



Universidade de Brasília
Instituto de Geociências
Pós-graduação em Geociências Aplicadas

Métodos geofísicos aplicados à prospecção de fosforitos na região nordeste do Estado de Goiás

Dissertação de Mestrado

Chris Busnello Fianco

Orientadora Professora Dra. Roberta Mary Vidotti

Co-orientador Professor Dr. Augusto C. B. Pires

Brasília, 2011



Universidade de Brasília
Instituto de Geociências
Pós-graduação em Geociências Aplicadas

Métodos geofísicos aplicados à prospecção de fosforitos na região nordeste do Estado de Goiás

Dissertação de Mestrado

Chris Busnello Fianco

Orientadora Professora Dra. Roberta Mary Vidotti

Co-orientador Professor Dr. Augusto C. B. Pires

Examinador: Professor Dr. Francisco José Fonseca Ferreira

Examinadora: Professora Dra. Lucieth Cruz Vieira

Suplente: Professor Dr. José Elói G. Campos

Brasília, 2011

Agradecimentos

Ao Instituto de Geociências da Universidade de Brasília (IG/ UnB) e Laboratório de Geofísica Aplicada (LGA/IG/UnB) por toda a infraestrutura e equipamentos disponibilizados e aos professores do IG pelo conhecimento compartilhado

Ao Luiz Bizzi pelo apoio e incentivo, e à Itafós Mineração Ltda, geólogos e técnicos pelo apoio e infra-estrutura na etapa de campo, pelas informações disponibilizadas e pela permissão para publicação dos dados.

À Superintendência de Geologia e Mineração do Governo do Estado de Goiás pela cessão dos dados aerofísicos (área V).

À Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de incentivo à pesquisa

Agradeço aos meus orientadores Prof. Dra. Roberta Mary Vidotti e Prof. Dr. Augusto C. B. Pires, e a Prof. Dra. Adriana C. Chatack, que durante todo este tempo, e até mesmo antes do mestrado começar, sempre me encorajaram para a realização deste importante passo na minha vida; e também por todo conhecimento e tempo disponibilizados, apoio e paciência

À HGeo|Intergeo por grande parte do conhecimento geofísico que adquiri e pelo apoio durante o tempo que trabalhei com vocês, permitindo que eu me ausentasse da empresa em alguns períodos para que eu pudesse cursar disciplinas.

Aos meus pais Assis e Rejane, e aos meus irmãos Schana e Roger, que mesmo de tão longe sempre me apoiaram em todas as decisões tomadas e pelo incentivo na conquista de mais uma etapa da minha vida. Obrigada pela força, segurança, carinho, amor e exemplos de vida que vocês são.

Não posso deixar de agradecer a minha segunda família, que durante estes anos todos que morei em Brasília me acolheu como filha e irmã. Obrigada tio Flávio, tia Rosana, e primos Diego, Flávia, Simone e Daniel.

Agradeço todos meus familiares por me ensinar todos os verdadeiros valores da vida.

Obrigada Roberta Vidotti por sua amizade e incentivo, sempre me ajudando e orientando para que eu pudesse escolher o melhor caminho a seguir, me apoiando em todas as decisões.

À todos os meus amigos e colegas de mestrado pela ajuda, incentivo, carinho, e que de uma forma ou de outra contribuíram para que este trabalho fosse possível.

À uma pessoa muito especial que conheci há 11 meses atrás e tem me incentivado a concluir mais esta etapa da minha vida com muito carinho.

Aos meus novos colegas da Vale pela força e incentivo na reta final deste trabalho.

Enfim, AGRADEÇO a TODOS que contribuíram para que eu pudesse obter mais esta conquista.

*“ Viver!
E não ter a vergonha
De ser feliz...”*

Gonzaguinha – Eterno Aprendiz

Obrigada!

Resumo

A crescente busca por alimentos em função do aumento populacional, e a qualidade do solo brasileiro, fez crescer nos últimos anos de forma acelerada a busca por insumos agrícolas, e com isso a procura por novos depósitos de fósforo e viabilização das ocorrências já conhecidas, visto que o P é um elemento fundamental na composição dos fertilizantes.

Assim como ocorre na maioria dos países produtores de fosfato no mundo, as ocorrências conhecidas na área de trabalho tem origem sedimentar, contudo, diferentemente da grande maioria deste tipo de depósito, os corpos nesta região não possuem grandes dimensões, o que dificulta o trabalho de prospecção.

A área de estudos está localizada na região central do Brasil, no nordeste do Estado de Goiás e, encontra-se inserida no Grupo Bambuí, na parte leste da Faixa de Dobramentos Brasília (FDB), na borda oeste do Cráton São Francisco. O Grupo Bambuí possui um ambiente favorável à formação de rochas fosfáticas, fato que torna a região uma área potencialmente econômica na busca por fosfato.

A utilização do processamento dos dados aerogeofísicos magnetométrico e gamaespectrométrico em conjunto com os dados geoquímicos tem como objetivo a otimização dos trabalhos de prospecção do minério fosfático, uma vez que a apatita, $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH},\text{F},\text{Cl})$, na grande maioria das vezes apresenta um elevado teor de urânio.

O processamento dos dados aerogeofísicos e geoquímicos, utilizando-se do método estatístico de regressões múltiplas, deu origem a mapas de estimativa de urânio e fósforo, mostrando assim as áreas enriquecidas nestes elementos na região. Estes mapas gerados por meio do processamento estatístico, juntamente com a geologia de domínio público para a área, foram utilizados como base para a seleção dos cinco alvos para a pesquisa detalhada (“follow up”).

A realização do “follow up” constou da aquisição de, aproximadamente, 10 km lineares de dados gamaespectrométricos terrestres, ao longo de cinco perfis pré-selecionados e estações distantes 20 metros uma das outras, o que totalizou 527 estações.

A análise dos dados radiométricos obtidos e suas razões indicam que o enriquecimento de urânio em relação ao potássio é bem mapeado pelas razões U/Th e U/K, o que foi confirmado em check de campo; conclui-se assim que as regiões com valores anômalos destas razões são áreas potenciais para a prospecção dos fosforitos.

Palavras chave: Geofísica aplicada, regressões múltiplas, fosforitos, urânio, Grupo Bambuí.

Abstract

The growing demand for food due to an increasing population, and the poor quality of the Brazilian soil has increased in an accelerated way the search for agricultural inputs in the last few years. Since Phosphorus is an important element in fertilizer composition, it became imperative to search for new P deposits and to make known occurrences economically feasible. .

Phosphorus deposits have three different sources, igneous, sedimentary and chemical. In general, the largest phosphate deposits known are sedimentary, and these are also the most common worldwide. As it happens in most phosphate producer countries in the world, the known occurrences in the work area has sedimentary origin; however, different from the majority of these deposits, the bodies in this region are the smallest, which makes the prospecting job difficult.

The project area is situated in the central part of Brazil, on the northeast region of Goiás State, inserted in the Bambuí Group, on the east part of Faixa de Dobramentos Brasília (FDB), the western border of the São Francisco Craton. The Bambuí Group has a favorable environment that forms phosphatic rocks, making this area potentially economic to search for phosphate.

In order to discover new prospective targets of sedimentary phosphatic bodies, a faster and more objective airborne geophysics data processing method (magnetometric and radiometric data) was used together with statistical correlation of geochemical data, once the apatite, $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH},\text{F},\text{Cl})$, most of the time has high content of uranium.

The processing of airborne geophysics and geochemistry data known using statistical method of multiple regressions, generate maps of uranium and phosphorous estimates, showing areas rich in these elements in the region. These maps generated from statistical method, together with public geological data of the area, were used like bases to provide potential targets of mineralization to be checked with gamma ray follow up.

For this purpose, approximately 10 linear kilometers (527 stations) of ground gamma ray spectrometry data was acquired along five pre-selected profiles based on known geophysical data, geochemical and geological information.

The analysis of the uranium, thorium and potash elements obtained and their ratios indicate that the enrichment of U relative to K is well mapped by the ratios U/Th and U/K, like it was confirmed by check field, and regions with anomalous content of these ratios are mainly areas of phosphorite prospection.

Keywords: Applied geophysics, multiple regressions, phosphorites, uranium, Bambuí Group.

Sumário

Agradecimentos	I
Resumo	IV
Abstract	VI
Sumário	VIII
Índice de Figuras	XI
Índice de Tabelas	XIV

Capítulo 1

Introdução	15
------------	----

Capítulo 2

Objetivos	18
-----------	----

Capítulo 3

Localização	19
-------------	----

Capítulo 4

Revisão Bibliográfica	21
4.1. Fosfato sedimentar	22
4.1.1. Reservas	23
4.1.2. Depósitos Brasileiros de Fosfato Sedimentar	24
4.2. Contexto Geológico da Área	27
4.3. Aerogeofísica aplicada a fosfato (Magnetometria e Gamaespectrometria)	30
4.3.1 Magnetometria	31
4.3.2 Gamaespectrometria	31
4.4. Geofísica terrestre aplicada à fosfato (Gamaespectrometria)	32
4.5. Geoquímica aplicada à fosfato	34

Capítulo 5

Materiais, Métodos e Técnicas _____	36
5.1. Geofísica Aérea _____	36
5.1.1. Introdução _____	36
5.1.2. Base de Dados, Controle de qualidade e Pré-processamento _____	36
5.1.3. Magnetometria _____	40
5.1.3. Gamaespectrometria _____	45

Capítulo 6

Prospecção de fosforitos utilizando geofísica aérea no nordeste de Goiás _____	48
Abstract _____	48
Resumo _____	48
6.1. Introdução _____	49
6.2. Metodologia _____	53
6.3. Interpretação qualitativa _____	61
6.4. Regressão múltipla _____	64
6.5. Discussões e Conclusões _____	77
6.6. Agradecimentos _____	79
6.7. Referências bibliográficas _____	79

Capítulo 7

Prospecção de fosforitos utilizando gamaespectrometria terrestre no nordeste de Goiás _	81
Abstract _____	81
Resumo _____	81
7.1. Introdução _____	82
7.2. Aquisição de dados _____	87
7.3. Análise dos dados _____	88
7.4. Discussão e Conclusões _____	99
_____	IX

7.5. Agradecimentos _____ 100

7.6. Referências bibliográficas _____ 101

Capítulo 8

Discussões e Conclusões _____ 102

Capítulo 9

Referências Bibliográficas _____ 104

Índice de Figuras

Capítulo 3

Fig. 1 – Mapa de localização da área de estudos, região nordeste do Estado de Goiás, Brasil. Em vermelho a área de estudo, e as linhas azuis indicam as principais estradas do Estado. 20

Capítulo 4

Fig. 1 – Mapa geológico regional simplificado do nordeste de Goiás e sudeste do Tocantins (modificado de Monteiro, 2009). _____ 29

Fig. 2 – Gráfico da relação direta da contagem de raios gama em cps pela porcentagem de fosfato encontrado nas rochas em profundidade. Levantamento feito em furo de sondagem no depósito de Al-Jalamid, Arábia Saudita (Wynn, 1996). _____ 33

Capítulo 5

Fig. 1 – Localização do Aerolevantamento Paleo-Neoproterozóico, 3ª etapa do Estado de Goiás com a imagem ternária RGB da área recoberta. _____ 38

Fig. 2 – Gráfico do espectro de potência radialmente ponderado gerado a partir do campo magnético residual, com indicação das profundidades médias das fontes. _____ 42

Fig. 3 – Imagem do campo magnético residual em nT. _____ 43

Fig. 4 – Imagem da amplitude do sinal analítico em nT/m. _____ 44

Fig. 5 – Imagem do Parâmetro F _____ 47

Capítulo 6

Fig. 1 – Mapa geológico da área de estudo (modificado de Moreira *et al.*, 2008). _____ 51

Fig. 2 – Mapa de localização da área de estudo, nordeste do Estado de Goiás. _____ 52

Fig. 3 - Imagem do canal do K com tabela de cores mostrando valores médios de cada elemento a valores máximos. _____ 55

Fig. 4 - Imagem dos canais do eTh com tabela de cores mostrando valores médios de cada elemento a valores máximos. _____ 56

Fig. 5 - Imagem dos canais do eU com tabela de cores mostrando valores médios de cada elemento a valores máximos. _____ 57

Fig. 6 - Imagem da razão eUK com tabela de cores mostrando valores médios de cada elemento a valores máximos. _____	58
Fig. 7 - Imagem da razão eUeTh com tabela de cores mostrando valores médios de cada elemento a valores máximos. _____	59
Fig. 8 – Imagem ternária RGB (KThU). _____	60
Fig. 9 – Imagem da amplitude do sinal analítico (ASA) com filtro passa alta. _____	63
Fig. 10 – Gráfico da dispersão de tório em função do urânio e as retas de distribuição: em preto a reta original, e em azul a reta deslocada até 2 ppm. _____	65
Fig. 11 – Gráfico da dispersão de potássio em função do urânio e as retas de regressão: em preto a reta original, e em azul a reta deslocada até 2 ppm. _____	65
Fig. 12 – Gráfico da dispersão dos valores da amplitude do sinal analítico em função do urânio e as retas de regressão: em preto a reta original, e em azul a reta deslocada até 2 ppm. _____	66
Fig. 13 – Mapa da estimativa U (ppm), calculado a partir da regressão linear com relação ao K. _____	67
Fig. 14 – Mapa da estimativa de U (ppm), calculado a partir da regressão linear com relação ao Th. _____	68
Fig. 15 – Mapa da estimativa de U (ppm), calculado a partir da regressão linear com relação ao ASA. _____	69
Fig. 16 – Mapa com a disposição dos pontos de sedimento de corrente com valores acima de 600 ppm, o que equivale a média mais 2 desvios padrão. _____	72
Fig. 17 – Mapa da estimativa de urânio em ppm, quando aplicada a equação de regressão do U com relação à Th, K, U/K, U/Th, Th/K e ASA. _____	74
Fig. 18 – Mapa da estimativa de fósforo (ppm), quando aplicada a equação de regressão do P com relação aos elementos U, K, Th, U/K, U/Th, Th/K, ASA. _____	75
Fig. 19 – Mapa da estimativa de urânio em ppm, quando aplicada a equação de regressão do U com relação à K, Th, U, U/K, U/Th, Th/K, ASA, P e F. _____	76
Fig. 20 – Detalhe do mapa de eU (ppm) (Fig. 10) e localização dos quatro perfis selecionados para “follow up” com gamaespectrometria terrestre. _____	78

Capítulo 7

Fig. 1 – Mapa da geologia da área de estudos (modificado de Moreira *et al.*, 2008). _____ 83

Fig. 2 – a) Mapa da estimativa de fósforo em ppm, quando aplicada a equação de regressão do P com relação à U, K, Th, UK, UTh, ThK, ASA. b) Mapa da estimativa de urânio em ppm, quando aplicada a equação de regressão do U com relação à K, Th, U, UK, UTh, ThK, ASA, P e F. _____ 85

Fig. 3 – Mapa de urânio estimado e localização dos 5 perfis de gamaespectrometria terrestre. _____ 86

Fig. 4 – Perfis dos valores dos radioelementos K (a), Th (b), U (c) e a contagem total (d) adquiridos neste trabalho, e as razões U/Th e U/K (e) para o Perfil 1 do Bloco Leste. A seta azul indica a localização do córrego, e as setas marrom regiões anômalas (BE1 e BE2). ____ 89

Fig. 5 – Perfis dos valores dos radioelementos K (a), Th (b), U (c) e a contagem total (d) coletados no campo, e as razões U/Th e U/K (e) para o Perfil 2 do Bloco Lúcia. As setas marrons indicam regiões anômalas (BLu1, BLu2 e BLu3). _____ 91

Fig. 6 – Perfis dos valores dos radioelementos K (a), Th (b), U (c) e a contagem total (d) coletados no campo, e as razões U/Th e U/K (e) para o Perfil 3 do Bloco Cabeçudo. A seta azul indica uma região de brejo, e as setas marrons feições anômalas (BCb1 e BCb2). ____ 94

Fig. 7 – Perfis dos valores dos radioelementos K (a), Th (b), U (c) e a contagem total (d) coletados no campo, e as razões U/Th e U/K (e) para o Perfil 4 do Bloco Avião. As setas deste perfil indicam feições anômalas, sendo as em vermelho com prioridade 1 (BA1) e as marrons com prioridade 2 (BA2, BA3, BA4 e BA5). _____ 96

Fig. 8 – Perfis dos valores dos radioelementos K (a), Th (b), U (c) e a contagem total (d) coletados no campo, e as razões U/Th e U/K (e) para o Perfil 5 do Bloco Coité. A seta azul indica a presença de um córrego na área, e as outras setas regiões consideradas anômalas nos perfis. A seta vermelha indica prioridade 1 (BCo4) de investigação e, as marrons, prioridade 2 (BCo1, BCo2, BCo3 e BCo5). _____ 98

Índice de Tabelas

Capítulo 5

Tab. 1 – Valores estatísticos dos radioelementos retirados do banco de dados ASCII original, cedidos ao LGA-IG/ UnB pela SGM. _____ 45

Tab. 2 – Valores estatísticos dos radioelementos retirados do banco de dados ASCII original, adicionando-se as constantes 0,67 para o canal do K e 0,83 para o canal do U. _____ 46

Capítulo 6

Tab. 1 – Tabelas com as correlações entre o fósforo e os outros elementos analisados com os dados de geoquímica. _____ 71

Capítulo 7

Tab. 1 – Informações sobre os perfis de dados terrestre tais como: extensão e o número de estações executadas em cada um deles. _____ 87

Introdução

Com o aumento populacional e assim a necessidade crescente por alimentos, a busca e produção de insumos fosfatados tem aumentado muito nos últimos anos. O Brasil, por estar situado numa faixa intertropical úmida apresenta solos ácidos e mineralmente pobres em nutrientes. Esta característica geomorfológica condiciona o País à necessidade do emprego maciço de fertilizantes para reposição dos nutrientes.

