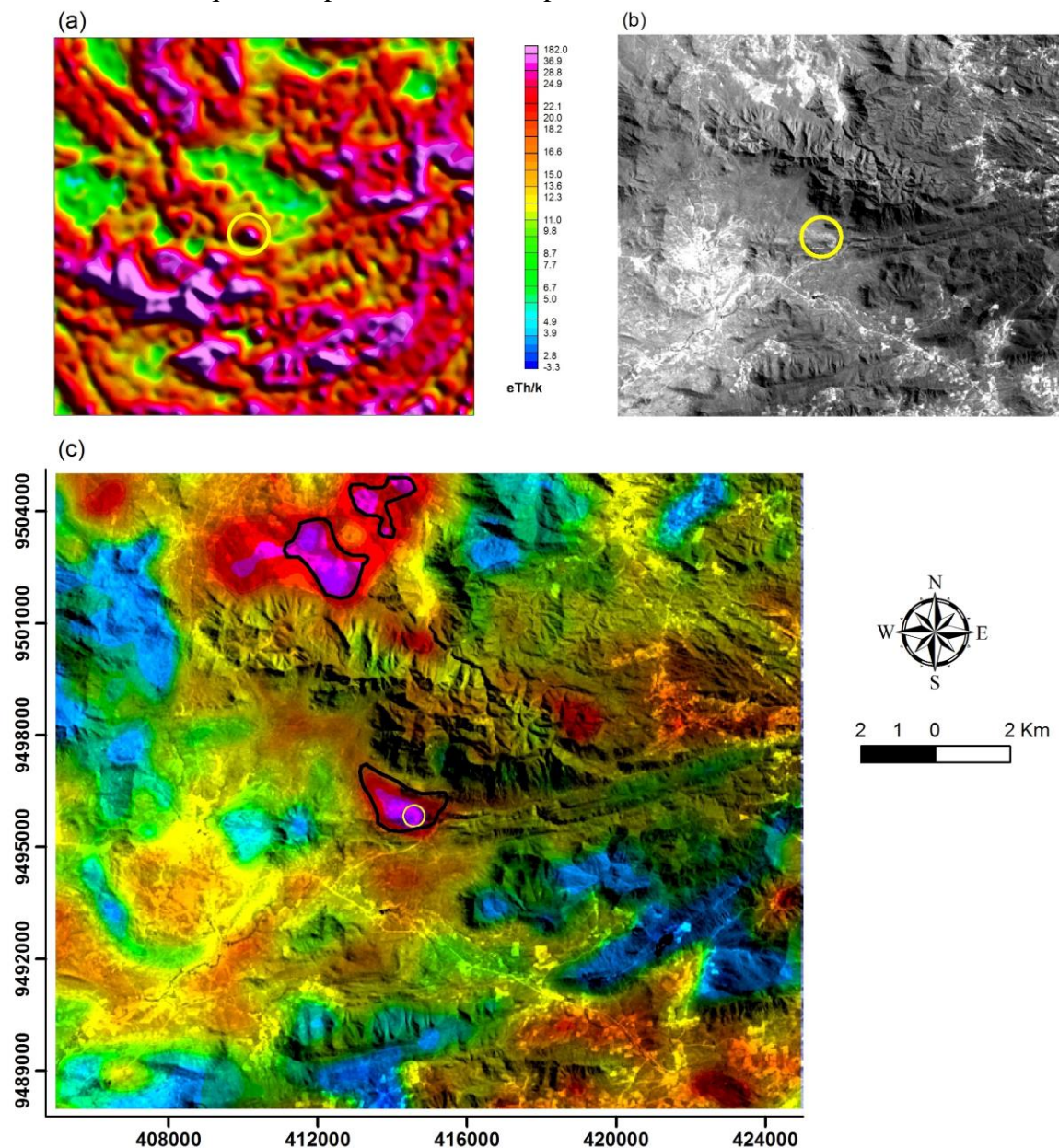


Figura 4: (a) Mapa de razão eTh/K ; (b) Primeira Principal Componente, PC1 obtida para a área; (c) Integração IHS com o mapa de razão eTh/K e a PC1.

4. Conclusões

O do processamento das imagens de satélite apresentou bons resultados para caracterização das principais litologias da região. Em especial os mármorees da Formação

Alcantil, hospedeira da mineralização de urânio (colofanita). O fato de não ter sido possível destacado especificamente o minério de urânio, se deve pela baixa resolução espectral do sensor OLI. O que abre margem para aplicação de sensores com melhor resolução espectral, como o ASTER ou Hyperion, em estudos futuros.

A integração das imagens Landsat 8, sensor OLI (PC1) e de dados gamaespectrométricos (eTh/K) por meio da transformação IHS, se mostrou uma ótima ferramenta para a delimitação da mineralização fósforo-uranífera de Itataia. Além de ter destacado novas áreas de com possíveis ocorrências da mineralização. Lembrando que as áreas identificadas neste estudo não necessariamente indicam ocorrências de mineralizações de colofanita, no entanto, quando associados a outros fatores como presença de mármores e respostas gamaespectrométricas similares as da mina, podem indicar uma maior favorabilidade de existência de corpos mineralizados.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Consórcio Santa Quitéria INB-Galvani pela concessão do projeto e a CPRM pela disponibilização dos dados gamaespectrométricos.

Referências Bibliográficas

- Blum, M. L. B. 1999. **Processamento e Interpretação de Dados de Geofísica Aérea no Brasil Central e sua Aplicação à Geologia Regional e à Prospecção Mineral**. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, Tese de Doutorado. 229 p.
- Briggs I.C.1974. **Machine contouring using minimum curvature**. Geophysics, 39:38-48.
- 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.
- CPRM -2009. **Projeto Aerogeofísico Norte do Ceará. Relatório Final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos**. Brasília, 300p.
- Crósta, A. P. **Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto**. 1. ed. CAMPINAS, SP, BRASIL: IG-UNICAMP, 1992. v. 1. 170 p.
- INB, **Indústrias Nucleares do Brasil. INB Santa Quitéria**. 2011. Disponível em: http://www.inb.gov.br/inb/webforms/interna.aspx?secao_id=52. Acesso em: 09 fev. 2011.
- 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.
- Minty, B. R. S. 1991. **Simple Micro-Levelling for Aeromagnetic Data**. Expl. Geoph. 22:591-592 p.
- Nuclebrás. **Jazida de Itataia**: relatório de pesquisa mineral. Fortaleza: INB, 1984.330 p.
- Rosa Jr, C.A.; Maranhão, 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.