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

Cecílio Aguiar Rosa Júnior [1]
Rosa Maria Ramos Maranhão [2]
Cynthia Romariz Duarte [2]

[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
geo.cecilio@yahoo.com.br; rosamaranho@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@ufc.br

Abstract. This paper describes how applying band statistics and subsequent digital image processing (DPI) in LANDSAT 5 scenes showed itself a tool to recognize geological structures and units in Itataia U-P mine region in Santa Quitéria, Ceará/Brazil. The band statistics calculates basic statistics parameters, histogram's distribution frequence, covariance, eigenvectors and correlation matrix, where they were used to determine correlated bands to be analyzed. The posterior DPI é characterized by the employment of RGB color composition, band ratios and Principal Components Analysis (PCA) that were able to identify the Alcantil Formation, geological unit that hosts the mine mineralization.

Key-words: remote sensing, image processing, band statistics.

1. Introdução

A jazida de fósforo-uranífera de Itataia, uma das maiores reservas do país, apresentando 142.500 t de U_3O_8 (64% classificados como medido), está inserida no município de Santa Quitéria, centro-norte do estado do Ceará, e é estudada desde os anos 70. Nos últimos anos, houve maior incentivo à pesquisa da jazida e arredores devido sua importância estratégica. Diversos trabalhos de caracterização geológica e metalogenética da área da jazida (Mendonça *et al.*, 1980; Mendonça *et al.*, 1983; Santos, 2003; Silva, 2003; Pitombeira, 2011; e outros) se apoiam em mapeamento geológico em várias escalas (Ex. 1:100.000, 1:50.000, 1:10.000), seguido de análise estrutural e petrográfica. Este trabalho vem no intuito de verificar como o sensoriamento remoto (SR) poderia complementar as pesquisas anteriores, bem como tentar encontrar novas informações para a região, enfocando a formação hospedeira da mineralização fósforo-uranífera, a formação Alcantil (Figura 1).

2. Geologia da área de estudo

A área objeto de estudo está localizada, do ponto de vista geológico, em região tradicionalmente conhecida como Domínio Ceará Central (Ceará Central – por Caby & Arthaud, 1986; Domínio Ceará Central – por Jardim de Sá, 1994, Monié *et al.*, 1997; Terreno Ceará Central – por Cavalcante, 1999). O domínio pertence à porção setentrional da Província Borborema (Almeida *et al.*, 1977).

A Província Borborema representa o extremo nordeste da Plataforma Sulamericana, caracterizado por atividade tectônica intensa ao final do Proterozóico, consequência de colisão continental envolvendo os crátons São Luís-Oeste África e São Francisco-Congo. A colisão, correspondendo ao Ciclo Brasiliano-Pan-Africano, completou-se, no caso da Província Borborema, por volta de 600-550 Ma.

A maior parte dos autores concorda, atualmente, em subdividir a porção setentrional da Província Borborema em quatro domínios. Os limites dos domínios correspondem a megazonas de cisalhamento transcorrentes ativas ao final do Ciclo Brasiliano. No estado atual dos conhecimentos, não se sabe quais são as transcorrências responsáveis por colagem de terrenos (evolução de zonas de sutura) e quais as responsáveis pelo acoplamento de regiões distantes, com evolução geológica pouco diferente, em função da sua movimentação transcorrente.