No Brasil, cerca de 80% das jazidas fosfáticas naturais são de origem ígnea, ao contrário do depósito aqui estudado, que como ocorre na maioria dos países produtores de fosfato, possuem origem sedimentar. O Estado de Goiás possui a segunda maior reserva do país de rocha fosfática, com 13,8%, ficando atrás apenas do estado de Minas Gerais, com 67,9% (Souza e Fonseca, 2009). Como as rochas fosfáticas são a única fonte de fósforo, e que este elemento é de fundamental importância para a agricultura, a busca por novos depósitos de rochas fosfáticas, e a viabilização de jazidas de pequeno porte tem avançado significativamente. Com base nestas informações, o desafio das empresas mineradoras de fosfato tem sido grande nos últimos anos, e este trabalho visa contribuir, de maneira acadêmica aplicada, com as mineradoras em seu processo de seleção de alvos prospectivos por métodos indiretos, objetivando aperfeiçoar o trabalho na busca de novas ocorrências e depósitos.

No presente projeto, para que os objetivos fossem atingidos, foram realizados estudos do estado da arte na busca por conhecimento da geologia da região e geofísica na prospecção de fosforitos. Foram também compilados os dados referentes à área escolhida. Desta maneira, foram utilizados dados de geofísica aérea, magnetometria e gamaespectrometria, integrados a dados de geoquímica de domínio público, além da aquisição de dados gamaespectrométricos terrestres.

A área de estudos está localizada dentro do Grupo Bambuí, na Faixa Brasília. A sedimentação deste teve início com diamictitos durante um período glacial. Com o degelo das camadas e a instalação de um ambiente marinho epicontinental, ocorreu a deposição de sedimentos pelito-carbonatados sobre o Cráton São Francisco. O ambiente criado em função da

deglaciação estabeleceu condições climáticas para a deposição de rochas fosfáticas na área, o que fez com que esta área se tornasse importante do ponto de vista econômico (Dardenne, 1978).

A utilização do processamento geofísico aéreo (métodos magnetométrico e gamaespectrométrico) integrado com a geoquímica, tem como finalidade a otimização dos trabalhos de prospecção do minério, uma vez que as rochas fosfáticas (na forma da apatita) geralmente apresentam um elevado conteúdo de urânio e tório, contrastando assim com as rochas carbonáticas às quais encontram-se associadas, uma vez que estas possuem baixos teores de radioelementos.

O processamento dos dados aerogeofísicos e da geoquímica, deram origem a diversos temas, inclusive a mapas de estimativa de U e P, os quais mostraram o enriquecimento destes elementos na região. Estes mapas foram então utilizados como base para a seleção de áreas alvo para a realização dos trabalhos de “follow up” com gamaespectrometria terrestre.

O trabalho de aquisição, processamento e interpretação dos dados de gamaespectrometria terrestre foram realizados com o intuito de aperfeiçoar a busca por novos alvos, trazendo de forma rápida e objetiva imagens diretas indicativas de áreas enriquecidas em U e, de forma indireta, através da imagem da razão U/Th, regiões potencialmente favoráveis a ocorrência de fósforo (na forma de apatita).

Os resultados obtidos através do processamento, e posterior cheque de campo, mostraram que o método de medição de radiação gama pode ser muito eficiente para prospecção de fosfato em áreas sedimentares quando a geologia da região for favorável e a metodologia bem aplicada.

Nos capítulos 2 e 3 desta dissertação podem ser encontrados os objetivos do trabalho, bem como a localização da área escolhida para serem realizados os estudos.

O capítulo 4 discute a respeito do estado da arte do conhecimento nas abordagens deste trabalho. Traz informações já conhecidas sobre o contexto geológico da área, fosfato sedimentar, geofísica aplicada à prospecção de fosforitos (métodos magnetométricos e

gamaespectrométricos) e também uma revisão sussinta sobre a geoquímica aplicada à prospecção do fosfato.

No capítulo 5 pode ser observado o trabalho realizado com os dados da geofísica aérea. A análise dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos separadamente, o pré-processamento, processamento e geração das imagens tema, produtos utilizados para interpretação e posteriormente para o processamento estatístico.

Os capítulos 6 e 7 trazem os dois artigos submetidos, o primeiro já submetido e aceito para a Revista Brasileira de Geofísica, e o segundo em processo de submissão. O primeiro artigo (Capítulo 6), com o título: *Prospecção de fosforitos utilizando geofísica aérea no nordeste de Goiás*, sobre o trabalho de processamento, interpretação, integração e técnica estatística de regressão múltipla realizada com os dados aérogeofísicos e geoquímicos para a área de estudos, tendo como resultado mapas de estimativas de urânio e fósforo e os perfis definidos para “*follow up*”. E o segundo artigo (Capítulo 7), denominado *Prospecção de fosforitos utilizando gamaespectrometria terrestre no nordeste do Goiás*, trazendo informações sobre a aquisição, processamento e interpretação dos dados gamaespectrométricos para os alvos (perfis) pré-selecionados a partir do processamento dos dados aéreos, este trabalho traz como resultado a indicação de regiões para sondagem, bem como a indicação dos produtos mais importantes que devem ser analisados no estudo e prospecção de fosforitos.

No capítulo 8 estão colocadas as discussões e conclusões dos resultados obtidos neste trabalho. No último capítulo (9), as referências bibliográficas utilizadas neste texto.

Objetivos

O objetivo do presente trabalho é através do processamento e interpretação dos dados aerogeofísicos (métodos magnetométrico e gamaespectrométrico), selecionar áreas para prospecção de fosforitos. A integração das informações da geofísica aérea e dados de geoquímica terrestre possibilitou a seleção de áreas alvo para realização de *follow up* com geofísica terrestre (gamaespectrometria). A interpretação e integração destes dados com a geologia de detalhe permitiu então um melhor embasamento na seleção de regiões que possam apresentar um enriquecimento de fosfato no nordeste do Estado de Goiás e sudeste do Estado do Tocantins.

Não existem trabalhos acadêmicos ou de qualquer outra espécie publicados sobre este assunto, portanto esta dissertação tem papel de fundamental importância no incentivo à novas pesquisas, favorecendo a elaboração de artigos que venham a contribuir com os resultados obtidos. A metodologia empregada poderá então ser aplicada na busca de novas ocorrências.

Localização

A área de Campos Belos (GO) é conhecida pela presença de um depósito de fosforitos extraído pela Itafós Mineração Ltda. Com base nesta informação de ocorrência de mineral fosfático em rochas do Grupo Bambuí, e buscando novos depósitos na região, foi selecionada a área de estudos, que engloba as rochas clásticas das Formações Serra de Santa Helena os sedimentos químicos da Formação Sete Lagoas.

Alongada na direção N-S, a área de estudos está localizada no setor nordeste do Estado de Goiás e sudeste do Estado do Tocantins (Fig. 1), na Bacia Hidrográfica do Tocantins, e a cerca de 330 km de Brasília – DF, Brasil. É uma área de, aproximadamente, 7.000 km² que abrange os municípios de Arrais, no estado de Tocantins, e Campos Belos, Monte Alegre de Goiás, Nova Roma, entre outras no estado de Goiás.

O acesso a estas áreas, de carro, saindo de Brasília se dá pela BR-010 sentido norte (Fig. 1), e em seguida através da GO-118 em direção a Campos Belos, passando pela Chapada dos Veadeiros.

Os trabalhos de campo foram realizados nas proximidades do Município de Campos Belos, áreas de pesquisa da Mineração Itafós. O acesso às áreas alvo deve ser feito seguindo-se de Campos Belos pela GO-452, tanto para sul como para norte, tomando-se estradas não pavimentadas.

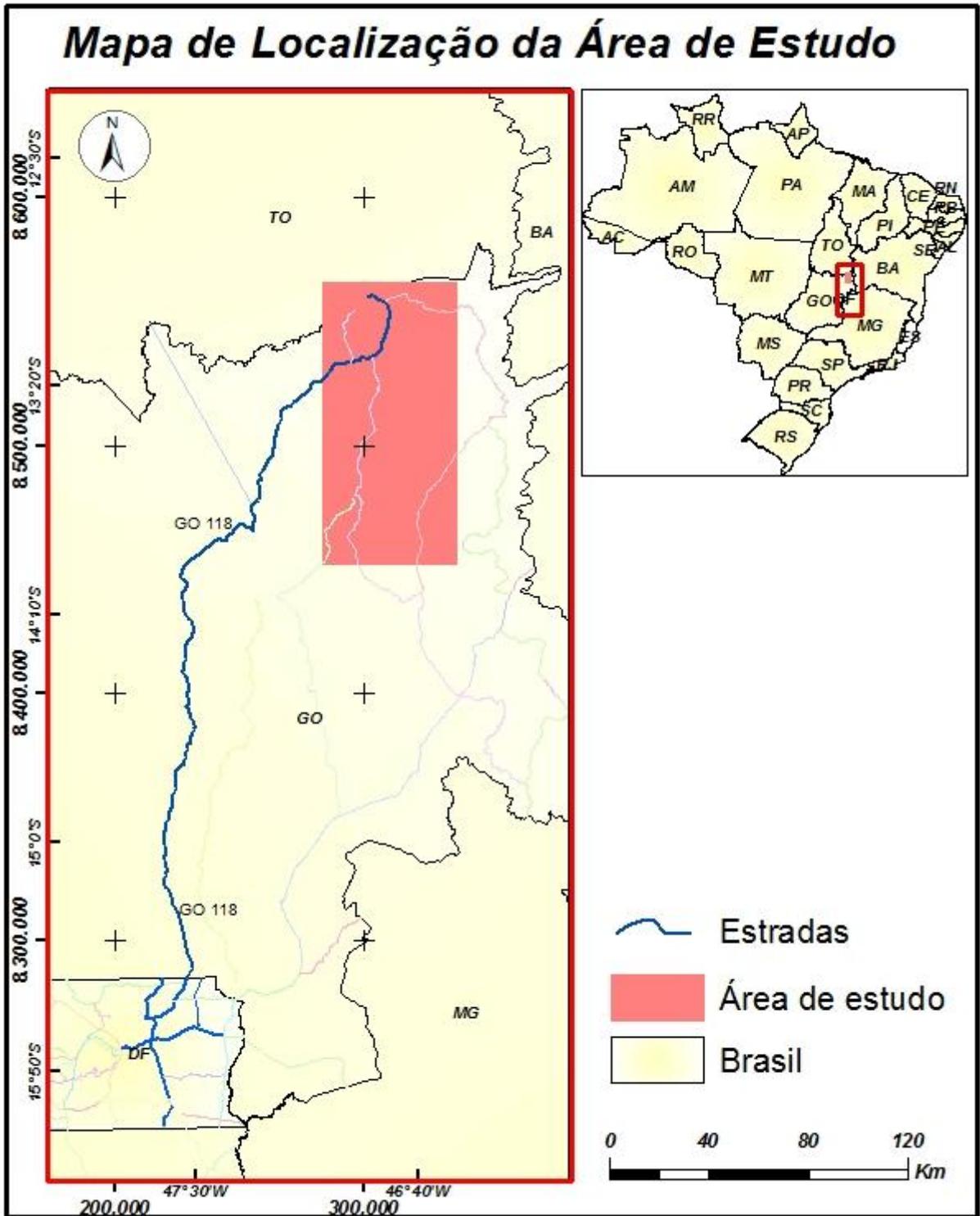


Fig. 1 – Mapa de localização da área de estudos, região nordeste do Estado de Goiás, Brasil. Em vermelho a área de estudo, e as linhas azuis indicam as principais estradas do Estado.

Revisão Bibliográfica

Na Tabela Periódica, o Fósforo é o elemento químico que tem número atômico 15 e é encontrado em abundância no globo terrestre, sendo reativo com diversos compostos importantes. É um mineral metálico que não se encontra livre na natureza (Souza, 2001).

Em termos mundiais, o fósforo está contido tanto em rochas de origem ígnea, como sedimentar e biogenética. Do ponto de vista econômico, os depósitos sedimentares e de origem ígnea são mais importantes. Os depósitos biogenéticos são concentrações orgânicas nitrogenadas, originadas pelos dejetos de aves e possuem uma importância menos significativa (Souza & Fonseca, 2009).

O fostatato é muito utilizado misturado a outros compostos produzindo os fertilizantes minerais ou orgânicos que levados ao solo substituem os elementos vitais (oxigênio, carbono, nitrogênio, fósforo, potássio e hidrogênio), que foram retirados pelas próprias plantas, tornando assim, o solo apto para novas plantações. Isso acontece pelo mundo todo, garantindo solos férteis para gerar e manter a agricultura, sustentando quase 9 bilhões de seres humanos (Souza, 2001).

A busca por novos depósitos, a reativação daqueles já existentes e a viabilização das jazidas de pequeno porte tem sido incentivada pela necessidade crescente por insumos fosfatados, visto que não há substitutos para o fósforo na agricultura e que este tem origem exclusivamente nas rochas fosfatadas.

Ao contrário do que ocorre na maior parte do mundo, no Brasil, cerca de 80% dos depósitos fosfatados conhecidos tem origem ígnea, com presença acentuada de rochas carbonáticas e minerais micáceos com baixo teor de P_2O_5 (Souza & Cardoso, 2008). As intrusões carbonáticas que hospedam os maiores volumes de fosfato estão associadas ao Lineamento Azimute 125°, e se distribuem nos estados de Minas Gerais e Goiás (e.g. Bizzi e Vidotti, 2003). Contudo, na área de estudos os fosforitos encontrados são de origem sedimentar (Biondi, 2003).

Os depósitos de fosforitos marinhos normalmente apresentam grandes dimensões, e são responsáveis por 76% do fosfato usado no mundo como insumo agrícola (Biondi, 2003).

4.1. Fosfato sedimentar

Sedimentos ricos em fosfatos formaram grandes acumulações de rochas fosfáticas em idades relativamente bem definidas durante a história da Terra. Esse evento fosfogênico ocorreu em escala mundial, e geraram depósitos economicamente viáveis (Donnelly *et al.* 1990).

Até o início dos anos 60, as principais jazidas de fosfato marinho exploradas estavam relacionadas com idades do Cretáceo-Terciário, somente depois dos anos 60, onde inúmeras descobertas distribuídas pelos cinco continentes ocorreram, percebeu-se a importância do Proterozóico e Cambriano como grandes períodos geradores de fosforitos (Cook & Shergold, 1986; Cook, 1992; Boujo *et al.*, 1994). Este evento fosfogênico provavelmente compreende vários episódios de diferentes amplitudes na base do Tomotiano e importantes depósitos Proterozóicos tardios (pós-glacial) e o início do Cambriano Médio, com alguns pulsos ainda significantes no início do Vendiano e Cambriano Médio a Superior (Cook, 1992).

Cook (1992) relata os importantes picos de fosfogênese que foram registrados durante o Proterozóico, na transição Proterozóico/Cambriano e no Cambriano, refletindo aumento acentuado do teor de fosfato nos oceanos. Segundo Cook & Shergold (1984), o aumento no conteúdo de fosfato durante o Proterozóico esteve relacionado com o desenvolvimento de ambiente oceânicos anóxicos, com armazenamento de fosfato em reservatórios de oceanos profundos, seguidos de circulação ascendente de correntes marinhas (“upwelling”) que transportaram fósforo solúvel para águas rasas, com condições favoráveis à deposição. A elevação do nível do mar pode ser um dos motivos que contribuíram para a circulação de fosfato solúvel.

Podem ser encontradas ocorrências de fosforitos associados a folhelhos e carbonatos, especialmente dolomitos, com ou sem formação de biohermas estromatolíticas, gerados em águas rasas (Cook & Shergold, 1986).

De acordo com Boujo *et al.* (1994), as rochas fosfática do Grupo Bambuí datam do Proterozóico Superior, um episódio de mineralizações que se desenvolveu nas regiões de transição cráton/cadeia, mas também nas coberturas cratônicas (Formação Serra da Saudade).

Os fosfatos agrupam minerais formados por tetraedros constituídos por quatro átomos de oxigênio e um de fósforo, dando origem a uma molécula com carga iônica negativa, que se combina com diferentes cátions para formar uma grande variedade de minerais (Cornejo & Bartorelli, 2009). Segundo estes autores, foram descritas mais de uma centena de minerais da classe dos fosfatos, sendo constantemente descobertas novas espécies.

A apatita ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH},\text{F},\text{Cl})$) é o nome genérico para um importante grupo de minerais cuja composição geral é fosfato de cálcio, podendo ser hidratado e conter flúor ou cloro. Os mais frequentes são a hidroxiapatita $-(\text{CaOH})$, a fluorapatita $-(\text{CaF})$ e a cloroapatita $-(\text{CaCl})$. A apatita é um dos raros fosfatos com emprego na indústria (Cornejo & Bartorelli, 2009).

A composição mineralógica das rochas fosfáticas é caracterizada pela predominância de apatitas (Boujo *et al.*, 1994; Souza, 2001). A apatita, que é um fosfato cristalino de cálcio com fluor, de cor variável, brilho vítreo, dureza cinco, densidades entre 3,1 a 3,2 g/cm^3 , apresentando fratura conchoidal, com teor de P_2O_5 nos depósitos sedimentares oscilando entre 4 e 15%. Os depósitos de apatita tem uma mineralogia extremamente complexa, tendo contaminantes de influência marcante na recuperação de fósforo nas usinas de beneficiamento, resultando em altos custos de produção (Souza, 2001).

A fosforita é uma variedade fibrosa da apatita se constituindo num fosfato tricálcico de origem sedimentar, geralmente associada a carbonatos de cálcio e magnésio, óxidos de ferro e alumínio e traços de urânio. É amorfa ou criptocristalina, de consistência arenosa ou argilosa, ocorrendo em bandamentos de folhelhos, calcários e arenitos. Os depósitos de fosforita geralmente são de forma tabular de grande extensão lateral e espessura variável, características decorrentes de sua própria origem (Souza, 2001).

