

# Contribuição do Método Gamaespectrométrico no Estudo da Região de São Francisco de Itabapoana no Contexto da Exploração de Terras-Raras

Gabriela N. Nunes, Júcia de A. B. Calanca, Kaio da S. P. Figueiredo, Dayane de S. Pereira, Hans S. Santos, Warlley L. Antunes, Felipe B.V. Freitas, Rogério M. Soares

Resumo - Este trabalho apresenta a contribuição do método gamaespectrométrico no estudo da região de São Francisco de Itabapoana, RJ. Os dados foram coletados por aeronave Bandeirante com intervalo de amostragem de 100 m, espaçamento de 1 km e linhas de medida na direção N-S. Foram construídos mapas de distribuição de Urânio, Tório, Potássio, Contagem Total e Ternário através de interpolação pelo método de mínima curvatura com células de 250 metros. Os resultados permitiram identificar domínios litogeofísicos com base na interpretação dos mapas de distribuição de radiação gama, oriunda das janelas correspondentes aos radioelementos Potássio, Urânio e Tório em toda a região, incluindo a Praia de Buena que é rica em areia monazítica utilizada na obtenção de Terras-Raraa. Palavras chave: Método Radiométrico; Terras-Raras; São Francisco de Itabapoana.

# Application of the Gamma-Spectrometric Method for the Study of the São Francisco de Itabapoana Region in the Context of the Exploration of Rare-Earths

*Abstract* - This paper presents an application of the gammaspectrometric method for the study of the São Francisco de Itabapoana region, in the state of Rio de Janeiro. The data were collected by Bandeirante aircraft with a sampling interval of 100 m, spacing of 1 km and measurement lines in the N-S direction. Distribution maps of Uranium, Thorium, Potassium, Total Count and Ternary were constructed through interpolation by the minimum curvature method with cells sized 250 meters. The results allowed to identify litogeophysical domains based on the interpretation of gamma radiation distribution maps, originating from the windows corresponding to the Potassium, Uranium and Thorium radioelements throughout the region, including Buena Beach which is rich in monazitic sand used to obtain Rare-Earths.

Keywords: Radiometric method; Rare-Earths; São Francisco de Itabapoana.

# I. INTRODUÇÃO

s elementos Terras-Raras (TR) consistem em 17 elementos químicos metálicos, abrangendo a família dos lantanídeos, o Ítrio (Y) e o Escândio (Sc), com grande distribuição na crosta terrestre, mas com baixas concentrações. Elas são encontradas em diversos tipos de minerais e, principalmente, nos seguintes meios: bastnasita; argilas absorvedoras de íons; xenotima; apatita; e monazita. Entretanto, apenas três minérios são mais explorados comercialmente: a monazita (fosfato), a bastnasita (fluorocarbonato) e a xenotima (fosfato), devido a serem mais demandados e possuírem maior valor no mercado. [1].

As numerosas aplicações das Terras-Raras provêm das suas propriedades singulares, particularmente as espectroscópicas e magnéticas [2]. Possuem grande importância nas áreas de pesquisa, envolvendo o âmbito da biologia, química, geologia, medicina e diversos ramos de espectroscopia [3].

Utilizada como matéria-prima para as Terras-Raras, a monazita era extraída das areias da Praia de Buena, localizada no município de São Francisco de Itabapoana (RJ), e processada na Usina de Praia pela Sociedade Comercial de Minérios Ltda [4].

A presença de monazita na região de Buena, no norte fluminense, estende-se por 18 km, desde Guaxindiba até São Francisco de Itabapoana. Formam um cordão (restinga) contínuo, paralelo à linha de praia [5]. Contudo, hoje as reservas da praia de Buena são consideradas tecnicamente esgotadas.

O mineral retirado das areias monazíticas das praias do Norte Fluminense tem 8.000 ppm (parte por milhão) de Tório, elemento radioativo, um índice considerado muito alto. Se não houver cuidado e boas técnicas, os resíduos são altamente contaminantes e poluentes, tanto na parte química como na radioativa. Países como os Estados Unidos abandonaram a exploração da monazita devido à radioatividade dos elementos [6].

Dessa forma, torna-se útil a investigação da realidade radiométrica da região, pois o método gamaespectrométrico pode permitir a análise da radioatividade natural da superfície de extensas áreas e formações geológicas como as encontradas na região de São Francisco de Itabapoana [7].

A radioatividade que se situa exposta em rochas, solos, sistemas hidrológicos em lugares extensos, águas subterrâneas, mares e atmosfera, é procedente de recursos radioativos naturais. Sabe-se que estão presentes no solo diversos núcleos radioativos, mas aqueles que são mais apropriados para o estudo das rochas são o Urânio, o Tório e o Potássio [8].

Os elementos Urânio (U), Tório (Th) e Potássio (K) encontram-se presentes em inúmeros minerais e em diversos teores, que podem variar de acordo com a rocha e as camadas estudadas. Eles são capazes de proporcionar informações complementares sobre as características químicas da rocha [9].

Isto posto, pretende-se utilizar o método gamaespectrométrico a fim de se estudar os solos de São Francisco de Itabapoana, que é uma região rica em Terras-Raras presentes em suas areias monazíticas, contribuindo para o levantamento de informações de significativo valor científico.

Para tanto, este trabalho está organizado da seguinte forma: A Seção II apresenta as características do município de São Francisco de Itabapoana; na seção III são abordadas as terrasraras; a Seção IV descreve o método radiométrico, abordando a medida de radiação gama, as fontes de radiação gama, a geoquímica dos radioelementos, sendo comentado especificamente sobre o tório, urânio e potássio e, por fim, o levantamento aeroradiométrico; na Seção V são apresentados os mapas e a interpretação dos dados; e, finalmente na Seção VI são sumarizadas as principais conclusões.

#### II. CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO

#### A. DESCRIÇÃO DO MUNICÍPIO

São Francisco de Itabapoana pertence à Região Norte Fluminense, que também abrange os municípios de Campos dos Goytacazes, Carapebus, Cardoso Moreira, Conceição de Macabu, Macaé, Quissamã, São Fidélis e São João da Barra [10].

O município tem uma área total de 1.122,4 quilômetros quadrados, correspondentes a 11,5% da área da Região Norte Fluminense. Os limites municipais, no sentido horário, são: Campos dos Goytacazes, Espírito Santo, oceano Atlântico e São João da Barra [10]. A figura 1 representa a vista de satélite da região de São Francisco de Itabapoana.



Figura 1: Localização de São Francisco de Itabapoana por Landsat/Copernicus, escala em graus decimais, 01/11/18 [11].