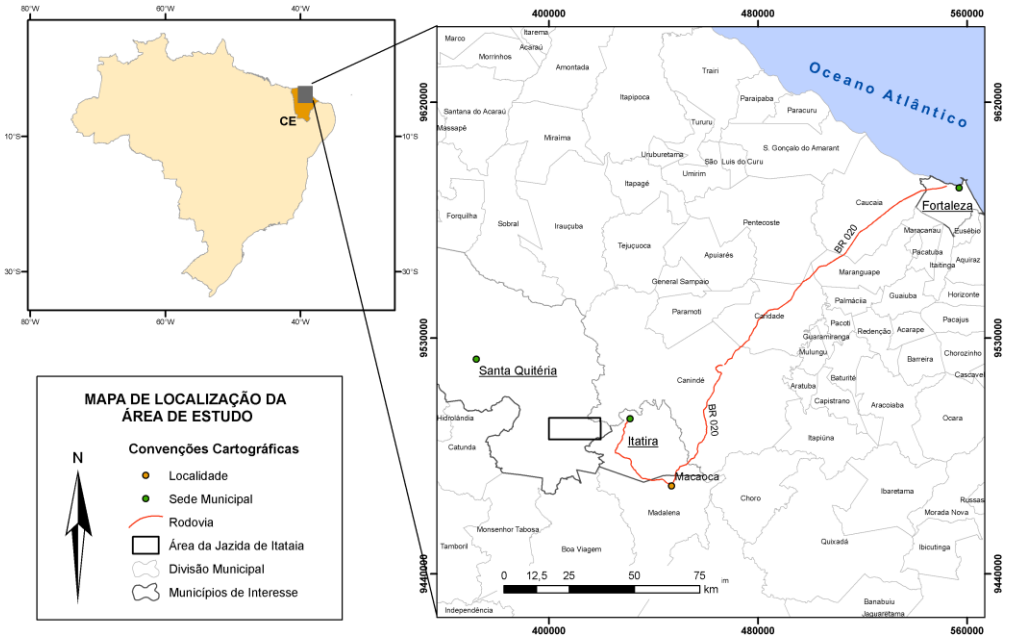

Figura 1 – Localização da área de estudo.

O Domínio Ceará Central é constituído por quatro Unidades Litotectônicas:

- Núcleo Arqueano de Tróia-Pedra Branca-Mombaça – É seccionado pela Zona de Cisalhamento Sabonete-Inharé que o divide em dois blocos. Bloco Mombaça, situado a SE, sendo composto por gnaisses granulíticos do tipo TTG, enquanto o bloco Tróia-Pedra Branca, na porção NW, constituído por uma associação do tipo greenstone belt (Castro, 2004).
- Embasamento Gnáissico Paleoproterozóico – Segundo Castro (*op. cit.*), esta unidade é constituída por gnaisses, por vezes, migmatíticos de composição quartzo-diorítica a tonalítica.
- Rochas Supracrustais Neoproterozóicas – Caracterizado um sistema de *nappes* alóctones sobre o embasamento paleoproterozóico subjacente, constituído predominantemente de rochas psamo-pelíticas e volumes menores de porções carbonáticas, também ocorrendo anfibolitos e metavulcânicas ácidas intercaladas representando magmatismo básico sin-sedimentar.
- Complexos Granito-Migmatíticos e Granitóides Neoproterozóicos – Constituído por rochas migmatíticas, granitoides e gnáissicas com porções anfibolíticas e calcissilicáticas (Castro, *op. cit.*).

Os primeiros estudos geológicos focando a área de Itataia datam do início da década de 1980, merecendo destaque os trabalhos de Mendonça *et al.* (1980 e 1983). Mendonça *et al.* (1980) reconheceram uma espessa sequência metassedimentar de natureza transgressiva, com rochas migmatíticas, quartizíticas e gnáissicas sendo capeadas por metacalcários cristalinos. Posteriormente em um estudo de regionalização, Mendonça *et al.* (1983) denominaram a sequência metassedimentar de Grupo Itataia. A seguinte estrutura foi proposta para o Grupo, da base para o topo: i) Formação Serra do Céu – migmatitos, leptinitos e gnaisses; ii)

Formação Laranjeiras – quartzitos puros e micáceos; iii) Formação Barrigas – gnaisses migmatíticos ou não; e iv) Formação Alcantil – composta por mármores cristalinos e calcissilicáticas, a qual está associada a principal mineralização fósforo-uranífera da jazida de Itataia. Abaixo está um esquema da estratigrafia para a área de estudo (Tabela 1) e o mapa geológico esquemático de Santos (2003), escala 1:50.000 (Figura 2).