4.1.1. Reservas

Países do hemisfério norte como os Estados Unidos, Marrocos e China são tradicionais produtores e exportadores de fosfato, possuindo uma grande concentração de rochas

fosfáticas (75% do mundo). O Brasil está na sexta posição entre os maiores produtores, com uma reserva de 319 bilhões de toneladas (4% do total mundial) em 2007 (Souza & Cardoso, 2008).

Segundo o Sumário Mineral do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), houve um aumento de 11% na produção interna de fertilizantes em 2007, em relação ao ano anterior, enquanto no mesmo período a produção de rochas fosfáticas teve alta de 5,1%. As reservas totais de rochas fosfáticas no país, no mesmo ano, chegou a casa dos 6,185 milhões de toneladas, evoluindo a uma taxa real de crescimento de 3,8%. Esse patrimônio fosfático está distribuído, principalmente, nos estados de Minas Gerais com 67%, Goiás com 14% e São Paulo com 6%. No ano de 2008 o preço da tonelada de fosfato teve alta de aproximadamente 125%, alcançando R\$1.800,00-2.000,00/ton (Souza & Cardoso, 2008).

Os depósitos cubados relacionados a carbonatitos dos complexos de Araxá / Tapira (MG), Catalão / Ouvidor (GO), Jacupiranga / Cajati (SP) e o complexo alcalino carbonatítico de Mairicuru (MA) ainda em estudo, estão relacionados aos ambientes geológicos denominados depósitos ígneos, relacionados a intensa atividade vulcânica (Souza, 2001).

Depósitos de origem sedimentar também ocorrem no país, em estados do nordeste, principalmente em Pernambuco, podendo ser ainda encontrados em outros estados como Minas Gerais, município de Lagamar, onde ocorre depósito com rochas mineralizadas em fosfato nas unidades litológicas da Formação Paraopeba, integrante do Grupo Bambuí, onde a sequência fosfática está encaixada em siltitos e folhelhos calcíferos, mostrando-se localmente pouco metamorfizada (Souza, 2001).

Tem-se conhecimento de jazidas de concentração residual em Anitápolis (SC), Pirocaua e Trauíra no Maranhão e do tipo guano em Fernando de Noronha (Souza, 2001).

4.1.2. Depósitos Brasileiros de Fosfato Sedimentar

De acordo com Cook & Shergold (1986), importantes reservas mundiais de rochas fosfáticas de idades proterozóicas/cambrianas são encontradas pelo mundo, inclusive o depósito de Rocinha (MG) no Brasil.

No Brasil são encontrados também depósitos de idade paleoproterozóica, como Unidade de Rio Preto (Supergrupo Espinhaço) no Estado de Minas Gerais. A sedimentação fosfática neste caso está relacionada com um importante evento transgressivo na Bacia Espinhaço, no qual a atuação de correntes de fundo promoveram o retrabalhamento e lixiviação dos sedimentos, com consequente concentração de apatita. A ausência de níveis carbonosos e/ou sulfetados e a natureza detrítica dos sedimentos sugerem um sistema de baixa produtividade (Mourão, 1995).

No Estado do Ceará, próximo a transição Meso/Neoproterozóico, a jazida fósforo-uraninífera de Itataia (Grupo Itataia) foi depositada em ambiente marinho, parcialmente modificado por fluidos meteóricos ou de água doce não magmática. A interação entre esses fluidos parece ter ocorrido durante estágio pós-deposicional, fato que indica que a mineralização fósforo-uraninífera de Itataia foi predominantemente de origem sedimentar, sendo reconcentrada por processos tectono-metamórficos e, posteriormente, enriquecida por processos supergênicos (Castro *et al.* 2005).

Durante o Neoproterozóico são encontrados depósitos de fósforo no Cráton São Francisco e em sua borda oeste. No Neoproterozóico Inferior foram formados os importantes depósitos de Rocinha e Lagamar, situados em Minas Gerais e pertencentes ao Grupo Vazante (Dardenne *et al.*, 1986; Dardenne *et al.*, 1997). Dentre os depósitos sedimentares do país, o depósito de Rocinha é o maior já encontrado, com 415 Mton com 10 a 15% de P_2O_5 . Ambos os depósitos foram sedimentados em águas relativamente profundas e redutoras, onde predominou a sedimentação de pelitos ricos em matéria orgânica de origem provavelmente bacteriana (Dardenne *et al.* 1986; Nogueira, 1993; Dardenne *et al.* 1997). Segundo Nogueira (1993), as características estruturais e sedimentológicas indicam que o Grupo Vazante foi depositado em borda de plataforma continental em latitude relacionada à ocorrência dos biohermas da Formação Rocinha.

O depósito de Irecê, localizado no Estado da Bahia, é associada ao Grupo Una. A mineralização fosfática nesse depósito está associada a camadas de estromatólitos colunares e tapetes algais (Misi *et al.* 2007). De acordo com Monteiro *et al.* (1997), a mineralização ocorre associada às fácies de intermaré, relacionadas a pulsos transgressivos e regressivos, dentro de um ciclo maior regressivo. Grande parte das reservas é proveniente

da acumulação de fosforitos retrabalhados mecanicamente em colúvios nas imediações dos afloramentos (Dardenne & Schobbenhaus, 2003).

O pequeno depósito de Cedro do Abaeté, situado em Minas Gerais, foi formado no Grupo Bambuí próximo a transição entre as formações Lagoa do Jacaré e Serra da Saudade. A sedimentação nesse caso se deu em plataforma rasa, pracialmente redutora com influxo de material pelítico e pequena contribuição carbonática (Dardenne *et al.* 1986; Lima *et al.* 2007). Baixos teores de P_2O_5 são encontrados em rochas Cretáceas da Formação Mata da Corda (Dardenne *et al.* 1986), porém intemperismo nestas rochas teria causado o enriquecimento através de redeposição por precipitação em fraturas e porosidades em rochas dessa formação (Ladeira & Brito, 1968. *apud* Dardenne *et al.* 1986).

No Estado do Tocantins, município de Xambioá, foram mapeadas ocorrências de apatita em saprólitos de folhelhos metamorfisados (ambiente sedimentar marinho). Essas ocorrências pertencem a Formação Xambioá, inclusa no Grupo Estrondo, de idade Neoproterozóica (Costa & Da Silva, 2009).

O depósito da Serra da Bodoquena, no Mato Grosso do Sul, foi gerado durante a sedimentação das formações Tamengo e Bocaina, que constituem o Grupo Corumbá na Faixa Paraguai. A idade do Grupo é controversa, convergindo para o limite Neoproterozóico/Cambriano. A deposição do fosfato se deu em ambiente de talude, sujeito a correntes ascendentes, com posterior retrabalhamento e formação de brechas (Justo, 2000). Boggiani *et al.* (1993) ressaltam a intensa atividade biológica associada à formação destas rochas, sendo que nestas são encontrados estromatólitos.

As ocorrências em Nova Roma, Campos Belos e Monte Alegre são caracterizadas por zonas distencionais, falhas de abertura. Estas ocorrências estão localizadas na porção basal da Formação Sete Lagoas, sobrepondo os depósitos glaciogênicos da Formação Jequitai ou diretamente sobre o embasamento. Estão normalmente associadas a folhelhos e margas. Fosforitos em forma de lente atingem poucas dezenas de metros de comprimento e dois metros de espessura dentro de folhelhos e siltitos, como em Campos Belos (Cook & Shergold, 1986). Segundo tais autores, os teores de P_2O_5 nestas áreas variam de 15% a 22%,

e estas rochas estão sotopostas por dolomitos estromatolíticos, o que indica que houve um aumento na temperatura do clima depois da glaciação Jequitaí.

4.2. Contexto Geológico da Área

Associada ao Grupo Bambuí, que se distribui ao longo da porção leste da Faixa de Dobramentos Brasília (FDB), existem ocorrências de rochas fosfatadas na Formação Sete Lagoas, porção basal do Grupo, na borda leste do Cráton São Francisco. Na região de Campos Belos (GO) / Arraias (TO), a Itafós Mineração Ltda continua pesquisando e lavrando alguns depósitos que até pouco tempo atrás não eram considerados viáveis, porém com a valorização do fosfato no mercado, mesmo pequenos depósitos tem se tornado viáveis.

Desenvolvida na borda ocidental e meridional do Cráton São Francisco durante o Ciclo Brasileiro (Neoproterozóica), a **Faixa de Dobramentos Brasília** representa um complexo cinturão de dobras e falhas de empurrão com vergências tectônica e metamórfica em direção ao Cráton (Fuck *et al.*, 1994; Dardenne, 2000) e, apresenta uma extensão considerável, superior a 1.100 km (Almeida *et al.*, 1977).

A sedimentação do Grupo Bambuí teve início com os diamictitos da Formação Jequitaí, de origem relacionada a um período glacial. O derretimento das camadas de gelo permitiu a instalação de um ambiente marinho epicontinental, e iniciou-se a deposição de sedimentos pelito-carbonatados que se sobrepõe ao Cráton São Francisco. O ambiente criado em função da deglaciação estabeleceu também as condições climáticas necessárias para a deposição dos sedimentos fosfáticos (Dardenne, 1978).

Segundo Alvarenga *et al.* (2006), nas rochas do Grupo Bambuí podem ser observados padrões de dobramentos assimétricos formados em condições compressivas dúcteis-rúpteis, com vergência para leste, além de falhas e fraturas associadas à deformação distensiva rúptil que tiveram origem durante o Neoproterozóico, Orogenia Brasileira (Fuck, 1994; Dardenne, 2000). O grau de metamorfismo destas rochas aumenta de leste para oeste e varia de fácies xisto verde baixo a anquimetamorfismo (Alvarenga *et al.*, 2006).

O **Grupo Bambuí** na área de estudos está situado entre a porção leste da Faixa de Dobramentos Brasília e o Cráton São Francisco. As ocorrências de rochas fosfatadas e

fosforitos fazem parte de um contexto no qual se inserem, da base para o topo, as seguintes unidades litoestratigráficas: Complexo Granito-gnáissico, Formação Ticunzal, Suite Aurumina, Quartzo-diorito Nova Roma, Suíte Pedra Branca, Grupo Avaí, Grupo Paranoá, Formação Jequitai, Grupo Bambuí e grupos Areado e Urucuia. A figura 2 apresenta um mapa geológico regional com as unidades aflorantes (Monteiro, 2009). Este mapa é resultado das cartografias das folhas Monte Alegre de Goiás, Nova Roma e Cavalcante, em escala 1:100.000, realizado pelo programa Geologia do Brasil (PGB/PGL) do Serviço Geológico do Brasil (CPRM) em 2006 (Monteiro, 2009).

O Grupo Bambuí definido por Dardenne (1978) é dividido em seis formações: Formação Jequitai (Derby, 1880 *in* Cook & Shergold, 1986); Formação Sete Lagoas; Formação Serra de Santa Helena (Branco & Costa, 1961); Formação Lagoa do Jacaré (Branco & Costa, 1961); Formação Serra da Saudade (Branco & Costa, 1961); e Formação Três Marias.

A **Formação Sete Lagoas** é constituída por rochas carbonáticas, margosas e pelíticas compreendendo folhelhos, margas, calcários e dolomitos. As rochas carbonáticas ocorrem em forma de lentes de dimensões variadas (Guimarães, 1997). Sobrepõe-se discordantemente à **Formação Jequitai** (Derby, 1880 *in* Cook & Shergold, 1986), uma sequência glaciogênica (Rocha-Campos & Hasui, 1981). Os fosforitos estão presentes nesta unidade (Cook & Shergold, 1986)

A **Formação Serra de Santa Helena** (Branco & Costa, 1961) compreende siltitos e folhelhos cinza esverdeados, com intercalação de arenitos finos. O contato com a unidade superior é concordante, geralmente gradacional (Guimarães, 1997).

A **Formação Lagoa do Jacaré** (Branco & Costa, 1961) é composta por siltitos e calcários argilosos com intercalação de calcário cinza escuro, fétidos, que se alternam em calcários oolíticos, pisolíticos e intraclastos (Guimarães, 1997).

A **Formação Serra da Saudade** (Branco & Costa, 1961) é constituída por folhelhos, argilitos e ritimitos esverdeados que gradam para siltitos arcoseanos (Guimarães, 1997); é a formação fosfática mais importante no Grupo Bambuí (Cook & Shergold, 1986).

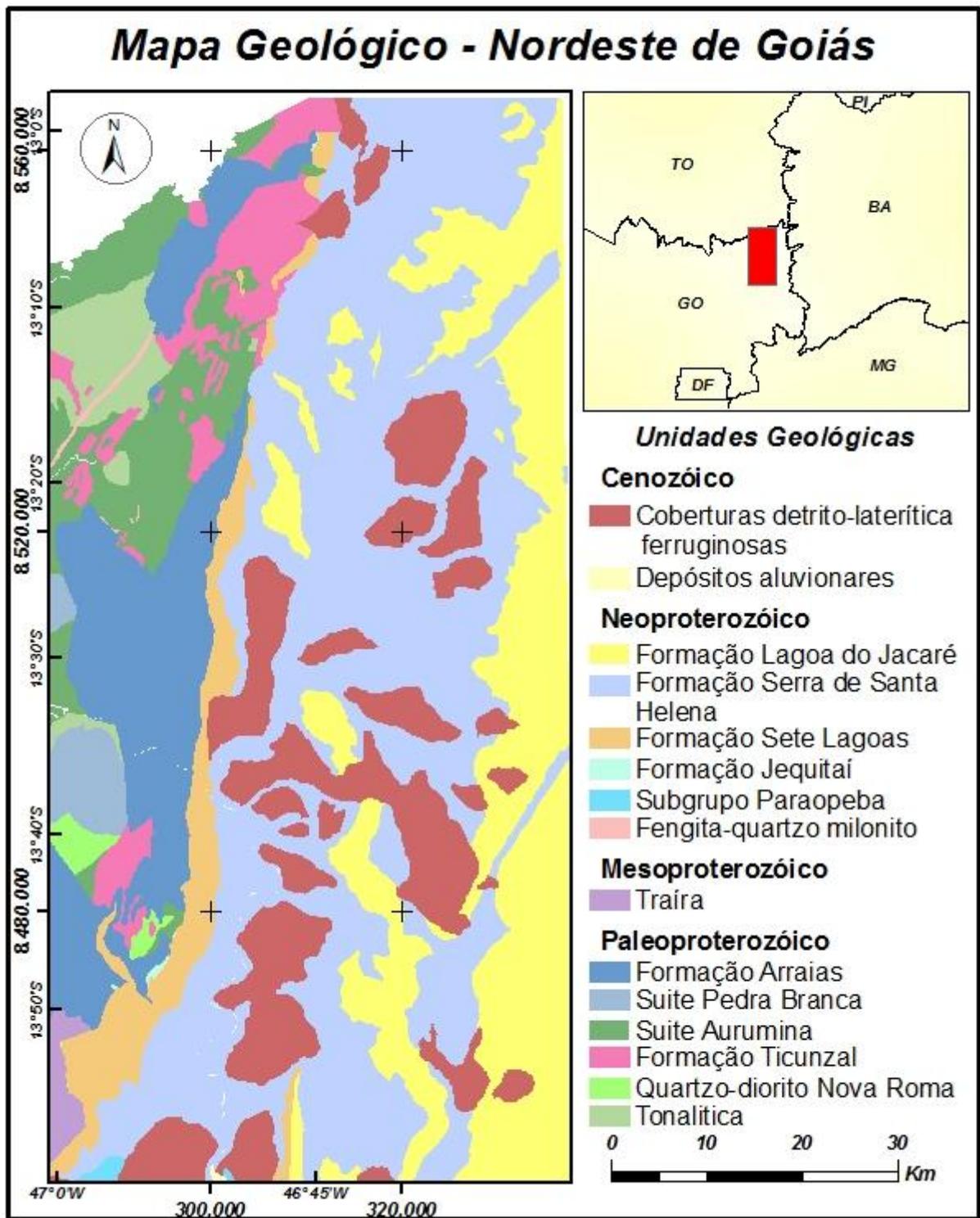


Fig. 1 – Mapa geológico regional simplificado do nordeste de Goiás e sudeste do Tocantins (modificado de Monteiro, 2009).

A **Formação Três Marias** é formada por sedimentos imaturos, como arcóseos, grauvacas e siltitos cinza esverdeados. Possuem contato de base concordante transicional com as rochas da Formação Serra da Saudade (Guimarães, 1997).

Estas seis formações que compreendem o Grupo Bambuí, definidas por Dardenne (1978), podem ser encontradas no Brasil Central com variações frequentes de fácies e espessuras. Todas as ocorrências e depósitos de fosforitos estão localizados nas porções basais das formações Sete Lagoas e Serra da Saudade (Cook & Shergold, 1986).

De acordo com Monteiro (2009), na região de Arraias/Campos Belos existem exposições do embasamento granítico pertencente à Suite Aurumina, conglomerados polimíticos, pertencentes à base do Grupo Araí, diamictitos glaciogênicos, atribuídos a Formação Jequitaiá, rochas pelito-carbonatadas e fosfatadas correlacionáveis com a Formação Sete Lagoas e rochas pelíticas, da Formação Serra de Santa Helena.

A análise do mapa geológico (Fig. 1) mostra a distribuição destas rochas na área de estudos, e uma característica importante que pode ser facilmente identificada é a diferenciação das rochas que encontram-se dispostas nas porções leste e oeste da imagem. As rochas pertencentes ao embasamento, e que possuem origem ígnea estão localizadas na porção oeste, enquanto as rochas de origem sedimentar encontram-se a leste (Formações Sete Lagoas, Serra de Santa Helena e Lagoa do Jacaré), estas algumas vezes recobertas por crostas lateríticas.

4.3. Aerogeofísica aplicada a fosfato (magnetometria e gamaespectrometria)

A principal aplicação dos levantamentos de dados com geofísica aérea tem sido o mapeamento geológico, o que teve seus interesses impulsionados pela indústria mineral. Os levantamentos aerogeofísicos recobrem extensas áreas em um curto espaço de tempo, produzindo assim dados importantes para o entendimento geológico e, integrado a outros temas, fornecendo conhecimento suficiente para a descoberta de novos alvos potenciais que serão checados em campo.