#### B. GEOLOGIA DA REGIÃO

A geologia da região a ser estudada pode ser descrita na figura 2 abaixo, que apresenta o mapa geológico simplificado da região de São Francisco de Itabapoana.



Figura 2: Mapa geológico simplificado da região de São Francisco de Itabapoana em graus decimais, WGS84, Modificado de Silva e Cunha (2001) [12].

O mapa geológico da região de São Francisco de Itabapoana (figura 2) é descrito pelas seguintes unidades geológicas:

#### Qphm

#### Depósito Marinho e Flúvio-Marinho (0 – 1,6) Ma

Depósitos flúvio-marinhos síltico-areno-argilosos, ricos em matéria orgânica, englobando linhas de praia atuais a antigas, além de manguezais.

## Tb

#### Grupo Barreiras (1,6 – 65) Ma

Depósito detrítico pobremente selecionado com granulometria cascalho, areia argilo-arenosa, e argilas geralmente contendo horizontes lateríticos.

## Ny2a

#### Suíte Angelim (560 – 650) Ma

Granada-hornblenda-biotita tonalito a granito com textura porfirítica (porfiroclástica) e forte foliação transcorrente. Suíte mista envolvendo domínios peraluminosos de granito tipo S, ricos em granada e domínios metaluminosos tipo I, ricos em hornblenda não discriminados.

#### Ny2b

#### Suíte Bela Joana (560 - 650) Ma

Granito tipo C: granada-hornblenda-clinopiroxênio-ortopiroxênio charnockito de granulação grossa, textura magmática equigranular a porfirítica preservada, isótropo a foliado, associado a enderbito e norito.

#### Ny2d

#### Suíte Desengano (560 – 650) Ma

Granito tipo-S com granada, muscovita e biotita de granulação grossa, texturas granoblástica e porfirítica com forte foliação transcorrente. Localmente podem ser observados domínios e "manchas" charnockíticas portadoras de granada e ortopiroxênio. Xenólitos erestitos de paragnaisses parcialmente fundidos (migmatitos de injeção) ocorrem com frequência.

## MNpi

#### Unidade Italva (650 – 1600) Ma

Metacalcários dolomítico e calcítico, maciço a sacaroidal, mármores (ca) granulação grossa, intercalado com granada-biotita-sillimanita, gnaisse, quartzo-feldspatico e quartzo-anfibólio-clinopiroxênio gnaisses (rocha calcilissilicática).

#### MNps

Complexo Paraíba do Sul Unidade São Fidélis (650 – 1600) Ma

Granada-biotita-sillimanita gnaisse quartzo-feldspático (metagrauvaca), com bolsões e veios anatéticos ou injetados de composição granítica. Intercalações de gnaisse calcissilicático e quartzito frequentes. Variedades com cordierita e sillimanita (kinzigito) com contatos transicionais com granada biotita gnaisse. Horizontes de xistos grafitosos são comuns. Também ocorrem rocha calcissilicática, metacarbonática (ca) e quartzito (qz).

## C. TOPOGRAFIA DA REGIÃO

O relevo do município é plano. Na região, a altitude varia desde o nível do mar até pouco mais de 140 m de altitude de acordo com o mapa confeccionado através de dados do modelo de topografia global V 18.1 TOPEX com resolução de 1 minuto desenvolvido pelo Instituto de Oceanografia da Universidade de San Diego (figura 3) [13]. Sendo a marcação do município feita através do software WinDigit.



Figura 3: Mapa topográfico em UTM (Universal Transversa de Mercator) de São Francisco de Itabapoana confeccionado a partir de dados do modelo numérico digital de elevação do terreno TOPEX, V18.1 (1 minuto de resolução), Universidade de San Diego, 2017.

Como podemos ver na figura 3, a altitude varia de -14 m até cerca de 140 m. A região de menor altitude encontra-se próximo ao sul se estendendo pelo litoral até a região nordeste, e a região de maior altitude encontra-se na parte noroeste de São Francisco de Itabapoana.

## III. AS TERRAS-RARAS

Os elementos denominados Terras-Raras são os metais lantanídeos (elementos com número atômico entre 57lantânio, e 71-lutécio), além de escândio (21) e ítrio (39). O termo utilizado "Terras" é devido ao fato de que, ao longo dos séculos XVIII e XIX, eles terem sido isolados como óxidos, sendo "Terra" uma designação geral para óxidos metálicos (da mesma forma que "terras alcalinas" ou "metais alcalinoterrosos"). E o termo "Raras" vem do fato de que eles foram encontrados em minerais de regiões próximas a Ytterby, na Suécia, e tinham um processo de separação muito complexo [14].

O histórico da descoberta das Terras-Raras é apresentado na figura 4. No entanto, os elementos Terras-Raras estão presentes em vários produtos comerciais, como automóveis, catalizadores, telas de TV e monitores, ímãs permanentes, baterias de veículos híbridos ou elétricos e muitos equipamentos da área médica, além de geradores de turbinas de aerogeradores [15].



Figura 4: Trajetória histórica da descoberta das Terras-Raras: (a) cronologia de separação das "terras ítricas" a partir da gadolinita e (b) das "terras céricas" a partir da cerita [16].

#### A. OBTENÇÃO DE TERRAS-RARAS

Habitualmente, os minerais TR apresentam-se como fosfatos, óxidos, fluoratos, silicatos e carbonatos. Por meio dessas formações dispõe-se de vários minerais como a: Monazita, Bastnasita, Xenotima, Gadolinita, Fluorita, Perovskita, Zircão, Alanita, Loparita, Euxenita e Apatita [17].

Devido a questões geológicas relativas à formação da rocha, como meteorização, transporte, erosão e sedimentação, as formações rochosas apresentam em suas composições constituintes fixos, mas não concentrações fixas. Devido a esse fato, é importante se conhecer o teor de óxidos de Terras-Raras (OTR) em determinada região, ou seja, para cada localidade tem-se um estudo químico e mineralógico específico [17].

Na região de São Francisco de Itabapoana, apresenta grande destaque no litoral norte a presença da Monazita que é um fosfato de metais de Terras-Raras e de Tório (Th), essencialmente (Ce, La, Y, Th)PO<sub>4</sub>, que se concentra nas areias, em razão de sua resistência ao intemperismo químico e à alta densidade relativa, estando, assim, associada com outros minerais resistentes e pesados, como a magnetita (fórmula ideal, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), a ilmenita (FeTiO<sub>3</sub>), o rutilo (TiO<sub>2</sub>) e o zircão (ZrSiO<sub>4</sub>) [18].