Tabela 1 – 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-ORDOVICIANO	Evento Itataia – minério de colofanito.
NEOPROTEROZÓICO (Ciclo Brasiliano)	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.

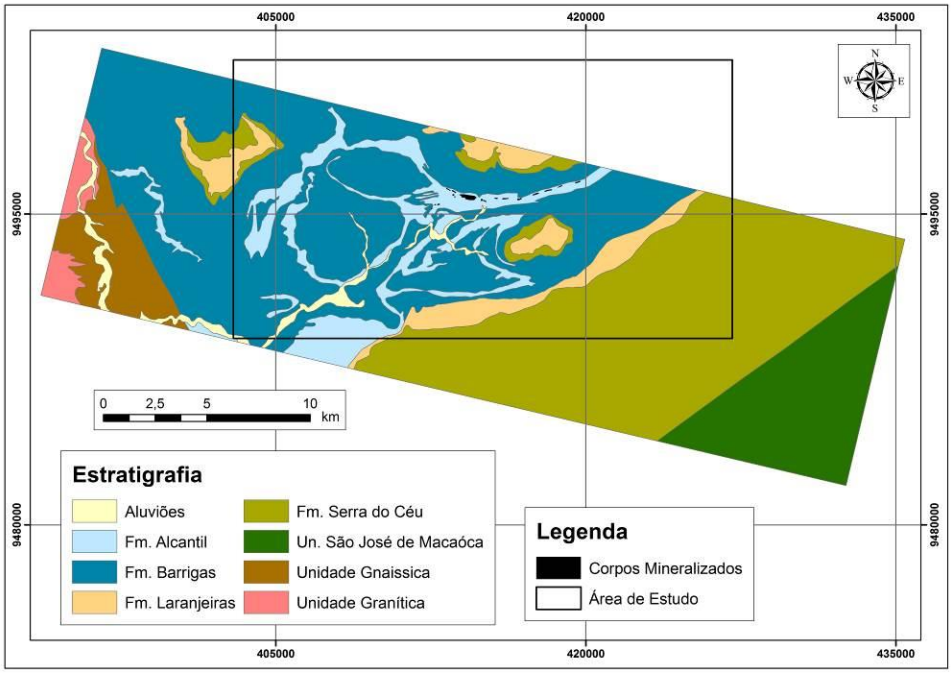

Figura 2 – Mapa geológico esquemático. Adaptado de Santos (2003).

3. Materiais e métodos

As imagens dos satélites LANDSAT 5 e 7 são ferramentas poderosas para o sensoriamento remoto. Possuem resolução espacial compatível com estudos regionais e de semi-detalhe (30m) e suas cenas são disponibilizados gratuitamente pelo USGS (*U.S. Geological Survey*), NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) e INPE

(Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). O fato de serem gratuitas permite que etapas pré-campo de uma campanha de pesquisa gerem informações regionais da área num menor espaço de tempo, visto que fotos aéreas demandam tempo para serem analisadas e talvez feições regionais sejam mascaradas pela análise em grande escala dessas fotos. Dessa forma, foram escolhidas cenas do satélite LANDSAT 5 de órbita/ponto 217/63 e data 07/10/1991 desse satélite para serem analisada. O processamento das imagens foi realizado com o *software* ENVI 4.8 e ArcGIS 9.3.

4. Processamento digital das imagens e discussões

As imagens foram obtidas no site da USGS (http://earthexplorer.usgs.gov/) e submetidas à calibração de refletância. Esse processamento é necessário porque os pixels de imagens brutas possuem informação representada por DN`s (Digital Numbers), variando entre 0 e 255 e não podem ser analisados espectralmente. Assim, os dados são convertidos a partir de informações de incidência solar no momento da aquisição da imagem de DN`s para valor de refletância, variando entre 0 e 100%. É importante ressaltar que há uma lacuna sem informações geológicas no nordeste da área. Isto é devido a geometria do mapeamento geológico de maior escala obtido e também para que haja campo de observação para locais não mapeados.