4.3.1 Magnetometria

As informações relativas à magnetometria estão relacionadas aos depósitos de origem ígnea, sobre os quais ocorrem fortes anomalias magnéticas. Para a prospeção de fosforitos de origem sedimentar, este tipo de informação não apresenta significado direto, já que as informações magnetométricas representam conteúdos de materiais profundos (quilômetros de profundidade) e as mineralizações fosfáticas sedimentares não apresentam relação com minerais magnéticos.

4.3.2 Gamaespectrometria

Os raios gama são uma forma de radiação eletromagnética de alta energia e pequeno comprimento de onda, sem massa ou carga eletrônica e que emitem diferentes níveis de energia ou picos que correspondem ao decaimento radioativo de alguns radioelementos (Wilford *et al.*, 1997). A estimativa de concentração ou quantidade destes radioelementos no solo ou nas rochas é feita pela intensidade dos picos de radiação de cada um.

A espectrometria aérea ou terrestre mede a quantidade de potássio (K), tório (eTh) e urânio (eU) nas rochas ou minerais de intemperismo pela detecção da radiação gama natural emitida pelos isótopos de decaimento radioativos destes três elementos. Usualmente U e Th são expressos em partes por milhão equivalente (eU e eTh), o que indica que suas concentrações são inferidas por elementos filhos em suas cadeias de decaimento; o K por causa de sua elevada concentração na natureza, é expresso em porcentagem (Wilford *et al.*, 1997).

Segundo Gregory & Horwood (1961, in Wilford *et al.*, 1997), noventa por cento da emissão dos raios gama provem dos primeiros 30 a 45cm de solo ou rocha (Dickson & Scott, 1997); 50cm para IAEA (2003). A intensidade de emissão dos raios gama da superfície revela a mineralogia e geoquímica do embasamento e a natureza do intemperismo. A estimativa de potássio na crosta é de 2,5%, o tório possui uma estimativa de concentração nas rochas da crosta de 12ppm e o urânio, de 3ppm (Wilford *et al.*, 1997; Dickson & Scott, 1997).

Os teores dos radioelementos podem ser susceptíveis a efeitos ambientais, pedogenéticos, geomorfológicos, geoquímicos e variações litológicas, podendo aumentar ou diminuir a intensidade dos raios gama (Dickson & Scott, 1997; Minty, 1996; Wilford *et al.*, 1997).

A gamaespectrometria tem sido usada principalmente como uma ferramenta na exploração mineral na localização de depósitos de U e mapeamento litológico. Segundo Wildford *et al.* (1997), as respostas gamaespectrométricas sobre as rochas são bem entendidas, porém a distribuição dos radioelementos em materiais de intemperismo ainda precisam ser melhor estudados.

Wilfort *et al.* (1997) sugere como forma de análise e interpretação, que as imagens gamaespectrométricas geradas sejam sobrepostas ao modelo digital do terreno (MDT) para verificar as distribuições dos teores dos radionuclídeos em relação aos elementos do relevo (dispersão).

Nordemann (1966, *in* Ferreira *et al.*, 1992), em estudos anteriores, demonstrou que rochas calcárias geralmente apresentam baixos teores de elementos radioativos, permitindo com isso um contraste com as rochas mineralizadas na região, uma vez que as rochas calcárias são as encaixantes dos fosforitos, e que a apatita na maioria das vezes possui um teor elevado de U e Th (IAEA, 2003).

Mané (1998) utilizou em sua dissertação a gamaespectrometria e o sensoriamento remoto para caracterizar geofisicamente mineralizações de fosfato em Irecê na Bahia, tendo como resultado a obtenção de uma importante correlação entre o tório e as mineralizações descritas pela CBPM (Companhia Baiana de Pesquisa Mineral), o que não ocorreu com o urânio, uma vez que este foi lixiviado das regiões onde ocorrem as mineralizações.

4.4. Geofísica terrestre aplicada à fosfato (gamaespectrometria)

Um produto que permite ressaltar o enriquecimento de potássio e urânio em relação ao tório é o parâmetro F (Parâmetro $F = (K \cdot eU) / eTh$). Este pode assim indicar áreas com alteração hidrotermal associadas com mineralizações (Efimov, 1978 *apud* Fornazzari e Ferreira, 2003), ou neste caso, áreas favoráveis à prospecção de fosfato (elevado teor de urânio).

De acordo com Ashfahani (2002), a gamaespectrometria é uma ótima ferramenta na geofísica de exploração, tendo-se como exemplo um trabalho realizado na mina de Khneifiss, na Síria. Neste, a gamaespectrometria foi utilizada para investigar radiação e

camadas de fosfato. A interpretação radiométrica usando métodos numéricos de análise apresentou uma boa correlação em algumas áreas fosfáticas na Síria, sendo possível a definição precisa de espessura de fosfatos na área de estudos. Foram analisadas sessenta e três amostras de camadas de fosfato em furos de sondagem com gamaespectrometria para determinação de P_2O_5 , U, Th e K, sendo encontrada uma boa correlação entre o conteúdo de P_2O_5 e U.

Outro resultado importante mostrado por Ashfahani (2002) foi a intensidade de radioatividade nas camadas de fosforitos, que variaram entre 130 cps e 383 cps, com média de 270 cps e desvio padrão 57 cps. Neste mesmo trabalho o autor coloca que o conteúdo de P_2O_5 dentro das camadas fosfáticas variam entre 15% e 34,6%, e a concentração de U entre 42 ppm e 130 ppm, com média de 94 ppm, e desvio padrão 20,3 ppm. Na análise do conteúdo de P_2O_5 , concentração de U e radioatividade natural, observou-se que a intensidade de raios gama medidos nas camadas fosfáticas está diretamente relacionada à concentração de urânio, onde os valores de Th e K estiveram abaixo do limite de detecção - 0,1% (Ashfahani, 2002).

Ashfahani (2002) sinaliza ainda a diferença no conteúdo de U entre rocha fosfática e areia fosfática, na qual a areia fosfática apresenta concentrações elevadas de urânio.

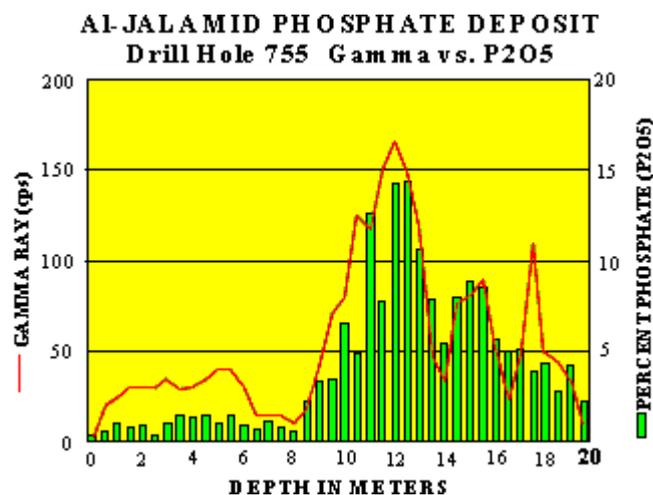


Fig. 2 – Gráfico da relação direta da contagem de raios gama em cps pela porcentagem de fosfato encontrado nas rochas em profundidade. Levantamento feito em furo de sondagem no depósito de Al-Jalamid, Arábia Saudita (Wynn, 1996).

Outro estudo envolvendo gamaespectrometria no mapeamento de fosfatos foi utilizado na Arabia Saudita, depósito Al-Jalamid. Uma vez estabelecida a relação de contagem de raios gama e teor de fosfato, a integração da gamaespectrometria fornece uma resposta rápida para avaliação dos recursos de fosfato. Foram feitas medições de radiação gama natural em furos de sondagem, mostrando a correlação direta em profundidade dos teores de P_2O_5 com a contagem de raios gama em contagens por segundo (cps) (Fig. 2). Conseguiu-se determinar valores de correlação entre os teores de fosfato e a contagem de raios gama (Wynn, 1996).

4.5. Geoquímica aplicada a fosfato

De todos os elementos químicos que compõe a Terra, o oxigênio ocupa cerca de 90% do volume e, juntamente com o Si, Al, Fe, Ca, Na, K e Mg perfazem cerca de 99% da crosta. Estes elementos ocorrem em proporções superiores a 1%, enquanto Ti, H, P e Mn ocorrem em proporções entre 0,1% e 1%, e todos os demais elementos da Tabela Periódica perfazem cerca de 0,5% da composição da crosta, e estes incluem quase todos os de importância na exploração geoquímica. Sendo assim, a exploração mineral envolve elementos cujos teores crustais são muito baixos, e dentre estes, os que se concentram em depósitos minerais (Mattoso & Formoso, 2007).

De acordo com Mattoso & Formoso (2007), cada depósito mineral terá uma associação de elementos própria, dependendo do ambiente e dos processos geradores. A combinação desses elementos define a assinatura geoquímica do depósito. Somente após a análise química do minério é que a assinatura do depósito passa a ser conhecida.

Um depósito mineral geralmente é composto por vários elementos, sendo que raramente ocorre a concentração de um único elemento. Devido aos variados processos de formação de um depósito, muitas vezes é difícil antecipar os elementos da assinatura do mesmo, sendo possível apenas estimar um pacote genérico por modelo de depósito. Para o caso dos depósitos sedimentares químicos de fosfato em pelitos, carbonatos e arenitos, a assinatura geoquímica é formada pelos elementos P, N, F, C e U. É importante levar em conta que essa assinatura geoquímica prevista pode incorporar elementos adicionais na dependência de variáveis internas do ambiente geotectônico e das condições locais de formação do depósito (Mattoso & Formoso, 2007).

Ashfahani (2002) relata a afinidade do urânio com alguns elementos traço, especialmente V, Sr e Pb na mina de Khneifiss na Síria. Estes elementos e o urânio estão contidos na apatita, então a formação destes elementos pode ter ocorrido junto com a apatita na bacia sedimentar. Na área de estudos o autor relata que a correlação do U com outros elementos é pequena.

A procura de um depósito mineral durante a campanha de prospecção geoquímica visa detectar um ou mais elementos da sua assinatura, ou elementos indicadores. Elementos móveis de uma assinatura facilitam a interpretação, e são considerados `farejadores`. A mobilidade dos elementos depende muito das condições de pH e Eh do meio. Levando em consideração estes fatores, os autores criaram uma tabela de classificação, e consideram o P como um elemento de mobilidade intermediária, considerando um pequeno aumento na mobilidade em ambientes ácidos, se comparado com o ambiente redutor. Estes classificam ainda os outros elementos da associação F, C, N e U como elementos de mobilidade moderada a elevada, em ambos os ambientes (Mattoso & Formoso, 2007).

Em muitas regiões do território brasileiro o substrato está profundamente intemperizado, com desenvolvimento de espessos latossolos em vários estágios de estruturação e complexa evolução da paisagem. Com isso, muitas das características da mineralização se obliteraram podendo ser confundidas com outros produtos do intemperismo. A forma como a assinatura de um determinado estilo de mineralização reage no manto de intemperismo depende do clima e de sua posição na paisagem (Mattoso & Formoso, 2007).

As técnicas de análise de multivariáveis levam em consideração vários eventos diferentes, procurando correlacioná-lo um em função do outro simultaneamente (Davis, 1973; Davis, 1986).

Materiais, Métodos e Técnicas

5.1. Geofísica Aérea

5.1.1. Introdução

A exploração mineral envolve procedimentos de coleta, análise e integração de dados de diferentes fontes. A integração digital de dados geológicos, geofísicos, geoquímicos e outras informações georreferenciadas voltada à prospecção mineral é realizada através de softwares específicos em ambiente SIG (Sistema de Informações Geográficas).

Na área de estudos a cobertura vegetal é pouco densa, podendo a área ser percorrida sem maiores dificuldades; o clima semiárido é responsável pela existência de um manto de alteração pouco espesso e descontínuo, que favorece a ocorrência de afloramentos rochosos. Esta característica favorece o levantamento gamaespectrométrico, uma vez que solo espesso, vegetação e outras feições sobrepostas às rochas, fazem com que a radiação gama emitida pelos radioelementos constituintes das rochas não cheguem aos sensores de detecção da radiação.

Estudos anteriores de Nordemann (1966, *in* Ferreira *et al.*, 1992) demonstraram que rochas calcárias geralmente apresentam baixos teores de elementos radioativos. Isto permitiria um contraste com as rochas mineralizadas na região, uma vez que as rochas calcárias são as encaixantes dos fosforitos, e que a apatita na maioria das vezes possui um teor elevado de U e Th (IAEA, 2003).

As informações dos dados aeromagnetométricos não apresentam características intrínsecas que contribuam de forma direta na busca por novos depósitos minerais fosfatados. Contudo serão aqui processados e utilizados como mais um parâmetro de análise e ferramenta de integração quando utilizados métodos estatísticos de prospecção.

5.1.2. Base de Dados, Controle de qualidade e Pré-processamento

A base de dados aerogeofísicos utilizado no trabalho foi cedida pela Superintendência de Geologia e Mineração do Estado de Goiás (SGM) ao Laboratório de Geofísica Aplicada da

Universidade de Brasília (LGA – IG/ UnB) com o intuito de fomentar pesquisas na região. Os bancos de dados compreendem os métodos magnetométrico e gamaespectrométrico da área 5 do Levantamento Aerogeofísico do Estado de Goiás, projeto este denominado Paleo-Neoproterozóico, 3ª etapa. O aerolevanteamento foi realizado de maio a setembro de 2006, contratado pelo Governo do Estado de Goiás/SIC – MME/CPRM e executado pela Lasa Engenharia e Prospecção S/A e recobre a porção nordeste do Estado de Goiás, na região centro-oeste brasileira (Fig. 1).

No total foram realizados 115.471 km lineares de levantamento, recobrando uma área de 50.440 km². O levantamento foi realizado com direção N-S, sendo o espaçamento entre as linhas de voo de 500 m e altura nominal de 100 m. As linhas de controle foram executadas no sentido E-W com espaçamento de 5.000 m entre uma e outra (LASA, 2006).

As leituras feitas pelo magnetômetro se dão a cada 0,1 segundos, enquanto as leituras feitas pelo gamaespectrômetro são a cada 1 segundo. Fazendo-se o cálculo para uma velocidade média de 292 km/h das aeronaves, tem-se que a cada 8 metros do terreno, aproximadamente, uma medida magnética é feita, enquanto o gamespectrômetro faz uma leitura a cada 80 metros do terreno, aproximadamente. O posicionamento destas leituras no sistema se dá através da sincronização deste com o GPS, que possui precisão menor que 10 metros (LASA, 2006).

O magnetômetro utilizado nas aeronaves para realização do levantamento foi um Scintrex CS-2 de vapor de césio, com resolução de 0,001 nT e faixa de leitura de 20.000 a 95.000 nT. Para a base terrestre, foi utilizado um magnetômetro portátil com precisão de 0,1 nT, com leituras a cada 3 segundos (LASA, 2006).

Os bancos de dados da Área 5 de Goiás de magnetometria e gamaespectrometria recebidos no formato ASCII foram importados para o Oasis Montaj (Geosoft®, 2009) onde foram realizados todos os processamentos.

O banco de dados foi homogeneizado e as informações de posicionamento geográfico foram padronizadas para todo o projeto como coordenadas planares UTM zona 23 sul e *Datum South America* 1969 (SAD 69) relativas à região estudada.

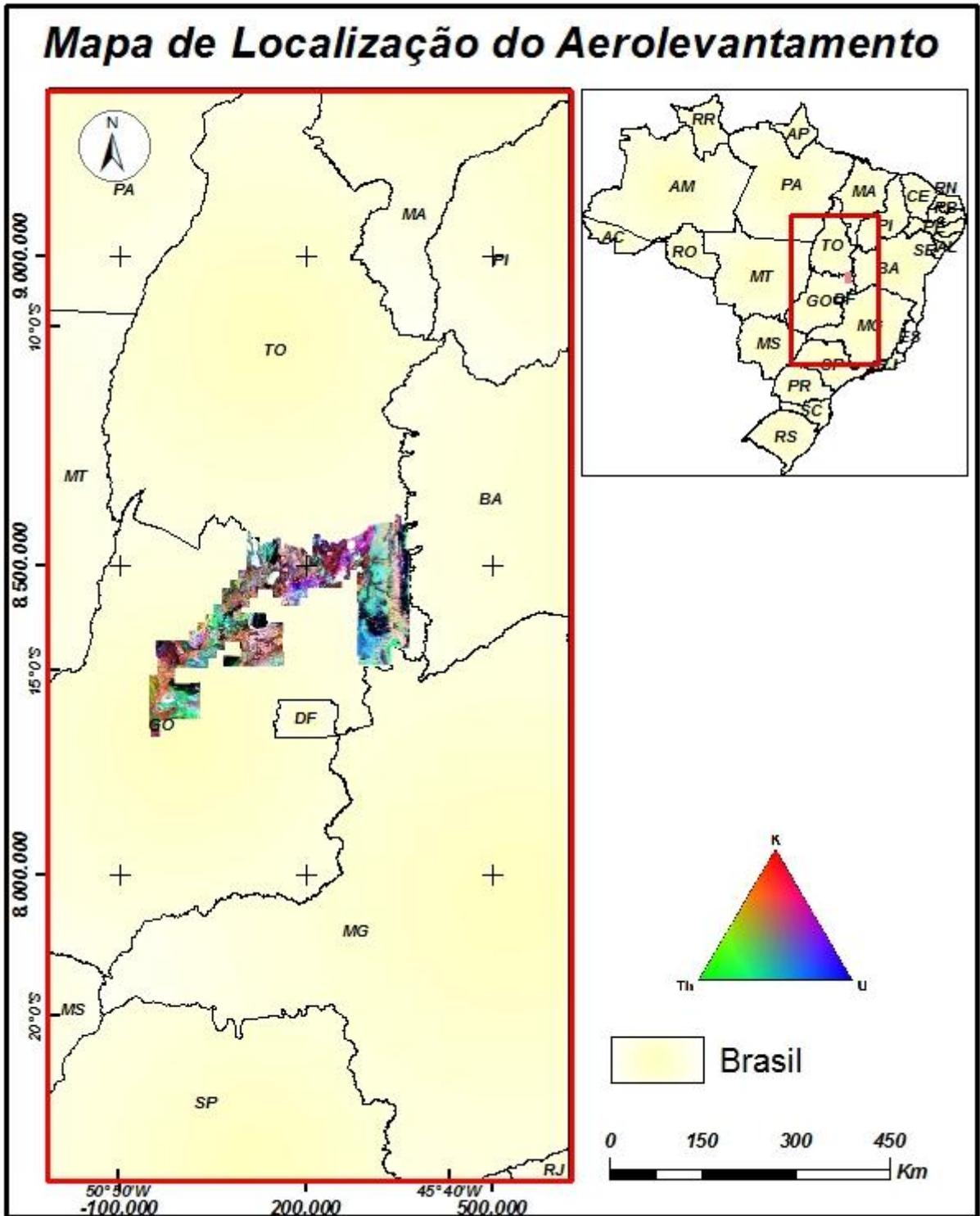


Fig. 1 – Localização do Aerolevanteamento Paleo-Neoproterozóico, 3ª etapa do Estado de Goiás com a imagem ternária RGB da área recoberta.