Outro ponto relevante é que em termos de interações químicas, uma característica importante da Monazita consiste em não apresentar teores (quantidade em porcentagem) elevados de Ítrio (Y), o que contribui para exploração desse mineral, pois facilita o processo de separação em suas Terras-Raras [19].

## B. HISTÓRICO DAS TERRAS-RARAS NO BRASIL

A exploração das TR no Brasil começou em torno de 1885, com a retirada da monazita das praias de Prado, na Bahia. Até 1896, a retirada era feita de forma gratuita, pois a areia era embarcada nos navios com a argumentação de que seria usada como lastro para dar equilíbrio aos navios que não poderiam voltar vazios à Europa ou aos Estados Unidos [20].

No final da década de 1940, foi iniciada a produção de terras-raras no Brasil, com a usina Santo Amaro (Usam), integrante a Indústrias Químicas Reunidas S.A. (Orquimia), na cidade de São Paulo (SP). A produção era feita por meio da monazita oriunda da Usina de Praia (Upra), pertencente à Sociedade Comercial de Minérios LTDA (Sulba), localizada em Buena, no município de São Francisco de Itabapoana [21].

Com a descoberta de urânio e tório na monazita, a Sulba foi estatizada na década de 60 e suas atividades passaram a ser administradas pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). Então, a estatal Indústrias Nucleares do Brasil (INB), fundada em 1988, sucedeu a Nuclebrás, incorporando as suas subsidiárias [21].

A Unidade de Minerais Pesados (UMP) da INB na Praia de Buena do município de São Francisco de Itabapoana (RJ) atua no processo de separação e na comercialização de minerais como ilmenita, zirconita, rutilo e monazita, extraídos de reservas minerais formadas pela regressão do mar. Com o esgotamento das reservas, a produção se restringe à recuperação e comercialização do minério que ficou acumulado no pátio, junto à usina de beneficiamento primário e também às várias frações de minerais que foram estocados durante os últimos anos [22].

O Brasil, a partir de 1886 até meados dos anos de 1990, explorou as reservas de monazita litorâneas, tornando-se o maior exportador do mineral. Porém, a exploração da monazita para a aquisição de terras-raras foi rejeitada, devido aos elementos radioativos. Atualmente, as reservas de monazita situam-se em Minas Gerais e Rio de Janeiro contendo, aproximadamente, 31 mil toneladas de metais. Os munícipios de Presidente Figueiredo (AM) e de Catalão (GO) contêm reservas minerais consideráveis que, no entanto, ainda não foram exploradas.

#### IV. O MÉTODO RADIOMÉTRICO

O método radiométrico é um processo no qual são utilizados detectores para verificar as emissões nucleares das rochas que contêm minerais radioativos. Geralmente, detectase a radiação gama através de aparelhos como cintilômetro ou contador Geiger. Esses instrumentos radiométricos foram desenvolvidos para que pudessem realizar a detecção de urânio, mas depois apareceram outras aplicações [23].

Atualmente, o método é empregado no mapeamento geológico, detectando as litologias de conteúdo radioativo. Em laboratório pode-se definir com precisão a quantidade com que os elementos radioativos ou seus isótopos comparecem numa rocha, com isso pode-se revelar vários aspectos da história geológica da rocha em estudo, ou determinar comparações entre diversos tipos similares de um mesmo tipo de rocha, se foram originadas a partir da mesma fonte de magma, no caso de rochas ígneas, ou se derivam da mesma rocha-fonte, através da erosão, no caso de rochas sedimentares [23].

Vamos agora discutir vários fatores relevantes relacionados ao método radiométrico, para esclarecer os seus conceitos e fundamentos.

## A. MEDIDA DE RADIAÇÃO GAMA

O espectrômetro de raios gama baseia-se em uma extensão do contador de cintilações, possibilitando que o elemento examinado seja diferenciado da fonte de radiação. A quantidade de energia que fica contida depende da frequência de radiação, quanto maior a frequência, maior energia contida, por essa razão os espectros de radiação são apresentados a partir de termos de níveis de energia. Os níveis de energia são enquadrados entre OS níveis maiores e menores predeterminados e fornecem um diagnóstico que mostra as diferenças entre as várias fontes de radiação, como mostra a figura 5 [24].

Os espectrômetros são utilizados em aeronaves e durante o sobrevoo são frequentemente calibrados em uma área que contém concentrações conhecidas dos radioisótopos a serem analisados, ou posicionando a aeronave sobre uma laje de concreto fabricada com uma proporção conhecida dos radioisótopos [24].

## B. FONTES DE RADIAÇÃO GAMA

Apesar da existência de mais de 50 isótopos radioativos diversos na natureza, a maior parte é muito rara ou fracamente radioativa. Com isso, as principais fontes de radiação gama descobertas na superfície terrestre provêm da desintegração natural do potássio (40K) e dos elementos das séries do urânio (238U) e do tório (232Th) presentes na composição da maioria das rochas. A avaliação é realizada através da medida de raios gama dentro da janela energética de 0,41 a 2,81 MeV. Neste intervalo, cada elemento é associado a um canal do espectrômetro (figura 5 e tabela 1) [25].



Figura 5: Espectros de Radiação Gama Espectro do  $^{238}$ U,  $^{232}$ Th e  $^{40}$ K e suas medições em 1,76, 2,62 e 1,46 MeV, respectivamente [25].

#### C. GEOQUÍMICA DOS RADIOELEMENTOS

O Urânio, o Tório e o Potássio respondem pela maior parte da radioatividade natural das rochas. São considerados litófilos e concentrados de preferência nas rochas ígneas ácidas. Alguns dos minerais radioativos mais comuns associados ao Urânio, Tório e Potássio foram resumidos na tabela 2 [26].

Tabela 1: Valores dos canais e dos picos (em MeV) associados aos
canais dos elementos radiométricos e à emissão cósmica [25].

Canal	Faixa de Energia (MeV)	Pico (MeV)
$\mathrm{K}^{40}$	1,37 – 1,57	1,46
$U^{238}$	1,66 – 1,86	1,76
$\mathrm{Th}^{232}$	2,41 - 2,81	2,61
СТ	0,41 – 2,81	-
Cósmico	3,0-8,0	-

Tabela 2: Minerais radioativos encontrados com mais facilidade [27].