É conhecido que imagens construídas por composição colorida RGB são úteis para análise de terrenos, onde há combinações distintas que ressaltam determinados tipos litológicos ou minerais. Porém, essas combinações podem não ser efetivas em algumas áreas, tornando a procura por realce de informações numa busca por tentativa e erro. O realce é alcançado quando diferenças entre imagens podem ser visualizadas com uma determinada cor e/ou tonalidade e a tentativa de criar composições torna-se muito cansativa e sem critério, visto que há 720 possibilidades de combinações a partir de 6 bandas em 3 canais de cores. Ao somarmos a esta ideia a quantidade de tempo gasto com cada combinação possível realizando a manipulação de histogramas, temos a real noção do quão árduo este trabalho pode ser.

Assim sendo, que ter em mente que é muito difícil gerar um passo-a-passo que seja infalível e que a tentativa e erro é uma realidade do SR, principalmente quando relativo às composições coloridas, entretanto podemos reduzir as possibilidades a partir de estatística de imagens. Ao computar essas estatísticas, os dados de correlação e covariância oferecem suporte para escolha de bandas para combinações ou processamentos posteriores. Dessa forma, a estatística de imagem permitiu determinar que as bandas 1, 4, 5 e 7 possuem menor correlação espectral entre si, o que geraria melhor realce (Tabela 2).

Tabela 2 – Correlações entre bandas. Notar que correlação entre mesmas bandas gera resultado numérico “1”.

Correlação	**Banda 1**					
Banda 1	1,00000	**Banda 2**				
Banda 2	0.947018	1,00000	**Banda 3**			
Banda 3	0.919987	0.982470	1,00000	**Banda 4**		
Banda 4	**0.818309**	0.910365	0.930700	1,00000	**Banda 5**	
Banda 5	**0.850857**	0.892079	0.919767	0.891678	1,00000	**Banda 7**
Banda 7	**0.880159**	0.919042	0.928243	**0.841134**	0.962733	1,00000

O processo de composições coloridas entre as bandas obtidas não gerou realce suficiente para delimitar diversos contatos entre as unidades, porém foi possível identificar a formação Alcantil na composição empregando as bandas 7 (-MIR), 5 (SWIR) e 4 (NIR) em RGB (Figura 3). Realizou-se então a razão de bandas entre as selecionadas pelo método estatístico, utilizando-se também a banda do azul (1) sendo elas 1/4, 1/5, 1/7 e 4/7. Sob olhar pouco crítico, é possível delimitar a formação Laranjeiras, sendo que ela está intimamente vinculada a regiões topograficamente mais altas, também recebendo algum grau de influência de vegetação na resposta espectral. (Figura 4). Outras unidades litoestratigráficas não apresentam contatos nítidos a não ser os aluviões, que apesar do destaque maior, seja nas composições coloridas ou razões de bandas, possuem sua delimitação errática, por vezes precisa, outras não, provavelmente em função da variação na quantidade de vegetação, presença de água e uso e ocupação do solo.