De acordo com LASA (2006), estes dados foram pré-processados a partir da aplicação de correções do efeito da variação geomagnética diurna, do campo geomagnético (IGRF), além de correções quanto ao nivelamento da malha de amostragem. Inicialmente, foi aplicado o processamento de controle de qualidade, no qual procurou-se verificar a qualidade e a representatividade espacial dos dados a partir dos mapas das linhas de voo, perfis das linhas, perfis rebatidos além do envelope de ruídos. Nestes procedimentos foi comprovada a qualidade satisfatória dos dados para utilização neste estudo.

O projeto foi dividido em diferentes etapas. Foi realizado o processamento dos dados da magnetometria e da gamaespectrometria para toda área 5, sendo gerados os produtos básicos para interpretação. A partir dos dados de gamaespectrometria foram gerados os mapas dos canais de urânio (eU, ppm), potássio (K, %), tório (eTh, ppm) e contagem total, e as razões eU/eTh, eU/K e eTh/K. Com os dados de magnetometria foram gerados os produtos campo magnético anômalo (CMA) e residual (CMR), amplitude do sinal analítico (ASA) e inclinação do sinal analítico (ISA). Tais produtos não apresentaram uma resposta significativa para a região de interesse. O principal motivo, é que a área recoberta pelo levantamento é muito extensa, fato que denota em grande variedade de litotipos e resulta no mascaramento de regiões que apresentam reduzidas concentrações de radioelementos, quando comparadas como um todo.

Para obter um melhor resposta dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos para a área de estudos, foi realizado o mesmo processamento feito para a área 5 inteira, agora para a área do projeto recortada, sendo gerados os mesmos produtos, e assim retirando a influências de litotipos anômalos para estes métodos, porém que não fazem parte da região estudada.

A segunda fase do processamento foi a geração de malhas regulares para as amostragens ao longo das linhas de voo. Testes nesta fase revelaram que o algoritmo que melhor representa os conteúdos de alta frequência dos sinais representados é aquele baseado na krigagem. Porém, para diminuir o tempo na geração das malhas, utilizou-se a mínima curvatura (rangrid, Geosoft, 2009) para os dados gamaespectrométricos e bi-direcional (bi-grid, Geosoft, 2009) para os dados magnetométricos, que apresentaram uma resposta tão boa quanto a da krigagem em termos de imagem e tempo para geração bastante inferior. As

malhas geradas possuem células quadradas com $\frac{1}{4}$ do espaçamento das linhas de voo, ou seja, 125 metros, como sugerido por Vasconcelos *et al.* (1990).

A *homogeneização das superfícies interpoladas* é feita para sanar problemas que ainda restam do nivelamento das malhas de medição, utilizando-se técnicas de micronivelamento e/ou de decorrugação, objetivando-se assim obter a melhor imagem possível dos canais trabalhados.

Para a geração das imagens do campo geofísico medido e suas transformações, os dados nos quais se basearam foram cuidadosamente tratados com o objetivo de preservar as características originais.

5.1.3. Magnetometria

5.1.3.1. Processamento dos dados

O trabalho inicial feito para o banco de dados magnetométrico foi o estudo estatístico do canal original MAGLEV ou CMT, canal correspondente ao campo magnético total, feitas as devidas correções de compensação, paralaxe e variação diurna, e nivelamento. Dado este tratado pela equipe de aquisição (LASA, 2006), e contido no banco de dados ASCII original. Este canal, interpolado com o algoritmo bi-direcional (bi-grid, Geosoft, 2009), passou pelo processo de micronivelamento sugerido pela Geosoft (2009), no qual são utilizados filtros passa-baixa e passa-alta, Butterworth e Cosseno Direcional, respectivamente, servindo de base para a geração dos demais produtos.

A análise dos dados magnetométricos na área possui como foco principal a observação de alguma correlação que possa existir entre as ocorrências dos fosforitos e o conteúdo de minerais magnéticos associados, se existente. Nesse caso é necessário que a base para geração dos produtos seja o campo magnético residual (CMR, Fig. 3). O CMR é resultado da subtração do IGRF (International Geomagnetic Reference Field) do campo magnético total (CMT), que resulta no campo magnético anômalo (CMA), seguido da retirada da influência magnética do embasamento (Nabighian *et al.*, 2005), superfície de segunda ordem (Geosoft, 2009).

Baseado no campo magnético residual gerado, e buscando a maior quantidade de informações, foram gerados e analisados todos os principais produtos magnetométricos, tomando-se cuidado especial na preservação dos conteúdos de altas frequências espaciais dos sinais medidos, uma vez que os alvos de interesse, fosforitos, são corpos pequenos e estão localizados em porções mais rasas do terreno.

Os principais temas gerados e analisados foram: o espectro de potência radialmente ponderado (Fig. 2), a amplitude do sinal analítico (ASA, Fig. 4), inclinação do sinal analítico (ISA), redução ao pólo (REDP), além das imagens destes mesmos produtos com filtro passa-alta. Porém, como o que se busca neste trabalho não tem uma relação direta com esse tipo de sinal medido, apenas a imagem e dados da amplitude do sinal analítico filtrada com passa-alta foi utilizada, e somente como mais um parâmetro de correlação durante a fase estatística do trabalho, na utilização das regressões múltiplas.

Como pode ser observado no espectro radialmente ponderado (Davis, 1986), figura 2, as informações contidas nos dados magnetométricos representam feições estruturais e composicionais com profundidades entre 5 e 1 quilômetro. Já, os dados gamaespectrométricos, representam o conteúdo radioativo dos primeiros 30 a 45 centímetros da superfície (Gregory & Horwood, 1961 *in*. Wilford *et al.* 1997). Sendo assim, os temas representam feições em diferentes profundidades da crosta. Para que a correlação entre os dados magnetométrico e gamaespectrométricos possa ser realizada, existe a necessidade de os dados magnetométricos sejam tratados para assim apresentarem ordens de grandeza semelhantes. Com o intuito de realizar esta correlação, sobre os temas da magnetometria, foi utilizado filtro passa-alta, ressaltando assim o conteúdo de alta frequência e evidenciando o relevo magnético mais raso.

Através da imagem do espectro de potência radialmente ponderado (Fig. 2), que representa a média radial da potência pelo número de onda, que é inverso do comprimento de onda (Reeves, 2005), podem ser identificadas pelo menos três família de fontes magnéticas, como traçado no gráfico da figura 2. Na cor rosa a família de fontes mais profundas, a aproximadamente 4 km de profundidade; na cor verde a segunda família com profundidade de 2,5 km; e a terceira família na cor azul, a cerca de 1 km de profundidade.

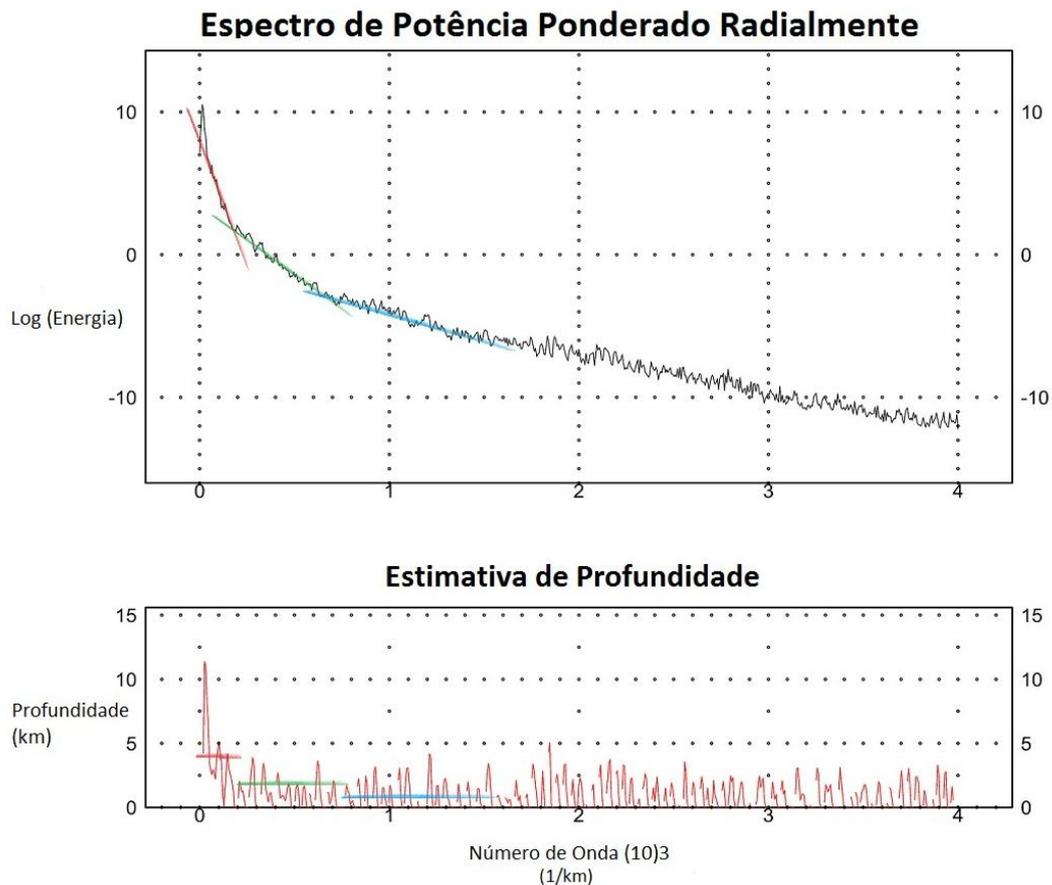


Fig. 2 – Gráfico do espectro de potência radialmente ponderado gerado a partir do campo magnético residual, com indicação das profundidades médias das fontes.

O sinal magnético do campo residual (Fig. 3) mostra que existe quase um bandamento de regiões mais e menos magnéticas alongadas na direção NE/SW. Localmente podem ser encontradas feições menores, porém muito magnéticas como na porção norte da área. Com um olhar mais detalhado é possível identificar feições sutis alinhadas na direção NW/SE cortando toda a área, e estas podendo ser interpretadas como possíveis lineamentos estruturais profundos.

A imagem da amplitude do sinal analítico (Fig. 4) mostra o posicionamento centralizado das fontes magnéticas da área de estudos, definindo os limites (Roest *et al.*, 1992). Uma característica importante que pode ser observada quando comparada esta imagem com o mapa geológico são anomalias com pequeno comprimento de onda que separam o que é embasamento, lado esquerdo da imagem, e os sedimentos da área, lado direito. Sendo assim, é possível observar uma concentração maior das fontes com maior comprimento de

onda na região leste da área, região onde são encontradas rochas do embasamento, e também algumas feições menores e arredondadas a norte e nordeste. Na porção sudeste existe uma anomalia magnética de proporções regionais. O restante do relevo magnético apresenta-se pouco movimentado, com comprimentos de onda pequenos. É possível visualizar ainda algumas feições lineares regionais alongadas NE/SW.

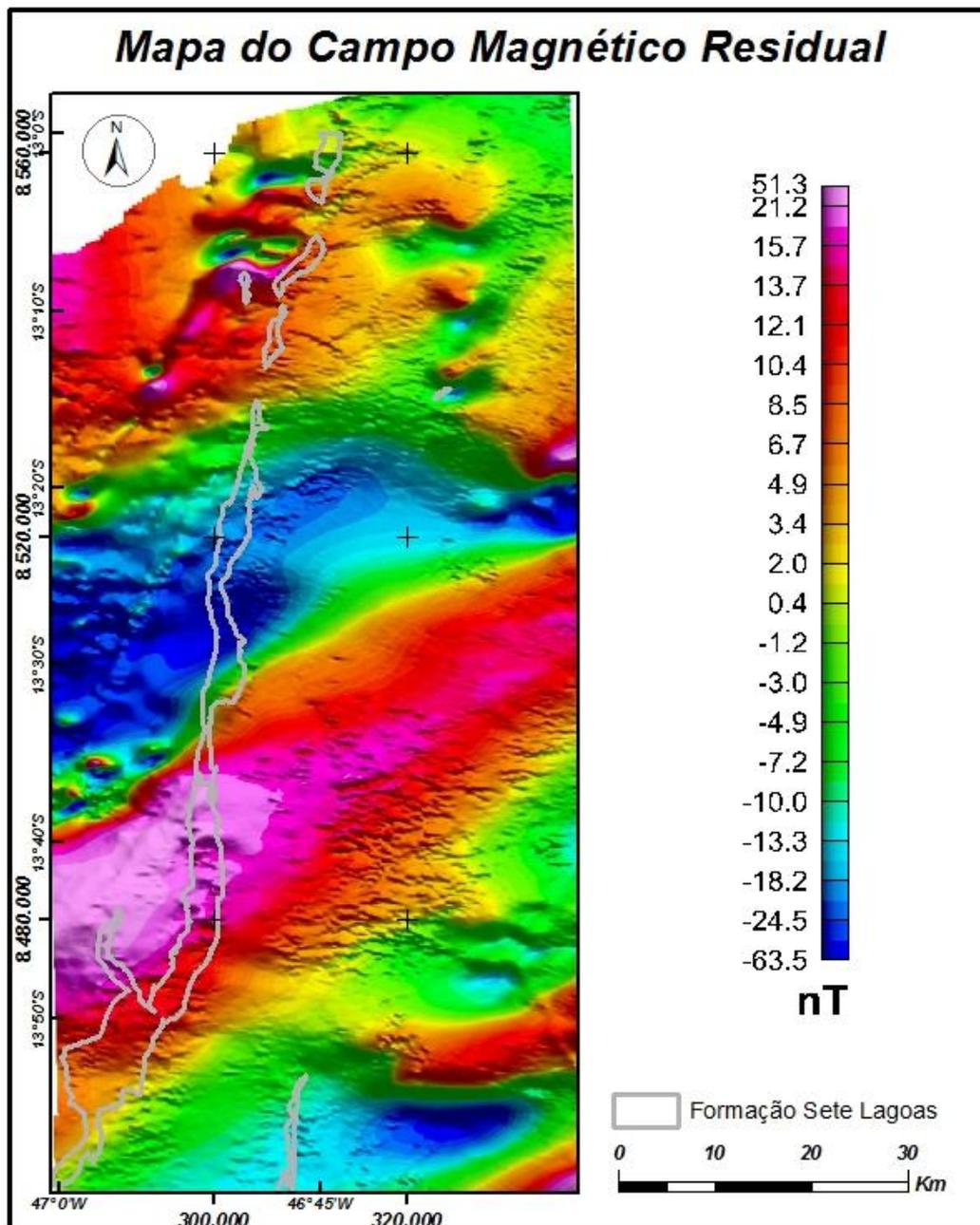


Fig. 3 – Imagem do campo magnético residual em nT.