Potássio		Tório		Urânio	
Mineral	Ocorrência	Mineral	Ocorrência	Mineral	Ocorrência
Feldspatos de	Principais	Monazita	Granitos,	Uraninita	Granitos,
ortoclásio e	constituintes	[ThO₂ +	pegmatitos e	[Óxido de U,	pegmatitos
microlínio	de rochas	Fosfatos de	gnaisses	Pd, Ra + TH,	com
[KAISi₃O <sub>8</sub> ]	ígneas e	Terras Raras		Terras Raras	depósitos
	pegmatitos				venosos de
					Ag, Pb, Cu,
					etc.
Moscovita	Principais	Torianita	Granitos,	Carnotita	Arenitos
[H <sub>2</sub> KAI(SiO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ]	constituintes	[(Th, U)O2]	pegmatitos e	[K20.2U03.V2	
	de rochas		depósitos	O5.2H2O]	
	ígneas e		placers		
	pegmatitos				
Alunita	Alterações em	Torita,	Granitos,	Gummite	Associada
[K₂AI₅(OH)₁₂SiO₄]	rochas	uranotorita	pegmatitos e	Alteração da	com a
	vulcânicas	[ThSiO₄ + U]	depósitos	uraninita}	uraninita
	ácidas		placers		
Silvinita, carnalita	Depósitos				
[KCI, MgCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O]	salinos em				
	sedimentos				

# <u>TÓRIO</u>

O Tório (Th) é metálico, radioativo, tetravalente, acinzentado, pesado, mole e brilhante. Ele pertence ao grupo dos actinídeos e localiza-se no grupo 3 e período 7 da Tabela Periódica. Quando sozinho ele é macio e dúctil, mas as ligas que o incluem podem ser muito resistentes [28].

Este elemento pode ser obtido a partir da monazita em processos de recuperação. O isótopo  $^{232}$ Th (período de semidesintegração: 1,42x10<sup>10</sup> anos) é o nuclídeo pai da família radioativa do tório, que, através de vários produtos intermediários, termina no isótopo estável do chumbo  $^{208}$ Pb.

Ele é utilizado como componente de ligas aumentando a resistência ao fogo e ao calor dos materiais metálicos. Também se utiliza como aditivo de catalisadores mistos. Em reatores reprodutores, o tório é empregado na produção de urânio-233 [28].

## <u>URÂNIO</u>

O Urânio foi descoberto no século XVIII na Alemanha por Klaproth. Em sua forma natural, ele não apresenta índice de radiação muito alto, porém seus isótopos sim. Ele é considerado o último elemento natural da tabela periódica [29].

Ele pode ser explorado através dos seguintes minérios: uraninita, euxenita, carnotita, branerita, torbenite e a coffinita. No Brasil, as principais reservas são a de Caetité na Bahia e a de Santa Quitéria no Ceará [29].

## <u>POTÁSSIO</u>

O elemento Potássio apresenta a cor branca com brilho prata. Ele tem baixa densidade, flutuando na água e apresenta boa condutância de calor e eletricidade. O isótopo potássio-40 é radioativo com meia-vida aproximada de 1,2 bilhões de anos [30].

O Potássio ocorre em feldspatos, em rochas ígneas félsicas como granitoides e sienitoides. Em rochas metamórficas ocorre em micáceas, feldspáticas e quartzo-feldspáticas como filitos, xistos e gnaisses. E nas rochas sedimentares ocorre em arcósios, mudstones e folhelhos por exemplo [31].

#### D. LEVANTAMENTO AERORADIOMÉTRICO

As medidas radiométricas se referem às contagens de urânio, tório e potássio e contagem total dos elementos radioativos. Essas medidas são realizadas na unidade de medida de contagem por segundo (cps). Os métodos aeroradiométricos são de grande utilidade para exploração de recursos minerais, pela facilidade com que informações para avaliação de potencial mineral podem ser obtidas com baixo custo [32].

São utilizados pequenos aviões ou helicópteros nos aerolevantamentos. Para evitar interferências, os sensores ficam localizados na parte inferior da aeronave ou são rebocados por ela [33].

O método do aerolevantamento não provoca danos ao meio ambiente, pois se pode coletar múltiplos tipos de dados com rapidez e de forma econômica. Pode-se alcançar grande amplitude da região analisada, reduzindo os custos em levantamentos regionais. Não há necessidade de solicitações de permissões de superficiários para acessos e nem necessidade de abrir terreno no campo ou ter licenças ambientais. Além disso, os dados podem ser coletados em áreas remotas, acidentadas ou com vegetação densa [34]. A altura de voo e o espaçamento entre as linhas de voo determinam a resolução do levantamento. O espaçamento é geralmente de 1 a 2 km para as linhas de voo com uma densidade de medidas ao longo de cada linha de 50 a 100 m [35].

Durante o aerolevantamento não são apenas as linhas de medição que são sobrevoadas, mas também as linhas perpendiculares a estas com um maior espaçamento. Essas linhas que constituem as linhas de controle são chamadas de *"Ties"* (amarras), garantindo a calibração dos dados através da medição dupla no mesmo ponto, como pode ser observado na figura 6 [36].

Nos aerolevantamentos radiométricos, os dados são corrigidos para as mudanças de altitude, radônio atmosférico e radiação cósmica de fundo, e processados para gerar resultados demonstrados em concentrações dos elementos Urânio, Tório e Potássio, com base em dados de calibração recolhidos das concentrações avaliadas e voos de teste sobre as áreas de conhecidas concentrações de terra e níveis de radiação [36].



Figura 6: Exemplo de aquisição de dados por aerolevantamento [34].

## V. PROCESSAMENTO E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS

Todo o município de São Francisco de Itabapoana se encontra coberto por levantamento aeroradiométrico realizado por aeronave Bandeirante com intervalo de amostragem de 100 m, perfis espaçados de 1 km e linhas de medida na direção N-S. O gamaespectrômetro utilizado no levantamento foi o Geometrics GR-800A com cristais de iodeto de sódio ativado por tálio e volume de 3072 polegadas cúbicas.

No processamento dos dados, foi utilizado um banco de dados aerogeofísicos (Projeto Código 1038) disponibilizado pela CPRM – Serviço Geológico do Brasil nos formatos "xyz" e "gdb" (Geosoft Database). Os levantamentos constam de medidas aéreas da radiação natural gama emitida pelo solo e formações geológicas próximas à superfície.

NUNES, G. N.; CALANCA, J. A. B., FIGUEIREDO, K. S. P. et al. Revista de Engenharias da Faculdade Salesiana n.8 (2018) pp. 2-13

As medições gama espectrométricas incluíram radiações emitidas pelos elementos potássio (K), Urânio (U) e Tório (Th). Os resultados foram registrados como contagem por segundo (cps) dos canais referentes a esses elementos e também a contagem total (CT).

Foram processados dados de uma área abrangendo todo o município de São Francisco de Itabapoana que proporcionaram um estudo regional (figura 8). A interpolação dos dados foi realizada através do método de mínima curvatura com o uso de células de 250 m, devido aos dados estarem paralelamente distribuídos com linhas de voo de 1 km. Os dados coletados são apresentados na figura 7.