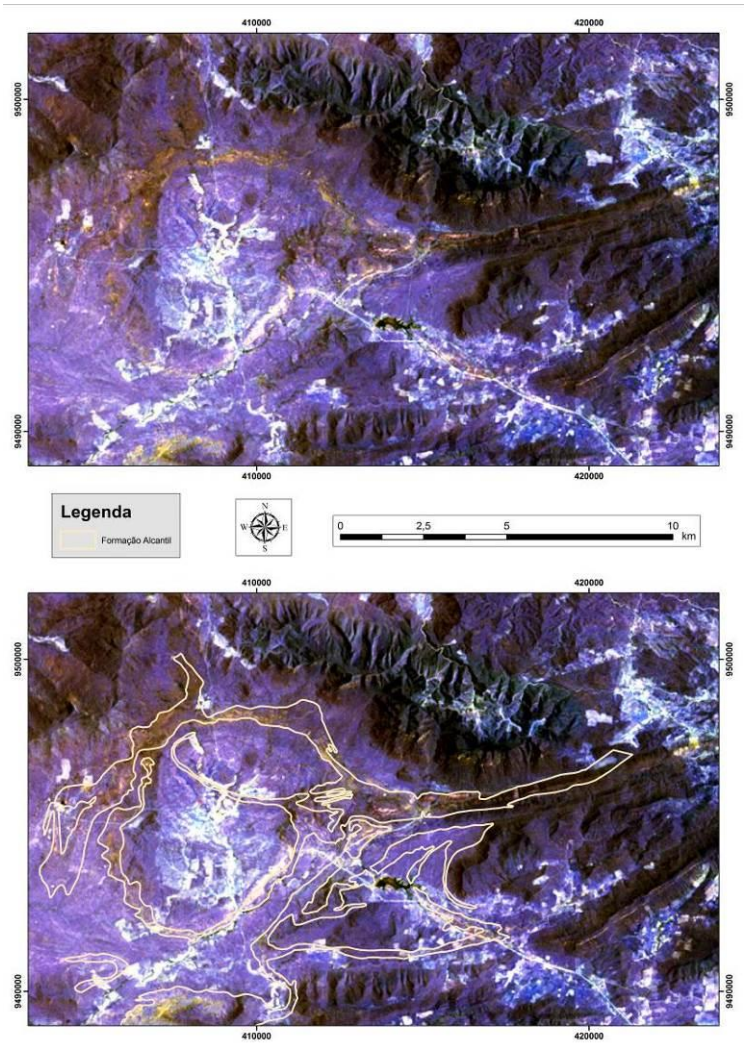

Figura 3 – Composição colorida das bandas 7, 5 e 4 em RGB. Nota-se a formação Alcantil com tonalidades entre laranja clara e amarela escura.

A Análise de Principais Componentes (APC) das bandas escolhidas pelo método estatístico (Bandas 1, 4, 5 e 7), consiste em uma técnica estatística multivariada por transformação linear dos dados de entrada, que tem como princípio determinar a variabilidade desses dados através das relações de covariância existentes no conjunto original, reagrupando-o em um conjunto novo e menor de variáveis (denominadas PCs), eliminando assim as informações redundantes (Zacchi *et al.*, 2010). Dessa forma, a APC gera novas bandas que

contém informações não relacionadas entre si, onde as últimas bandas são basicamente constituídas por ruído ou resíduo dessa operação.