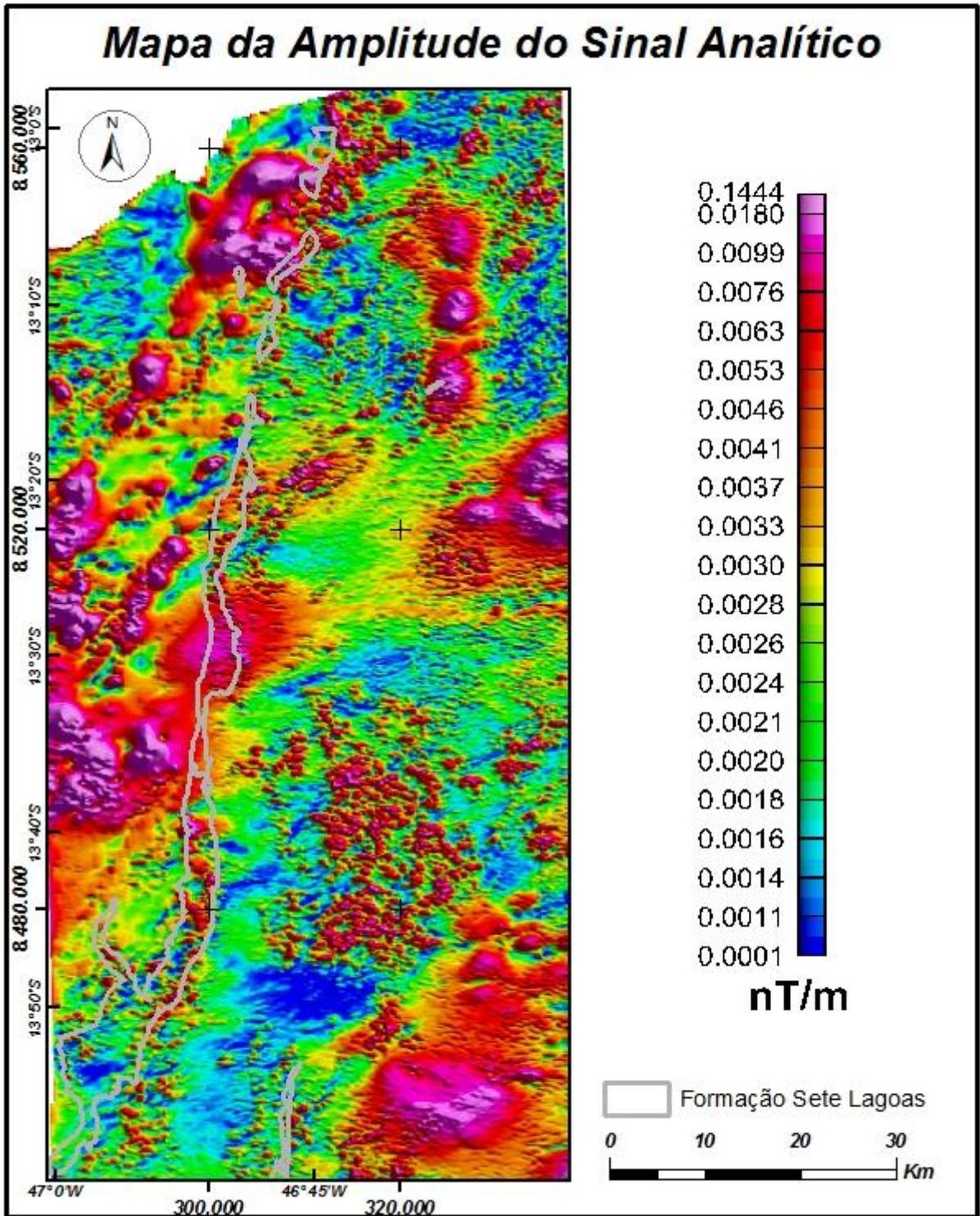


Fig. 4 – Imagem da amplitude do sinal analítico em nT/m.

5.1.3. Gamaespectrometria

5.1.3.1. Processamento e geração dos produtos

Para os dados gamaespectrométricos, da mesma forma, procurou-se ao máximo manter o conteúdo dos dados originais. Contudo, na análise estatística do banco de dados original foram encontrados vários valores negativos (Tab. 1), o que não é compatível com esse tipo de informação, uma vez que o sensor não consegue medir dados que não existam ou ainda que sejam negativos. Além disso, notou-se que os canais do U e do K apresentavam valores médios abaixo daqueles considerados média da sua concentração na crosta terrestres de acordo com IAEA, 2003.

Tab. 1 – Valores estatísticos dos radioelementos retirados do banco de dados ASCII original, cedidos ao LGA-IG/ UnB pela SGM.

Canal / Radioelemento	Valor mínimo	Valor máximo	Média	Desvio Padrão
Contagem total	-0,934	55,011	6,442	3,671
Potássio (%)	-0,675	6,289	1,223	0,734
Tório (ppm)	-1,306	143,099	13,367	9,195
Urânio (ppm)	-3,852	17,388	1,171	0,990

Com o objetivo de retirar estes valores negativos do banco, foram realizadas várias análises: a) primeiramente analisou-se a estatística dos dados dos canais originais (Tab. 1); b) analisou-se o tipo de rochas existentes na região, e; c) além, dos valores médios dos 3 radioelementos para estas rochas, 2,5% para o K, 3ppm para o U e 12ppm para o Th (Wilford *et al.*, 1997; IAEA, 2003). O passo seguinte foi adicionar valores constantes para os canais do K e U (0,67 e 0,83 respectivamente), para que estes passassem a ter valores semelhantes aos valores médios da crosta, e assim, diminuindo o número de valores negativos do banco. Mesmo com este procedimento ainda restaram valores negativos (Tab. 2), que então foram excluídos do banco de dados, tomando-se o cuidado para não haver grande concentração

destes em regiões específicas o que poderia gerar vazios na malha de interpolação. A análise estatística destes dados fornece informações que os valores negativos transformados em dummies não atingem 1% dos dados totais, nem no caso do canal do urânio que apresenta o maior número de valores negativos (0,6%).

O canal da contagem total foi mantido com os dados originais. Para o canal do Th os valores negativos foram apenas excluídos da base de dados, uma vez que os valores médios deste canal já ultrapassavam os valores médios da crosta.

Tab. 2 – Valores estatísticos dos radioelementos retirados do banco de dados ASCII original, adicionando-se as constantes 0,67 para o canal do K e 0,83 para o canal do U.

Canal / Radioelemento	Valor mínimo	Valor máximo	Média	Desvio Padrão
Contagem total	-0,934	55,011	6,442	3,671
Potássio (%)	-0,005	6,959	1,893	0,734
Tório (ppm)	-1,306	143,099	13,367	9,195
Urânio (ppm)	-3,022	18,218	2,001	0,990

O que se seguiu foi a interpolação destes dados e posterior homogeneização utilizando-se filtro Hanning 3x3 (Geosoft, 2009) três vezes, filtro que menos alterou a estatística dos dados, fornecendo uma resposta visual menos corrugada.

Com estes dados e o processamento citado acima, onde os canais foram interpolados em malhas regulares e em seguida fez-se a homogeneização destas, foram gerados todos os produtos e transformações para interpretação: contagem total, potássio, tório, urânio, razões (UK, UTh e ThK), imagem ternária RGB, produtos estes mostrados e descritos no capítulo 6 (Fig. 3a, b, c, d, e, f), e parâmetro F, que permite ressaltar enriquecimento de K e U em relação ao Th (Efimov, 1978 *apud* Fornazzari e Ferreira, 2003).

A imagem do parâmetro F (Fig. 5) mostra um enriquecimento de K e U em relação ao Th (Efimov, 1978 *apud* Fornazzari e Ferreira, 2003), e característica pode ser notada

principalmente nas porções oeste da área, região correspondente às rochas do embasamento. Se analisada esta imagem em conjunto com as informações geológicas, esta diferenciação e delimitação das rochas pertencentes ao embasamento e das rochas sedimentares é bastante evidente.

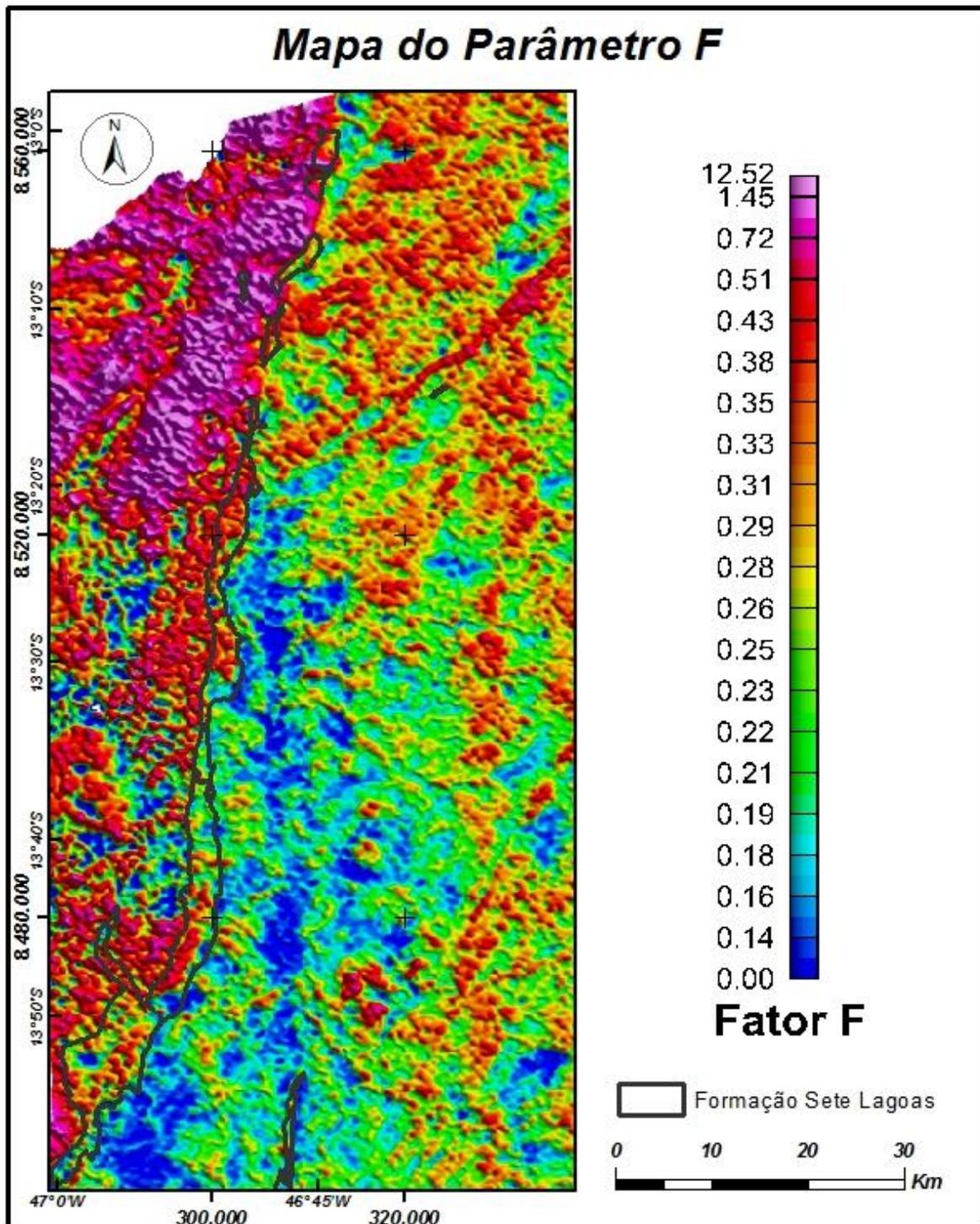


Fig. 5 – Imagem do Parâmetro F

Prospecção de fosforitos utilizando geofísica aérea no nordeste de Goiás

Abstract

The project area is situated in the central part of Brazil, on the northeast region of Goiás State. The phosphatic rocks occur in the Bambuí Group, on the east part of Faixa de Dobramentos Brasília (FDB), on the western border of the São Francisco Craton. The mineralized rocks in the study area are associated with limestone and apatite. In order to discover new prospective targets of sedimentary phosphatic bodies, a faster and more objective airborne geophysics data processing method was used together with statistical correlation of geochemical data. The integration of these data provided potential targets of mineralization that will be checked with geological mapping and ground geophysics (gamma-ray spectrometry) to produce a parameter of calibration and comparison to the airborne geophysical information. Integration of geological information and estimated maps of U and P show that igneous rocks and lateritic crust presents the higher content of uranium and phosphorous elements, as expected. However, small anomalies were identified in sediments of Serra de Santa Helena and Sete Lagoas formations where the known phosphatic bodies occur in the study area. The next step should be field work to check these anomalies. Profiles of geological mapping and ground gamma-ray will be carried out.

Resumo

O Grupo Bambuí, onde a área de trabalho encontra-se inserida, possui um ambiente favorável à formação de rochas fosfáticas, apresentando-se assim como uma área de interesse econômico. A utilização do processamento de dados geofísicos aéreos, métodos magnetométrico e gamaespectrométrico, integrado com a geoquímica têm como finalidade a otimização dos trabalhos de prospecção do minério de fosfato, uma vez que a apatita, $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH},\text{F},\text{Cl})$, geralmente apresenta teor elevado de U. O processamento destes produtos, geofísica e geoquímica, deu origem a mapas de estimativa de U e P, mostrando o

enriquecimento destes elementos na região. Os mapas gerados, por meio do processamento estatístico dos dados aerogeofísicos, foram utilizados como base para a seleção de áreas alvo para a pesquisa detalhada de prospecção.

Keywords: Geofísica aplicada, regressões múltiplas, fosforitos, urânio, Grupo Bambuí.

6.1. Introdução

Assim como ocorre na maior parte do mundo, no Brasil, cerca de 80% dos depósitos fosfatados conhecidos tem origem ígnea, com presença acentuada de rochas carbonáticas e minerais micáceos com baixo teor de P_2O_5 (Souza e Cardoso, 2008).

O Estado de Goiás possui a segunda maior reserva de rocha fosfática do país, com 13,8%, ficando atrás apenas do Estado de Minas Gerais, com 67,9% (Souza e Fonseca, 2009). Em função da importância agrícola do fósforo e por apresentarem como únicas fontes as rochas fosfáticas, a busca por novos depósitos de fosfato e a viabilização de jazidas de pequeno porte tem avançado significativamente no Brasil.

Na área de estudo, o Grupo Bambuí está situado entre a porção leste da Faixa de Dobramentos Brasília (FDB) e o Cráton São Francisco (CSF). Definido por Dardenne (1978), o Grupo é dividido em seis formações, da base para o topo: Formação Jequitaí composta por diamictitos e subordinadamente pelitos maciços; Formação Sete Lagoas caracterizada por pelitos e margas na base e, calcários e dolomitos no topo; Formação Serra de Santa Helena, constituída por argilitos e siltitos com lentes de calcário cinza escuro e níveis de marga; Formação Lagoa do Jacaré, composta por níveis margosos e siltitos argilosos intercalados com bancos ou lentes de calcário preto oolítico; Formação Serra da Saudade, formada por siltitos argilosos, esverdeados e margosos, com presença de calcário cinza na base e arcóseos esverdeados no topo; e a Formação Três Marias, constituída por arcóseos esverdeados em bancos maciços intercalados com siltitos arcoseanos também esverdeados.

A sedimentação do Grupo Bambuí, na Faixa Brasília, teve início com os diamictitos durante um período glacial. O derretimento das camadas de gelo permitiu a instalação de um ambiente marinho epicontinental, e iniciou-se a deposição de sedimentos pelito-

carbonatados que se sobrepõe ao Cráton São Francisco. O ambiente criado em função da deglaciação estabeleceu também as condições climáticas necessárias para a deposição dos sedimentos fosfáticos na região (Dardenne, 1978).

As ocorrências de rochas fosfatadas e fosforitos fazem parte de um contexto onde estão inseridos, da base para o topo, as seguintes unidades litoestratigráficas: Complexo Granito-gnáissico, Formação Ticunzal, Suíte Aurumina, Quartzo-diorito Nova Roma, Suíte Pedra Branca, Grupo Avaí, Grupo Paranoá, Formação Jequitaiá, Grupo Bambuí e grupos Areado e Urucuia (Monteiro, 2009).

A informação geológica utilizada neste trabalho (Fig. 1) é resultado do levantamento geológico das folhas Monte Alegre de Goiás, Nova Roma e Cavalcante, em escala 1:100.000, realizado pelo programa Geologia do Brasil (PGB/PGL) do Serviço Geológico do Brasil (CPRM) em 2006 (Moreira *et al.*, 2008). Uma característica marcante que pode ser observada em afloramentos na área é a diferenciação de rochas de origem ígnea (embasamento) na porção oeste, e de rochas de origem sedimentar na porção leste da área.

Com forma alongada na direção N-S, a área do projeto está localizada na porção nordeste do Estado de Goiás e sudeste do Estado de Tocantins, distante cerca de 300 km de Brasília (Fig. 2). Com extensão aproximada de 7.000 km², abrange os municípios de Campos Belos, Monte Alegre de Goiás e Nova Roma, em Goiás, e Arraias em Tocantins.

A área de estudo apresenta cobertura vegetal pouco densa, fato que implica em acesso fácil, podendo ser percorrida sem maiores dificuldades. O clima semiárido é responsável pela existência de um manto de alteração pouco espesso e descontínuo, resultando na ocorrência de afloramentos rochosos.

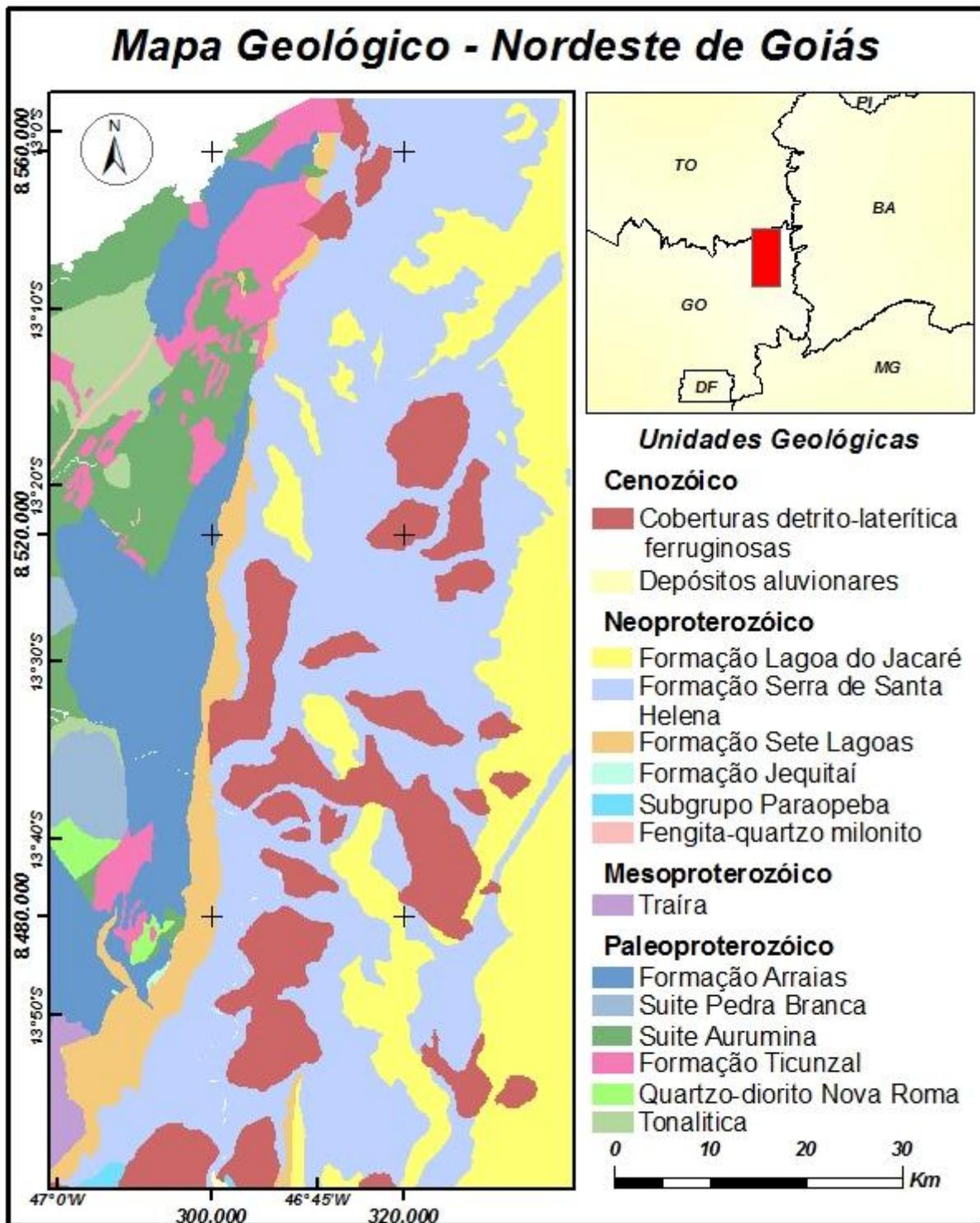


Fig. 1 – Mapa geológico da área de estudo (modificado de Moreira *et al.*, 2008).