Figura 7: Dados coletados na região de São Francisco de Itabapoana.

Os dados brutos receberam as correções de rotina do método radiométrico como as correções de altura, Background e Efeito Compton.



Figura 8: Principais localidades em São Francisco de Itabapoana Note-se que este mapa geográfico superpõe o mapa de dados coletados (figura 7). [37].

A seguir serão apresentados e comentados os mapas de contagem corrigidos de Tório na figura 9, Urânio na figura 10, Potássio na figura 11, Contagem Total na figura 12 e Mapa Ternário na figura 13.

#### A. CONTAGEM DO TÓRIO

A figura 9 apresenta a contagem de Tório para a região de São Francisco de Itabapoana.



Comparando os mapas das figuras 2, 8 e 9 pode-se observar maiores contagens de Tório chegando a 82 cps ocorrendo na região norte do município se estendendo até Barra de Itabapoana e também pelas praias de Itabapoana, Lagoa Doce, Ponto do Retiro, Guriri, Ponta Buena e Buena. Essas contagens são associadas à presença de gnaisses e granadas da Unidade MNps (Complexo Paraíba do Sul -Unidade São Fidélis) e areias e cascalhos da Unidade Tb (Grupo Barreiras).

Percebe-se baixa contagem (menores que 10 cps) ao longo dos dois rios que limitam o município Rio Itabapoana (ao norte) e Rio Paraíba do Sul (ao sul). Essas baixas contagens nos arredores dos rios são associadas aos Depósitos Fluviais e Flúvio-Marinhos (Qha) envolvendo areias, sedimentos lacustrinos e manguezais nas margens do rio.

Na região sul do mapa, também há contagens baixas próximo a Santa Clara e praia de Santa Clara se estendendo até Gargaú e Ilha do Lima, além das lagoas Grande, do Funil e Salgada.

Analogamente, essas contagens sendo associadas aos Depósitos Fluviais e Flúvio-Marinhos (Qha) envolvendo areias, sedimentos lacustrinos e manguezais e também aos Depósitos Flúvio-Marinhos (Qphm) ricos em matéria orgânica, englobando linhas de praia atuais a antigas, além de manguezais.

## B. CONTAGEM DE URÂNIO

A figura 10 apresenta a contagem de Urânio para a região de São Francisco de Itabapoana.



Comparando os mapas das figuras 2, 8 e 10, pode-se observar resultado análogo ao Tório, com maiores contagens de Urânio chegando a 16 cps, ocorrendo na região norte do município, estendendo-se até Barra de Itabapoana e também pelas praias do litoral norte (Itabapoana, Lagoa Doce, Ponto do Retiro, Guriri, Ponta Buena e Buena). Essas contagens também são associadas à presença de gnaisses e granadas da Unidade MNps (Complexo Paraíba do Sul - Unidade São Fidélis) e areias e cascalhos da Unidade Tb (Grupo Barreiras).

Percebe-se baixa contagem (menores que 4 cps), ao longo dos dois rios que limitam o município, sendo no rio Itabapoana (ao norte) associada aos Depósitos Fluviais e Flúvio-Marinhos (Qha) envolvendo areias, sedimentos lacustrinos e manguezais nas margens do rio.

Na região sul do mapa, também há contagens baixas no litoral sul (Praias de Guaxindiba, Maguinhos, Sonho e Ilha do Lima até Atafona), além das lagoas Grande do Funil e Salgada. Analogamente, sendo associadas aos Depósitos Fluviais e Flúvio-Marinhos (Qha), envolvendo areias, sedimentos lacustrinos e manguezais e também aos Depósitos Flúvio-Marinhos (Qphm) ricos em matéria orgânica, englobando linhas de praia atuais a antigas, além de manguezais.

#### C. CONTAGEM DE POTÁSSIO

A figura 11 apresenta a contagem de Potássio para a região de São Francisco de Itabapoana.



Usando os mapas das figuras 2, 8 e 11 como referência, notou-se que em geral as contagens de potássio foram baixas em toda a região, sendo um pouco maior na região sul.

Na região norte a mais alta contagem ocorreu nas margens do Rio Itabapoana. Na região sul, especificamente próximo a Lagoa Salgada, Lagoa do Funil e Valão das Cacimbas, expandindo-se até a localidade de Campo Novo e Lagoa Campelo, apresentando valores de contagem chegando a 20 cps.

A mais elevada contagem pode ser observada também em São João da Barra, Atafona, Praia de Atafona e Grussaí. Essas regiões de mais alta contagem são dominadas pelas unidades Qphm (Depósito Marinho e Flúvio-Marinho) e Qha (Depósito Colúvio-Aluvionar).

A região de menor contagem foi a de Ponto de Cacimbas e Pingo d'Água, tomando parte do entorno dos córregos de Guaxindiba e da Liberdade (em torno de 1 cps).

Pode-se notar também baixa contagem nas praias do litoral norte (Itabapoana, Lagoa Doce, Ponto do Retiro, Guriri, Ponta Buena e Buena). Essas baixas contagens são associadas às unidades MNps (Complexo Paraíba do Sul - Unidade São Fidélis), Unidade Tb (Grupo Barreiras) e Unidade N $\gamma$ 2b (Suite Bela Joana).

#### D. CONTAGEM TOTAL

A figura 12 apresenta a contagem total para toda a faixa de 0,41 MeV até 2,81 MeV para a região de São Francisco de Itabapoana.



O mapa de contagem total da região de São Francisco de Itabapoana e todo seu entorno destacam unidades geológicas importantes de toda a área, diferenciando as regiões de altas e baixas contagens (figura 12).

As maiores contagens estão espalhadas ao longo do mapa e localizam-se em grande parte na região norte e praias do litoral norte (Itabapoana, Lagoa Doce, Ponto do Retiro, Guriri, Ponta Buena e Buena). Essas contagens são associadas à presença de gnaisses e granadas da Unidade MNps (Complexo Paraíba do Sul - Unidade São Fidélis) e areias e cascalhos da Unidade Tb (Grupo Barreiras).

Percebe-se baixas contagens ao longo dos dois rios que limitam o município, sendo no Rio Itabapoana (ao norte) e Rio Paraíba do Sul (ao sul) associadas aos Depósitos Fluviais e Flúvio-Marinhos (Qha) envolvendo areias, sedimentos lacustrinos e manguezais nas margens do rio.