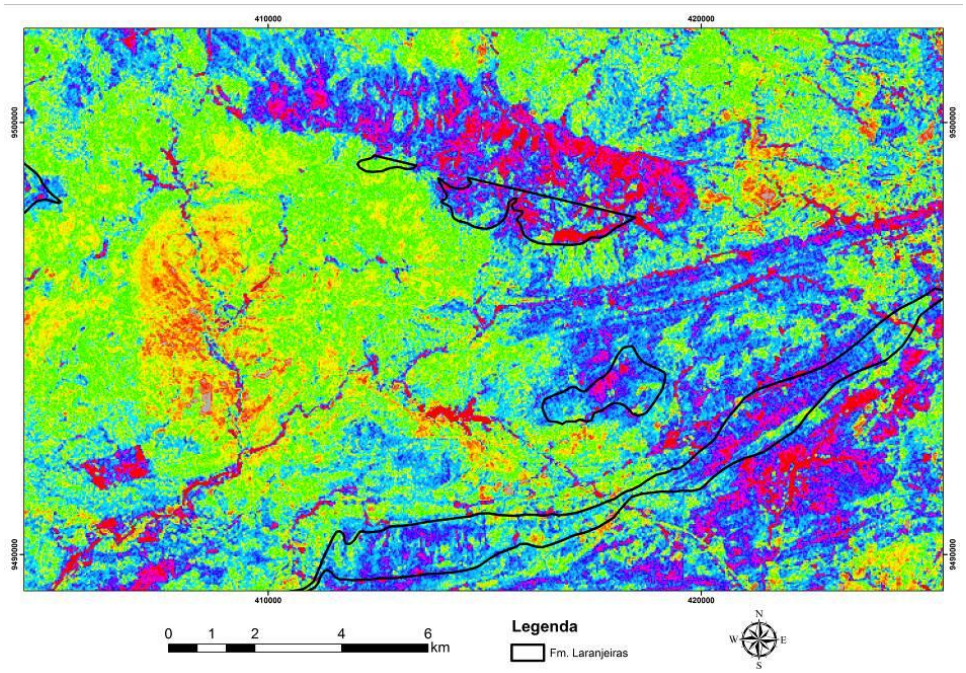

Figura 4 – Razão entre as bandas 4 e 7. Notar a Fm. Laranjeiras vinculada a regiões de tons vermelhos e roxos. Essas áreas estão associadas a locais topograficamente mais elevados.

Dentre as 4 PCs geradas, as 3 primeiras não permitiram identificar unidades geológicas descritas na literatura. Contudo, a quarta PC foi capaz de realçar com clareza grande parte da formação Alcantil na área de estudo (Figura 5). A região ao centro da delimitação vista na figura é a formação Barrigas, entretanto, não foi possível identificar com precisão outros contatos dela nessa imagem.

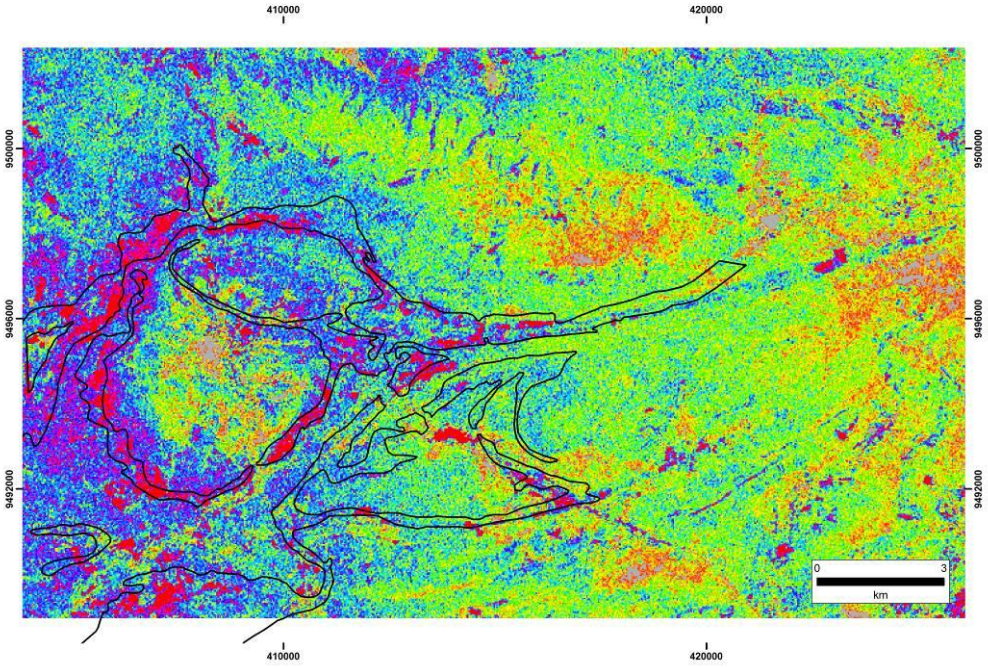

Figura 5 – Imagem PC4 classificada e delimitação da formação Alcantil por Santos (2003).