Ferreira *et al.* (1992) relataram que as rochas calcárias, encaixantes da mineralização fosfatada, normalmente apresentam baixos teores de elementos radioativos. Isto permitiria

um contraste com as rochas mineralizadas, uma vez que a apatita $[Ca_5(PO_4)_3(F,OH,Cl)]$ geralmente possui teor elevado de U e Th.

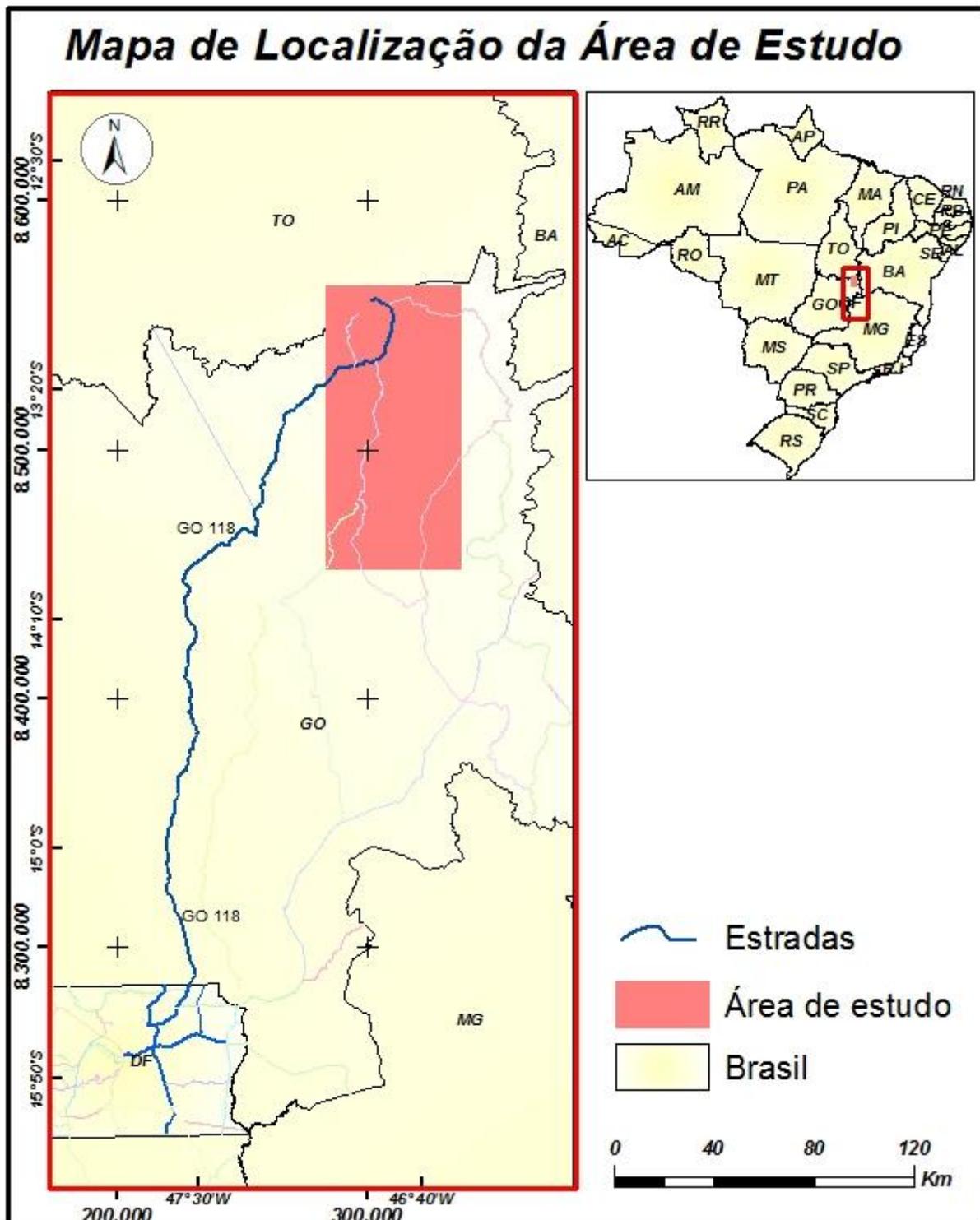


Fig. 2 – Mapa de localização da área de estudo, nordeste do Estado de Goiás.

Em função de sua pouca mobilidade no ambiente superficial, o tório é considerado um bom mapeador litológico (Pires, 1995). O urânio apresenta mobilidade intermediária, porém alguns litotipos podem ser caracterizados por elevados teores deste elemento. Isto é igualmente observado em alguns granitos, crostas lateríticas e rochas fosfáticas, devido à presença da apatita. O potássio, embora com mobilidade maior que a do urânio, tem expressiva presença na crosta como importante elemento maior constituinte de minerais formadores de rochas e, deste modo, indica variada distribuição de litotipos em superfície (IAEA, 2003).

Com base nestas informações, foi realizado o processamento dos dados aerogeofísicos, com ênfase maior na gamaespectrometria, uma vez que as rochas fosfatadas não apresentam magnetização e, algumas vezes, estão em afloramentos rasos ou afloram na região. Após os produtos básicos terem sido gerados, foram aplicados métodos estatísticos e em seguida a integração destes com a geoquímica, resultando em produtos finais como imagens que apresentam estimativas de U e P para a área do projeto.

6.2. Métodos

A base de dados aerogeofísicos utilizada no trabalho foi cedida pela Superintendência de Geologia e Mineração do Estado de Goiás para a Universidade de Brasília com o intuito de fomentar pesquisas na região. A área do levantamento aerogeofísico, denominada Área V ou Paleo-Neoproterozóico do Nordeste de Goiás, está localizada na região centro-oeste do Brasil, nordeste do estado, perfazendo uma área de 50.440 km². O aerolevanteamento foi realizado entre 01 de maio e 01 de setembro de 2006, com recobrimento total de 115.471 km lineares de perfis magnéticos e gamaespectrométricos, em alta resolução. O levantamento apresenta linhas de voo espaçadas de 500 metros com direção N-S, e linhas de controle com espaçamento de 5.000 metros com direção E-W. A altura nominal do voo é de 100 metros (LASA, 2006).

O banco de dados foi homogeneizado e as informações de posicionamento geográfico foram padronizadas para todo o projeto como coordenadas planares UTM, zona 23 sul e Datum South America 1969 (SAD 69), relativas à região estudada.

De acordo com LASA (2006), estes dados foram pré-processados a partir da aplicação de correções do efeito da variação geomagnética diurna, do campo geomagnético (IGRF), além de correções quanto ao nivelamento da malha de amostragem. Inicialmente, foi aplicado o processamento de controle de qualidade, no qual procurou-se verificar a qualidade e a representatividade espacial dos dados a partir dos mapas das linhas de voo, perfis das linhas, perfis rebatidos além do envelope de ruídos. Nestes procedimentos foi comprovada a qualidade satisfatória dos dados para utilização neste estudo.

Foi realizado o processamento dos dados da magnetometria e da gamaespectrometria para toda a área 5, sendo gerados os produtos básicos para interpretação. A partir dos dados de gamaespectrometria foram gerados os mapas dos canais de urânio (ppm), potássio (%), tório (ppm) e contagem total, e as razões U/Th, U/K e Th/K. Com os dados de magnetometria foram gerados os produtos campo magnético anômalo (CMA) e residual (CMR), amplitude do sinal analítico (ASA) e inclinação do sinal analítico (ISA). Tais produtos não apresentaram uma resposta significativa para a região de interesse. O principal motivo, é que a área recoberta pelo levantamento é muito extensa, fato que denota em grande variedade de litotipos e resulta no mascaramento de regiões que apresentam reduzidas concentrações de radioelementos, quando comparadas como um todo.

Com o objetivo de minimizar os efeitos provocados pelo tamanho da área e pela presença de diversos litotipos, o banco de dados foi recortado exatamente com o polígono da área de estudo, o que equivale às cartas Monte Alegre de Goiás e Nova Roma. Nesta etapa, foram gerados os mesmos produtos básicos; mapas dos canais de K, Th e U, razões K/U e U/Th e imagem ternária RGB (KThU) representados nas figuras 3, 4, 5, 6, 7 e 8, respectivamente. Os mapas gerados a partir do banco de dados recortado, não apresentaram os resultados esperados para a região de interesse, pois a presença de áreas com crostas lateríticas, por exemplo, causam respostas elevadas de tório, mascarando assim outras áreas que possuem reais valores anômalos dos radioelementos. Porém, a partir da análise qualitativa dos dados e a correlação destes com as informações geológicas, foi possível separar áreas alvo.

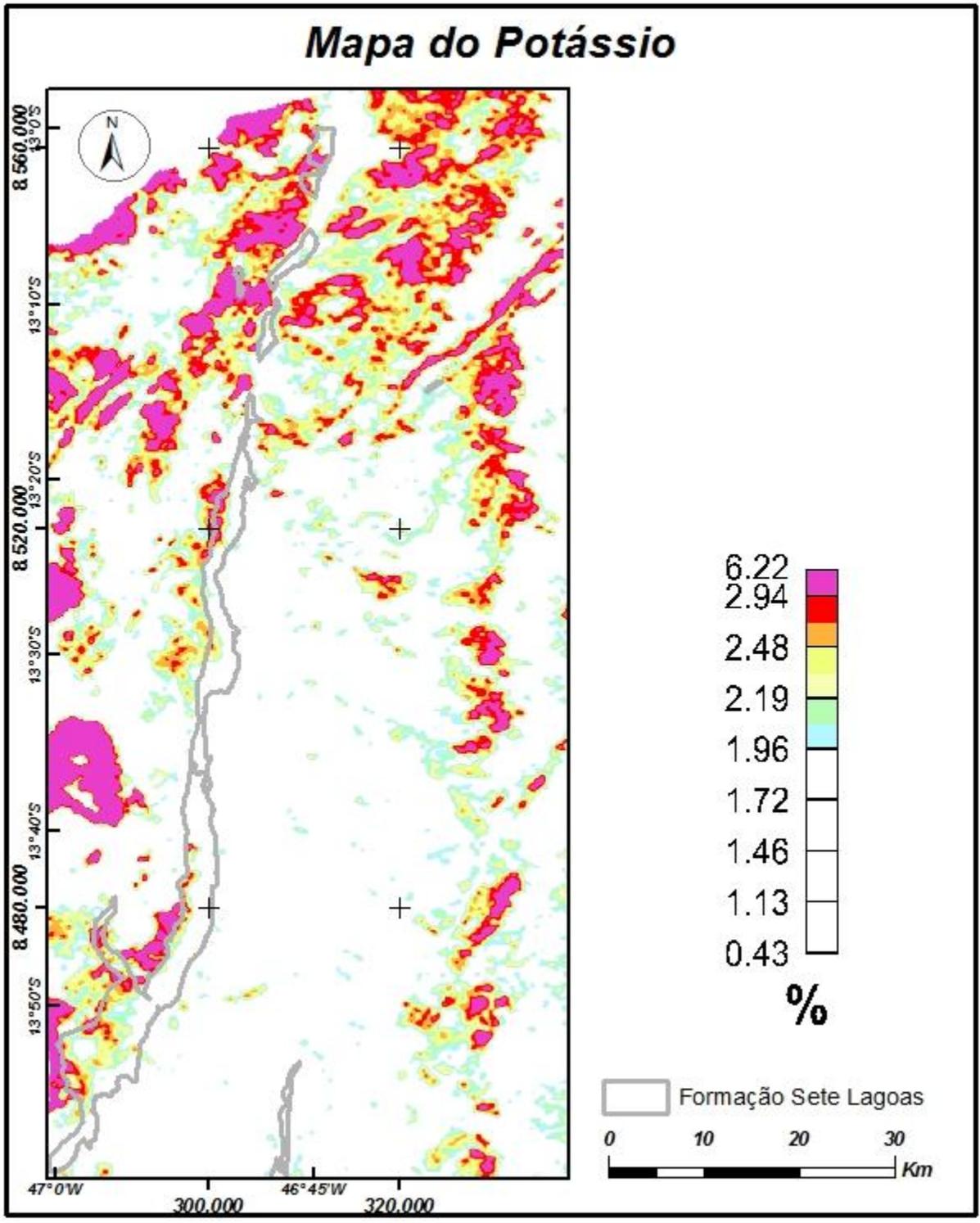


Fig. 3 - Imagem do canal do K com tabela de cores mostrando valores médios de cada elemento a valores máximos.

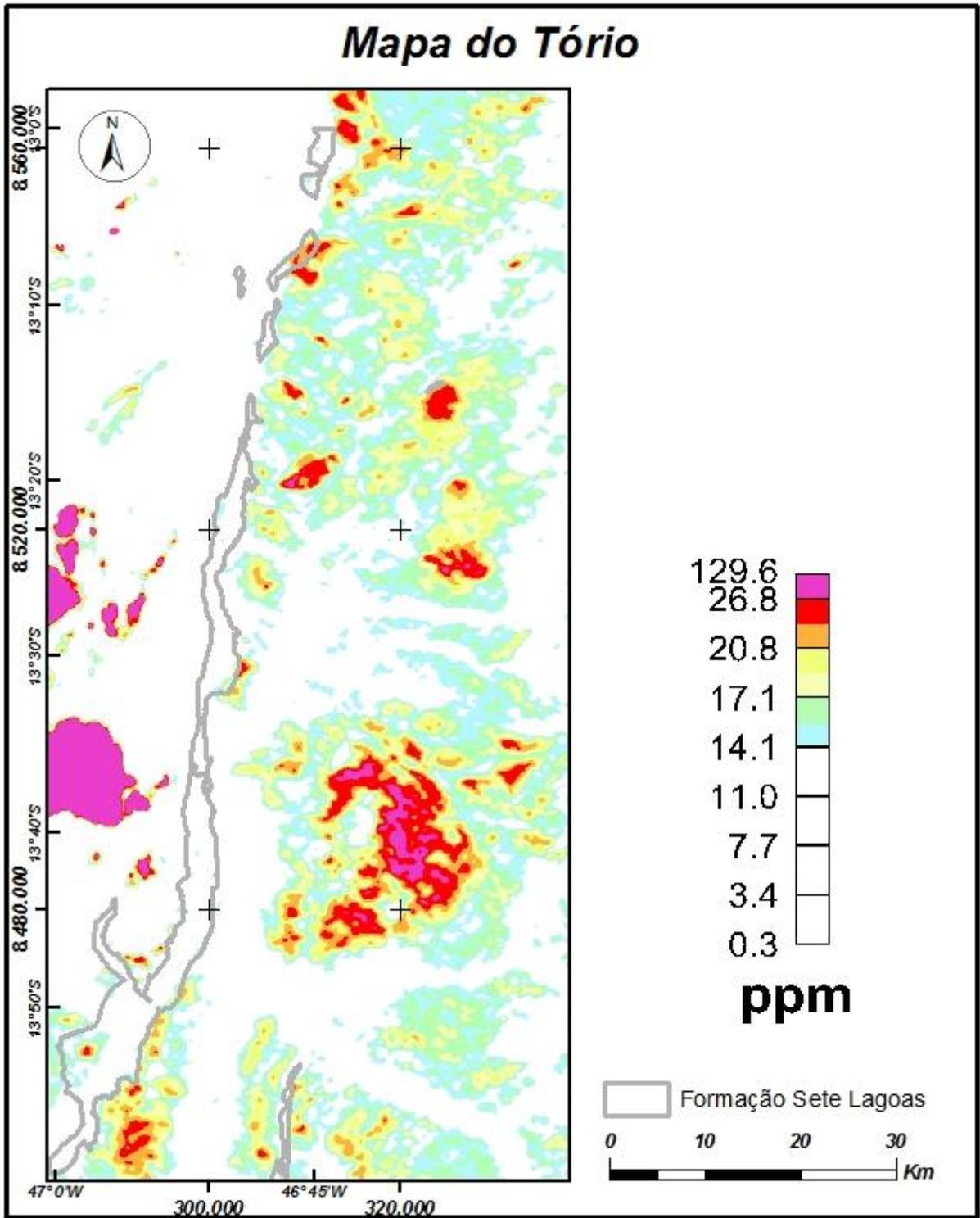


Fig. 4 - Imagem dos canais do eTh com tabela de cores mostrando valores médios de cada elemento a valores máximos.