Na região sul do mapa, também há contagens baixas no litoral sul (Praias de Guaxindiba, Maguinhos, Sonho e Ilha do Lima até Atafona), além das lagoas Grande, do Funil e Salgada, sendo associadas aos Depósitos Fluviais e Flúvio-Marinhos (Qha) envolvendo areias, sedimentos lacustrinos e manguezais e também aos Depósitos Flúvio-Marinhos (Qphm) ricos em matéria orgânica, englobando linhas de praia atuais a antigas, além de manguezais.

#### E. MAPA TERNÁRIO

Também foi confeccionado o Mapa Ternário de Radioatividade de São Francisco de Itabapoana que é capaz de associar as ocorrências de Urânio, Tório e Potássio em uma única imagem (Figura 13).

Um mapa ternário de radioelementos é uma imagem colorida composta, gerada pela modulação do vermelho, verde e azul (RGB), ou amarelo, magenta e ciano (CMY), na proporção dos valores de concentração dos radioelementos nas malhas do Urânio, Tório e Potássio [38].

Uma normalização pode ser útil para reduzir os efeitos de atenuação dos raios gama pela vegetação ou pela umidade do solo e atenuar o efeito das grandes contagens de Tório na visualização, sendo os canais de radioelementos calculados pelas equações (1), (2) e (3) como segue [38]:

$$K_n = \frac{K}{K + U + Th/4} \tag{1}$$

$$U_n = \frac{U}{K + U + Th/4} \tag{2}$$

$$Th_n = \frac{Th/4}{K + U + Th/4} \tag{3}$$



De acordo com o Mapa Ternário (figura 13), notou-se que a região Sul é dominada pelo elemento Potássio, abrangendo Santa Clara, Gargau até Campo Novo e parte do Valão das Cacimbas.

Na parte Noroeste e Central, compreendendo a região de Ponto de Cacimbas, Pingo d'Água e Morro Grande, o elemento predomiante é o Urânio.

região Norte, Nordeste e Oeste-Sudoeste, Na especificamente em Máquinas, Travessão da Barra, passando pelo Córrego Santa Luzia, Córrego do Valão Seco, Rio Guaxindiba até Boa Vista, o elemento Tório foi predominante.

## F. PERFIS RADIOMÉTRICOS

Foram analisadas duas transectas de dados (Figura 14), sendo o perfil A-B de no sentido oeste para leste com aproximadamente 38 km e o perfil C-D no sentido norte para sul com aproximadamente 50 km.



km) e C-D (50 km) estudadas.

O perfil A-B (figura 15) apresenta a relação entre as contagens da janela de Tório com as altitudes ortométricas da transecta estudada e as unidades geológicas presentes.



De maneira geral as contagens mais altas ocorreram nas menores altitudes, com uma importante exceção na região associada ao Complexo Paraíba do Sul com um pico na contagem do canal de tório com quase 100 cps.

Foram explorados em um perfil C-D (figura 16) com direção Norte - Sul, em conjunto com os valores de altitude ortométrica oriundos do DEM, os diferentes patamares anômalos de contagem de radiação para as três janelas dos radioelementos, em função de prováveis contatos geológicos com diferentes litologias, mapeadas e verificadas na área de estudo.



Figura 16: Evolução das janelas de Tório, Urânio, Potássio e Contagem Total ao longo da transecta de C (norte) para D (sul).

Partindo-se do norte na região do leito do Rio Itabapoana, verifica-se baixas contagens de urânio, tório e contagem total e uma contagem intermediária (em torno de 6 cps) para o canal de potássio, associadas aos depósitos fluviais (Qha); na unidade barreiras (Tb) (depósitos detríticos), são encontradas altas contagens de urânio, tório e contagem total, porém contagem quase nula do canal de potássio; no Complexo Paraíba do Sul (MNps), ocorre contagens intermediárias de urânio, tório, potássio e contagem total; em outro trecho dominado pelo Grupo Barreiras (Tb) apresentam-se altas contagens intermediárias e decrescentes em todos os canais na medida em que as cotas diminuem indo em direção ao Sul; ao atravessar os depósitos arenosos (Qphm) nas imediações da Lagoa do Campelo, encontram-se as mais altas contagens do canal de potássio em torno de 12 cps e as mais baixas contagens dos canais de urânio, tório e contagem total; por fim, nos depósitos fluviais (Qha) do Rio Paraíba do Sul, identifica-se um pequeno incremento nas contagens de urânio, tório e contagem total e um decréscimo nas contagens de potássio.

# G. ANÁLISE DA REGIÃO FONTE DE TERRAS-RARAS

Sintetizando as informações dos itens anteriores quanto à principal região de exploração de Terras-Raras (Praia de Buena), foi observado que essa região bem como todo o litoral norte (praias de Itabapoana, Lagoa Doce, Ponto do Retiro, Guriri, Ponta Buena e Buena) apresentaram contagens altas de Urânio (faixa 1,66 MeV–1,86 MeV), Tório (faixa 2,41 MeV–2,81 MeV) e Contagem Total (faixa 0,41 MeV–2,81 MeV) e contagem mais baixa apenas para o Potássio (faixa 1,37 MeV–1,57 MeV).

Essas contagens anormalmente mais altas para linhas de praias do litoral norte de São Francisco de Itabapoana, foram associadas ao Grupo Barreiras com depósitos detríticos pobremente selecionados com granulometria cascalho, areia argilo-arenosa e argilas geralmente contendo horizontes lateríticos. Sendo essa mesma região rica em monazita, um minério com um grande teor de fosfato e com elevado teor de cério, lantânio, neodímio, dentre outras Terras-Raras, além de elementos radioativos como tório e urânio, que tiveram as contagens mais altas de radioelementos. Dessa forma, através do método radiométrico foi possível identificar altas contagens em todo o litoral norte da região estudada. Em especial altas contagens de Tório que é um dos principais constituintes da monazita (Ce, La, Y, Th)PO<sub>4</sub> de onde são extraídas Terras-Raras.

#### VI. CONCLUSÕES

Neste trabalho os conceitos sobre radioatividade foram explorados, com a contextualização das Terras-Raras presentes no litoral norte de São Francisco de Itabapoana.

Com os dados obtidos, foram elaborados os mapas corrigidos de Tório, Urânio, Potássio, Contagem Total e Mapa Ternário, onde se pode destacar as principais formações geológicas e as contagens radiométricas de cada elemento citado. A comparação dos resultados proporcionou a identificação das áreas com maior e menor contagem radiométrica, possibilitando o reconhecimento dos elementos presentes nas unidades geológicas.