Visto os resultados positivos para o reconhecimento da Fm. Alcantil e na intenção de confirmar este resultado, aplicou-se a composição colorida R4G3B2I5 citada por Duarte *et al.* (2008), onde a banda 5 encontra-se no canal *Intensity* (IHS), fundindo numa só imagem os comportamentos espectrais em 4 faixas distintas do espectro eletromagnético, destacando corpos calcários com coloração esverdeada peculiar. Esta composição não foi eficiente em delimitar a formação supracitada, entretanto, ao aplicar a APC nestas quatro bandas, foi possível reconhecer a Fm. Alcantil na PC4 (Figura 6), assim como na análise realizada com as bandas escolhidas estatisticamente.

Deve-se informar que o prolongamento da Fm. Alcantil na direção leste seja decorrente da integração entre as estruturas geradas pela dinâmica deformacional ocorrida na área e a dissecação diferenciada que rochas carbonáticas possuem em relação às silicáticas. Na figura 6 é possível observar a incisão de uma drenagem no maciço e como essa formação é formada de litotipos carbonáticos, concluímos essa drenagem representa esse mesmo prolongamento.

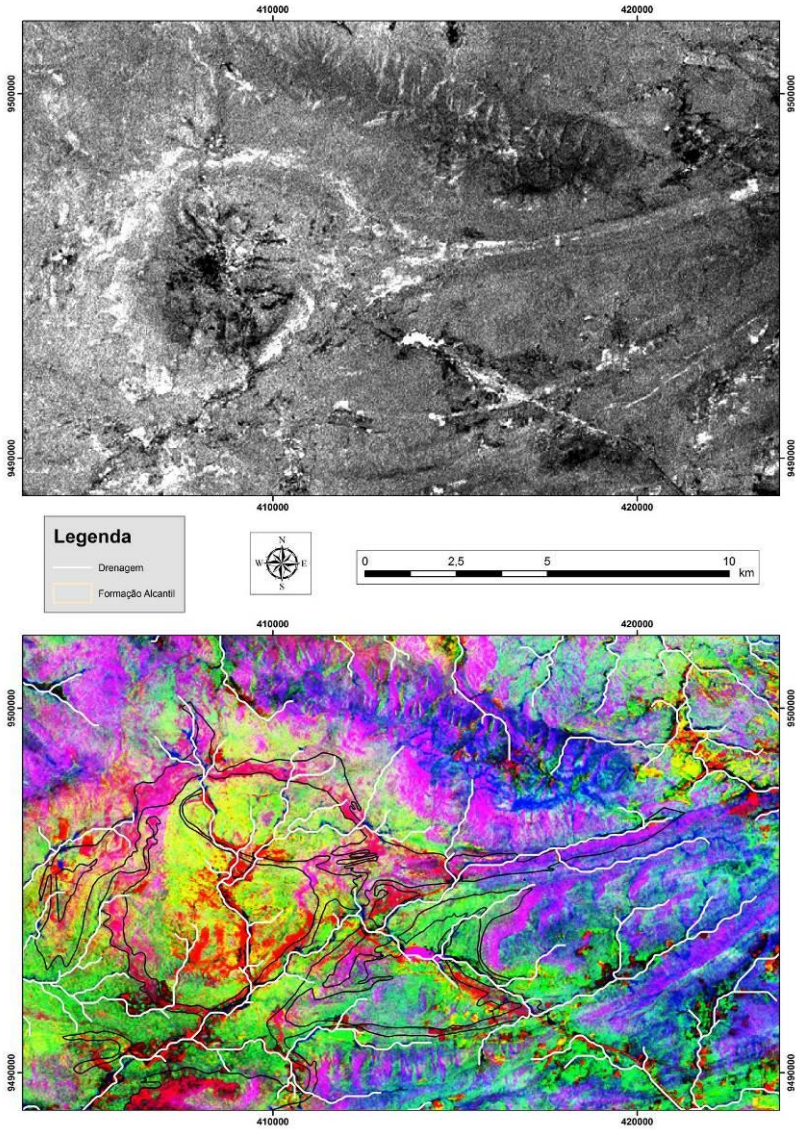

Figura 6 – Imagem PC4 (acima) e composição colorida onde o RGB é constituído das 3 primeiras PC`s geradas (abaixo). Notar a Fm. Alcantil exibindo tons branco a cinza claro na imagem acima e róseos escuros na imagem abaixo.

5. Conclusões

O método estatístico para determinação de bandas de imagens LANDSAT a serem processadas posteriormente provou ser eficiente e a aplicação de processamento digital na região da jazida fósforo-uranífera de Itataia permitiu delimitar a Formação Alcantil seja a partir de composições coloridas ou APC, tendo sua veracidade confirmada ao confrontá-la com técnicas utilizadas na literatura e informações de mapeamento geológico de escala compatível. Isto revela que aplicar este método pode aumentar a capacidade de reconhecimento pré-campo de informações geológicas, ponto crucial para todas as etapas subsequentes da pesquisa, principalmente planejamento de etapa de campo e confecção de mapa geológico. É importante lembrar que este trabalho não contemplou estudos relacionados à geologia estrutural, onde a aplicação de filtros e sombreamentos integrados ao mapeamento geológico e topografia são capazes de gerar dados de alta relevância para etapas supracitadas.

6. Agradecimentos

Os autores agradeçem à Universidade Federal do Ceará pelo suporte de equipamentos e infraestrutura e à Comissão Nacional de Energia Nuclear pelo fomento ao trabalho.

7. Referências Bibliográficas

Almeida, F.F.M.; Hasui, Y.; Brito Neves, B.B.; Fuck. R.; Províncias estruturais brasileiras. In: VIII Simpósio de Geologia do Nordeste, 1977, Campina Grande, p. 363-391.

Almeida, A.R.; Parente, C.V.; Arthaud, M.H. Geologia da folha Itatira (SB.24-V-B-V). CPRM. 2008.

Caby, R.; Arthaud, M.H. Major precambrian nappes of the Brazilian Belts, Ceará. Northeast Brazil. **Geology**, v. 14, p. 871-874.

Castro, N.A. Evolução geológica proterozóica da região entre Madalena e Taperuaba Domínio Tectônico Ceará Central (Província Borborema). 2004. Tese (Doutoramento) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

Duarte, C.R.;Petta, R.A; Medeiros, C.N.; Reys, A.M.T. Emprego de imagens de multisensores na caracterização geoambiental do litoral de Pedra Grande (RN) visando a implantação de projetos de carcinicultura. **Estudos Geológicos**, v. 18, n. 2, p. 65-76.

Mendonça, J.C.G.S.; Braga, A.P.G.; Campos, M. Consideração sobre a mineralização fósforo-uranífera da jazida de Itataia. **Anais 31º Cong. Bras. De Geologia**, v. 4, p. 2472-2486, 1980.

Mendonça, J.C.G.S.; Braga, A.P.G.; Netto, R.N.; Silva, R.J.A. **Mapa geológico da região de Itataia**. NUCLEBRÁS. 1983.

Pitombeira, J.P.A. **Geologia de Itataia**. 2011. Monografia. – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2011.

Santos, A.A. **Caracterização litoestrutural e geocronológica da região fósforo-uranífera de Itataia-CE**. 2003. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2003.

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

Zacchi, E.N.P; Silva, A.M.; Rolim, V.K.; Análise integrada de dados multifonte e sua aplicação no mapeamento geológico das formações ferríferas da Serra de itapanhocanga, Alvorada de Minas, MG. **Revista Brasileira de Geofísica,** v. 28. n. 4. p. 643-656.