Observou-se que a região norte de São Francisco de Itabapoana, de maneira geral, apresenta maiores contagens radiométricas, sendo a única exceção para o Potássio. Os resultados obtidos nos mapas apresentaram boa diferenciação radiométrica entre regiões dominadas por sedimentos, depósitos arenosos e manguezais com baixas contagens ao longo dos dois rios que limitam o município, sendo no Rio Itabapoana (ao norte) e Rio Paraíba do Sul (ao sul), de outras regiões dominadas por granitos e gnaisses, além do litoral norte com contagens mais altas.

Os mapas gerados fornecem uma base para futuros estudos geológicos, geoquímico, radiológico e ambiental. Possibilita também o conhecimento dos elementos Terras-Raras, que são de extrema importância e pouca notoriedade atual.

Por fim, sugere-se para trabalhos futuros a conversão dos valores de contagens por segundo (cps) para concentração em % para o Potássio e ppm para o Tório e o Urânio. Sugere-se também um estudo aprofundado realizado em solo, evidenciando o litoral norte de São Francisco de Itabapoana devido à alta contagem radiométrica na costa norte do município, trazendo à tona dados mais precisos dessa parte do município o que pode corroborar de forma aditiva e comparativa com os dados e conhecimentos evidenciados neste trabalho.

#### REFERÊNCIAS

- ROCIO, Marco Aurélio Ramalho *et al.* Terras-raras: situação atual e perspectivas. Rio de Janeiro: [s.n.], 2012. 419 p. Disponível em: <a href="http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/1527">http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/1527</a>>. Acesso em: 17 out. 2017.
- MARTINS, Tereza S.; ISOLANI, Paulo Celso. Terras Raras: Aplicações Industriais e Biológicas. São Paulo: [s.n.], 2004. 7 p. v. 28. Disponível em: <a href="http://quimicanova.sbq.org.br/imagebank/pdf/Vol28No1\_111\_19-DV04036.pdf">http://quimicanova.sbq.org.br/imagebank/pdf/Vol28No1\_111\_19-DV04036.pdf</a>). Acesso em: 17 out. 2017.
- [3] FREITAS, Antônio Alves de. Recuperação de tório e terras-raras via peróxido do resíduo originado na unidade de purificação de tório. 2008. 86 p. a (Ciências na Área de Tecnologia Nuclear Materiais) Autarquia associada à Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. Disponível em: <a href="http://pelicano.ipen.br/PostG30/TextoCompleto/Antonio%20Alves%20">http://pelicano.ipen.br/PostG30/TextoCompleto/Antonio%20Alves%20</a> de%20Freitas\_M.pdf>. Acesso em: 07 mar. 2017.

- [4] ROSENTAL, S. Terras raras. In: Rochas Minerais Industriais: Usos e Especificações, Parte 2 – Rochas e Minerais Industriais: Usos e Especificações, cap. 36, p. 817 – 840, Cetem, Rio de Janeiro, dez. 2008. Disponível em: http://www.cetem.gov.br/publicacao/CTs/CT2008-188-00.pdf. Acesso em: 19 jul. 2018.
- [5] LOUREIRO, F. E. L.; SANTOS, R. L. C.(Ed.) O Brasil e a reglobalização da indústria das terras raras. Rev. Prof. Iran Ferreira Machado. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2013. 216p.
- [6] LINS, F. INB, CNEM e CMBB: a radioatividade associada às terrasraras. 2013. Disponível em: <a href="http://www.senado.gov.br/noticias/Jornal/emdiscussao/terrasraras/contexto/inb-cnem-e-cmbb-a-radioatividade-associada-as-terrasraras.aspx>. Acesso em: 24 abr. 2017.</a>
- [7] SILVA, D. R. A. Aplicação de métodos radiométricos (Rb-Sr e Sm-Nd) na análise de bacias sedimentares – o exemplo da Bacia do Paraná. Porto Alegre, 2006. Disponível em: <a href="http://www.cprm.gov.br/publique/media/mestra\_diogo\_rodrigues.pdf">http://www.cprm.gov.br/publique/media/mestra\_diogo\_rodrigues.pdf</a>. Acesso em: 09 mar. 2017.
- [8] MADRUCCI, V. Avaliação dos Produtos Integrados TM-LANDSAT, RADARSAT e Gamaespectrométricos na Caracterização Tectônica e Mapeamento Geológico de Área Mineralizada em Ouro na Região de Alta Floresta – MT. São José dos Campos: INPE, 1999.
- [9] SAPUCAIA, N. S., ARGOLLO, R. M., BARBOSA, J. S. F. Teores de potássio, urânio, tório e taxa de produção de calor radiogênico no embasamento adjacente às bacias sedimentares de Camamu e Almada, Bahia, Brasil. Rev. BRAS. Geof. Vol.23, 2005. Disponível em: <a href="http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\_arttext&pid=S0102-261X2005000400008">http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\_arttext&pid=S0102-261X2005000400008</a>. Acesso em: 10 mar. 2017.
- [10] TCE/RJ. Estudo Socioeconômico: São Francisco do Itabapoana. Disponível em: <a href="http://www.tce.rj.gov.br/web/guest/estudos-socioeconomicos1?p\_auth=L4SpOCpv&p\_p\_id=estudossocioeconomico-municipios\_WAR\_tcerjestudosocioeconomicomunicipiosportlet&p\_p\_lintfecycle=1&p\_p\_state=normal&p\_p\_mode=view&p\_p\_col\_id=column-1&p\_p\_col\_count=1&\_estudosocioeconomicomunicipios\_WAR\_tcerjestudosocioeconomicomunicipios\_WAR\_tcerjestudosocioeconomicomunicipios\_WAR\_tcerjestudosocioeconomicomunicipiosportlet\_doSearch=doSearch&\_estudosocioeconomicomunicipiosportlet\_javax.portlet.action=doSearch>. Acesso em: 19 jan. 2018.
- [11] GOOGLE. Google Earth. Version 7.3. São Francisco do Itabapoana. Disponível em: <a href="http://www.google.com/earth/download/gep/agree/html">http://www.google.com/earth/download/gep/agree/html</a>. Acesso em: 01 nov. 2018.
- [12] L.C. SILVA, H.C.S. CUNHA. Geologia do Estado do Rio de Janeiro: Texto explicativo do mapa geológico do Estado do Rio de Janeiro. 2. ed. Brasília, CPRM, 2001.
- [13] SANDWELL, D.T.; GARCIA, E.; SOOFI, K.; WESSEL, P.; SMITH, W. H. F. "Towards 1 mGal Global Marine Gravity from CRYOSAT-2, ENVISAT and JASON-1." The Leading Edge, 32(8), 892899. 2013
- [14] SOUSA FILHO, Paulo C. de; SERRA, Ösvaldo A. Terras raras no brasil: histórico, produção e perspectivas. 2013. 8 p. Artigo científico (Departamento de Química, Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto), Universidade de São Paulo, USP, 2014. 37. Disponível em: <http://quimicanova.sbq.org.br/imagebank/pdf/v37n4a29.pdf>. Acesso em: 04 jun. 2018.
- [15] LIMA, Abilio. Estudo Geral. Disponível em:<https://estudogeral.sib.uc.pt/bitstream/10316/2549/1/AbilioAMLim a\_MSc.pdf>. Acesso em:14 out. 2017.
- [16] SERRA et al. A Luz e as Terras Raras. Rev. Virtual Quim. 2014, 7 (1), 242-264. Data de publicação na Web: 28 de outubro de 2014.
- [17] BRAGA, Guilherme Bettio. A química das terras raras e suas potencialidades. 2014. 30 p. Monografia (Bacharelado em Química)-Faculdade de Química, Universidade Federal de São João del-Rei, UFSJ, 2014. Disponível em: <a href="https://www.ufsj.edu.br/portal2repositorio/File/coqui/TCC/Monografia-TCC\_Guilherme\_B\_Braga-20142.pdf">https://www.ufsj.edu.br/portal2repositorio/File/coqui/TCC/Monografia-TCC\_Guilherme\_B\_Braga-20142.pdf</a>>. Acesso em: 17 out. 2017.
- [18] COELHO, Flávia dos Santos et al. Óxidos de ferro e monazita de areias de praias do espírito santo. Quim. Nova, Belo Horizonte, v. 28, p. 233-237, ago. 2014. Disponível em: <a href="http://www.scielo.br/pdf/qn/v28n2/23644.pdf">http://www.scielo.br/pdf/qn/v28n2/23644.pdf</a>. Acesso em: 19 nov. 2017.
- [19] VIERA, Elbert Valdiviezo; LINS, Fernando Freitas. Série: Tecnologia Mineral: Concentração de Minérios de Terras Raras: uma revisão. CETEM: [s.n.], 1997. 59 p. Disponível em:

<http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/127/1/stm-73.pdf>. Acesso em: 19 nov. 2017.

- [20] FILHO, Paulo C. de Sousa; SERRA, Osvaldo A. Terras Raras no Brasil: Histórico, Produção e Perspectivas. São Paulo: Química Nova, 2014.
- [21] CETEM. Exploração de terras raras em São Francisco do Itabapoana (RJ) afeta meio ambiente. 2013. Disponível em: <a href="http://verbetes.cetem.gov.br/verbetes/ExibeVerbete.aspx?verid=133">http://verbetes.cetem.gov.br/verbetes/ExibeVerbete.aspx?verid=133</a>>. Acesso em: 18 out. 2018.
- [22] INB. Buena Unidade de Minerais Pesados, 2012. Disponível em: http://www.inb.gov.br/inb/WebForms/interna.aspx?secao\_id=62. Acesso em: 18 out. 2018.
- [23] ERNESTO, M.; USSAMI, N. Introdução à Geofísica. São Paulo: Departamento de Geofísica da AIG/USP, 2002.
- [24] KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. An Introduction to Geophysical Exploration. 3<sup>a</sup> ed. Blackwell Science Ltd., 2002.
- [25] V.B. Ribeiro; M.S.M. Mantovani; V.H.A. Louro, "Aerogamaespectrometria e suas aplicações no mapeamento geológico." Terra e Didática, v. 10, n. 1, p. 29-51, 2013.
- [26] VASCONCELLOS, R. M.; METELLO, M. J.; MOTTA A.C.; GOMES R. D. 1994. "Geofísica em levantamentos geológicos". Rio de Janeiro: CPRM. p 165.
- [27] TELFORD, W.M; GELDART, L.P; SHERIFF, R.E. Applied Geophysics. Cambridge: Cambridge University Press 770p. 1990.
- [28] Porto Editora, 2003-2018. Artigos de apoio (Tório). Disponível em:<https://www.infopedia.pt/apoio/artigos/\$torio> Acesso em: 14 out. 2017.
- [29] PEDROLO, Caroline. 2014. Uranio. Disponível em:< https://www.infoescola.com/elementos-quimicos/uranio/>. Acesso em: 14 out. 2017.
- [30] NATEL, André. 2017. Potássio. Disponível em: <a href="https://escola.britannica.com.br/levels/fundamental/article/pot%C3%A1ssio/482269">https://escola.britannica.com.br/levels/fundamental/article/pot%C3%A1ssio/482269</a>>. Acesso em: 14 out. 2017.
- [31] SÁ, C.B.; RIBEIRO, A.S; SANTOS, H.S.; FREITAS F.B.V. Processamento de Dados Aerogamaespectrométricos e sua Contribuição para o Conhecimento da Geologia da Região de Casimiro de Abreu. Revista de Engenharias da Faculdade Salesiana, n5, pp.27-36, 2017.
- [32] GUIMARÃES, S.N.P. Avanços Recentes na Determinação das Estruturas Geológicas em Subsuperfície da Província Uranífera Lagoa Real (BA) a Partir de Dados Aerogeofísicos. Rio de Janeiro, RJ: Observatório Nacional, 2009.
- [33] BARBOSA, M. Geofísica. Universidade Federal de Outro Preto, Departamento de Geologia, 2003.
- [34] TELLES, A.; RABELO, A. Seminário sobre Aerolevantamento e Defesa: Potencialidade do Levantamento Aerogeofísico. Curitiba: LASA Prospecções S/A, 2013. Disponível em: < http://www.anea.org.br/evento/PotencialidadeLevantamentoAerogeofisi co.pdf>. Acesso em 03 de fev. 2018.
- [35] NASCIMENTO, L.S. "Análise de Dados de Espectrometria Gama Aérea e de Sensoriamento Remoto do Estado do Rio de Janeiro por Redes Neurais Artificiais." Aplicação ao Mapeamento Geológico Digital." Rio de Janeiro. 2003.
- [36] COETZEE, H. LARKIN, J. Application of the airborne radiometric method in radiation protection applications. 11th SAGA Biennial Technical Meeting and Exhibition, Swaziland, p. 453–455, set. 2009.
- [37] NOLASCO, José Maurício de Lima. Estudos socioeconômicos dos municípios do estado do Rio de Janeiro-São Francisco de Itabapoana: TCR/RJ. Rio de Janeiro/RJ: [s.n.], 2008. 76 p.
- [38] SILVA, J.R.S. Estudo do Levantamento Aerogeofísico do Estado do Rio de Janeiro na Região dos Lagos. Observatório Nacional, 2007.