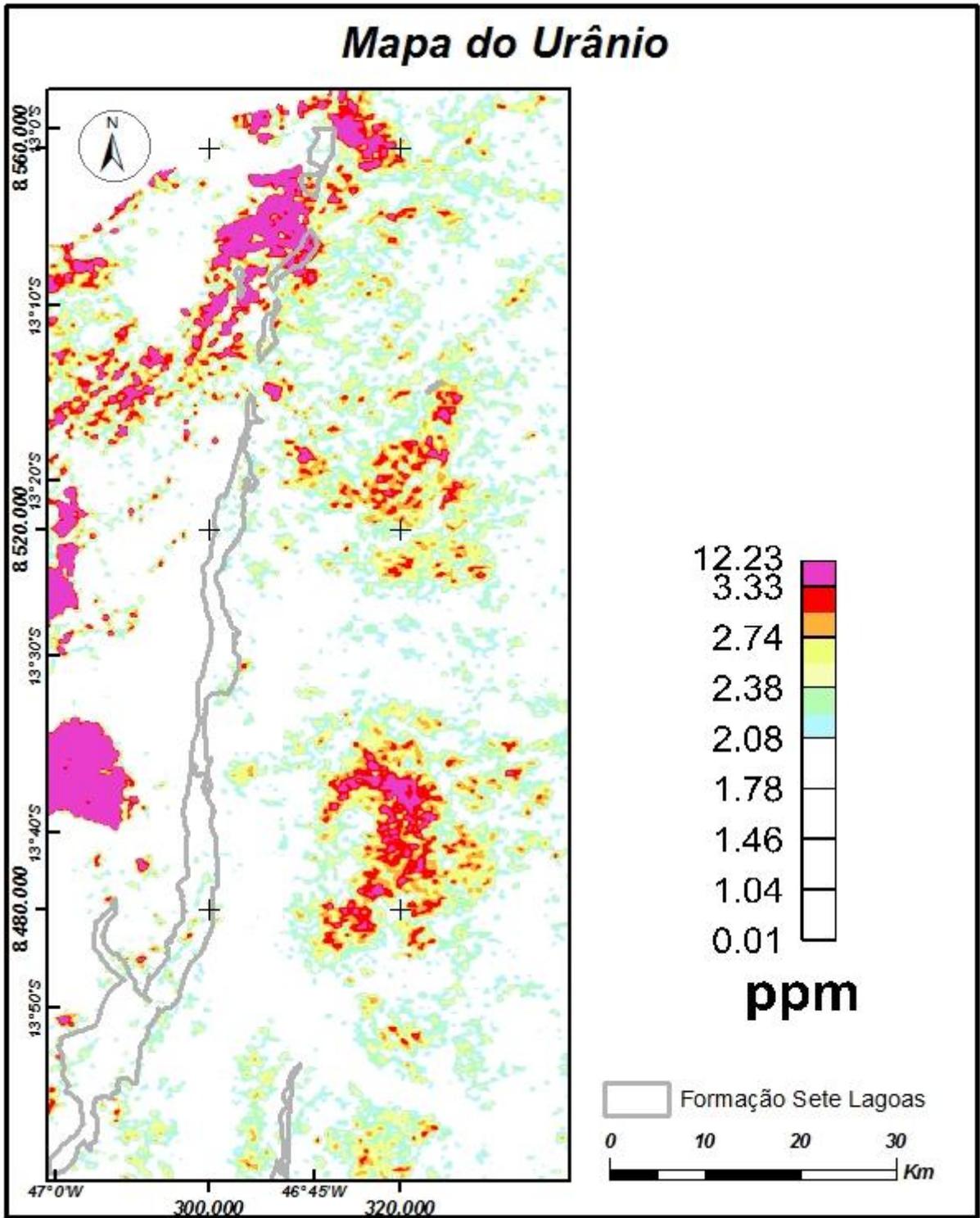


Fig. 5 - Imagem dos canais do eU com tabela de cores mostrando valores médios de cada elemento a valores máximos.

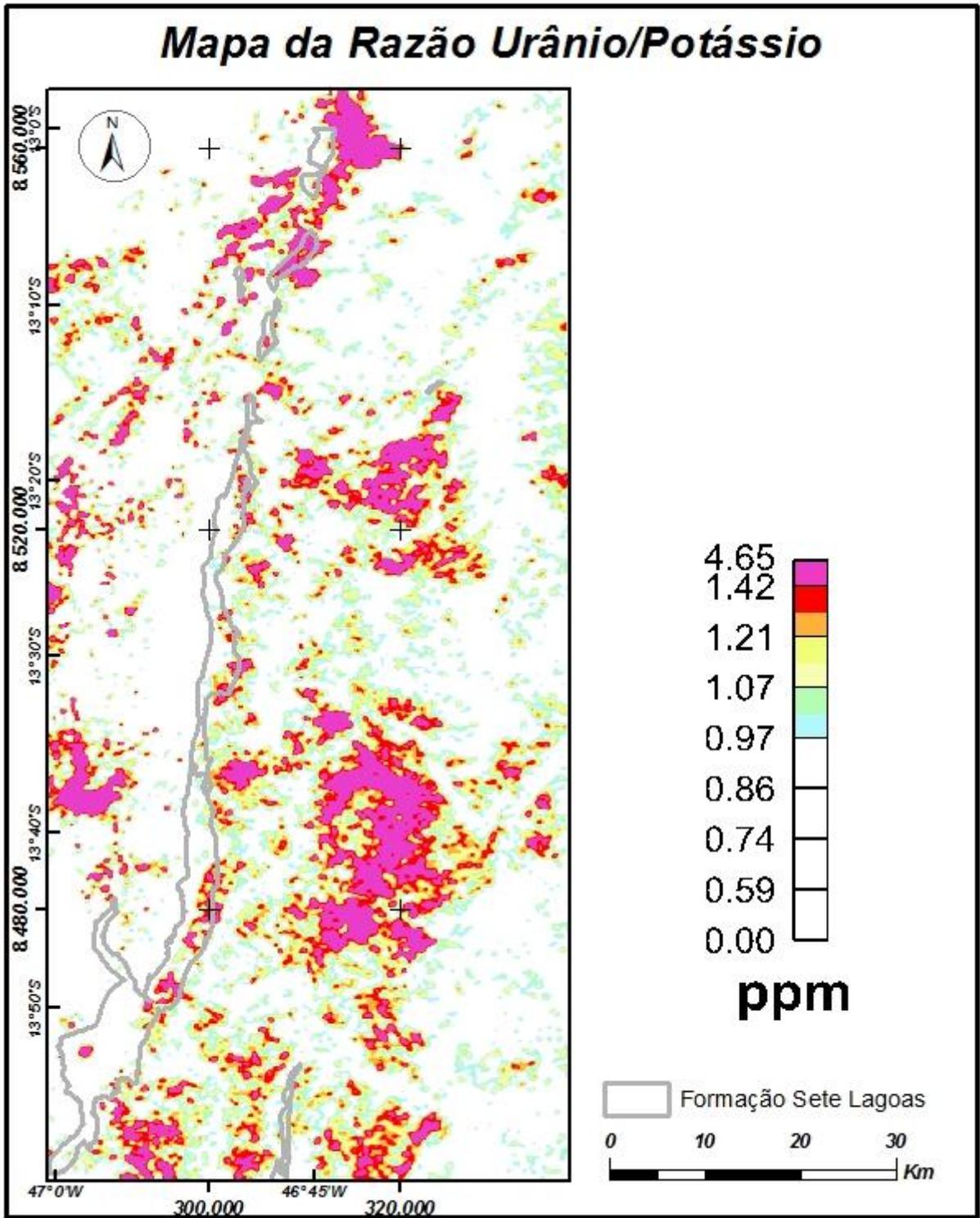


Fig. 6 - Imagem da razão eUK com tabela de cores mostrando valores médios de cada elemento a valores máximos.

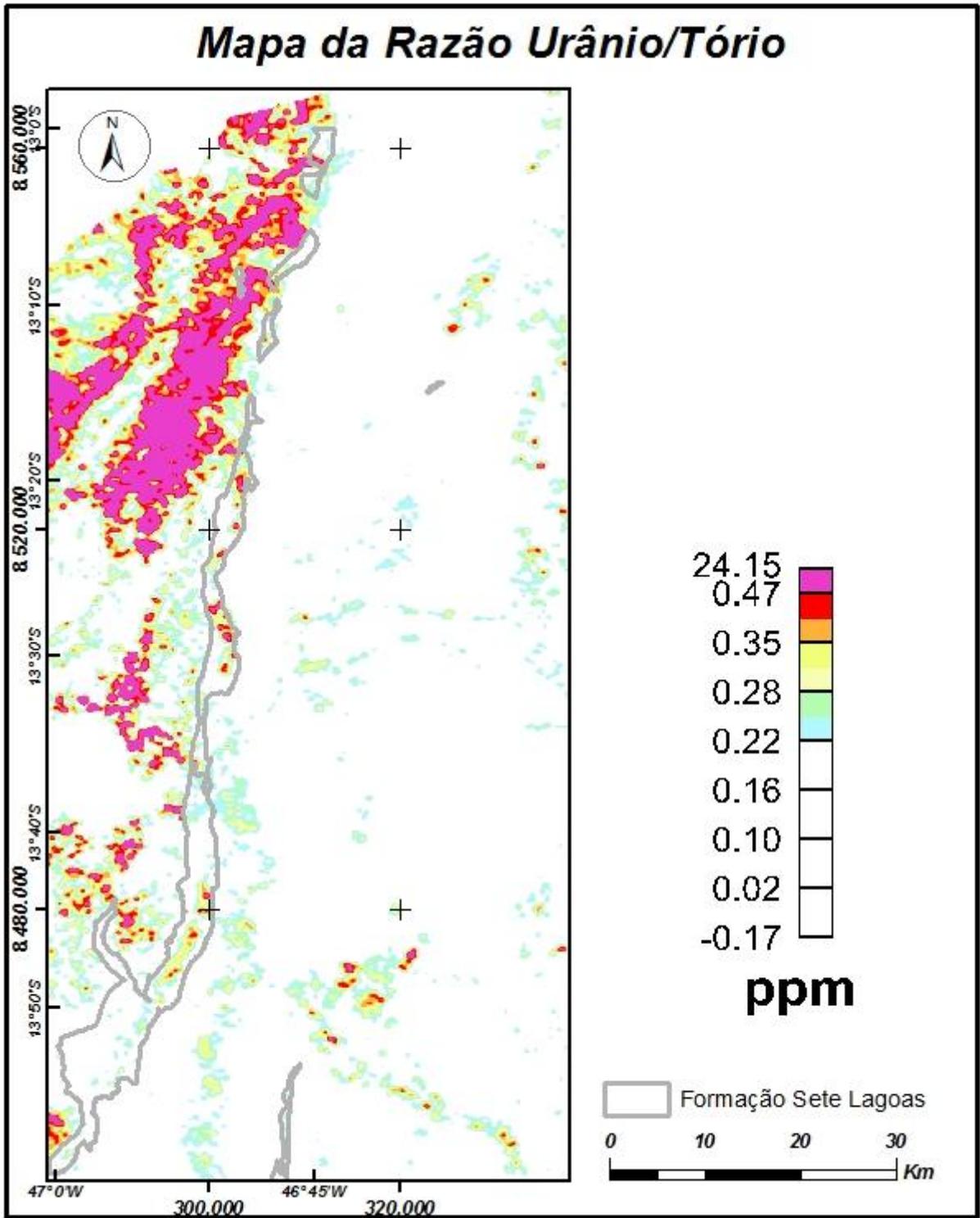


Fig. 7 - Imagem da razão eUeTh com tabela de cores mostrando valores médios de cada elemento a valores máximos.

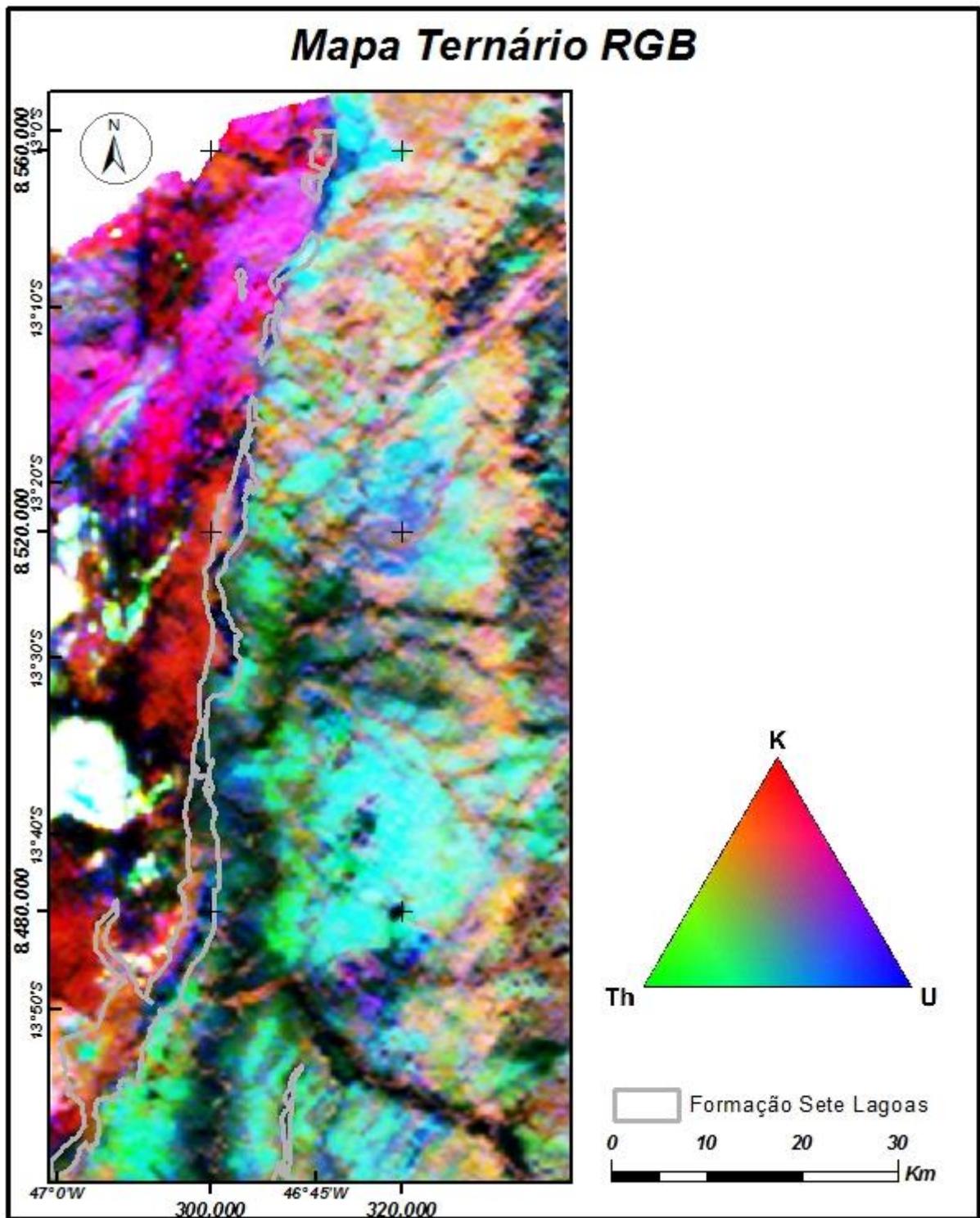


Fig. 8 – Imagem ternária RGB (KThU).

Em se tratando de rochas sedimentares na região mineralizada, os dados magnetométricos não aparecem como fundamentais na interpretação, contudo, foram caracterizados como mais um parâmetro de análise e como uma informação adicional para a aplicação da técnica

de regressões múltiplas. Sendo assim, os produtos magnetométricos foram filtrados com passa alta com o objetivo de ressaltar as altas frequências dos dados, evidenciando feições magnéticas mais rasas, podendo assim haver uma melhor correlação com as informações de gamaespectrometria e geoquímica.

A técnica de regressão linear múltipla entre as concentrações estimadas dos radioelementos pode ser usada para remover efeitos de processos geológicos em diferentes litotipos. O método é utilizado para realçar valores que se diferenciam da distribuição média de teores dentro de uma unidade interpretada (e.g. Pires *et al.*, 2010; Pires, 1995; Wellman, 1998). Com o objetivo de estudar a relação de dados provenientes de diferentes fontes e ressaltar as concentrações anômalas de urânio, foi utilizada a técnica estatística de regressão múltipla, tomando-se o cuidado para normalizar os dados pela média e assim deixar todos os elementos com a mesma unidade (Davis, 1973).

6.3. Interpretação qualitativa

A imagem do canal do potássio (Fig. 3) mostra um enriquecimento deste elemento nas porções norte, leste e oeste da área, sendo que as regiões central e sul apresentam valores de potássio abaixo da média. Na porção leste as altas concentrações de K (%) ocorrem próximo ao contato entre os siltitos da Formação Serra de Santa Helena e os calcarenitos da Formação Lagoa do Jacaré (Fig. 1). Na porção oeste existem alguns altos nas concentrações do radioelemento, porém observa-se dois altos de K, com forma aproximadamente circular, (Fig. 3) que correspondem ao biotita granito, da Suíte Pedra Branca (Fig. 1).

O mapa do tório (Fig. 4) nos permite observar um enriquecimento na porção leste, que corresponde às rochas sedimentares pertencentes à Fm. Serra de Santa Helena (Fig. 1). Contudo, as áreas onde se encontram os teores mais elevados de eTh (ppm) (regiões de coloração magenta, Fig. 4), foram mapeadas como crostas lateríticas, fato que justifica a elevada concentração deste radioelemento. Na porção oeste podemos identificar duas anomalias positivas de eTh, concentrações maiores que 25 ppm, que correspondem ao biotita granito (Fig. 1).

O canal urânio (Fig. 5) apresenta altas concentrações de eU (ppm) que correspondem ao biotita granito (Suíte Pedra Branca – Fig. 1) na porção oeste da área, mas também ocorrem altos teores de eU correlacionáveis com as crostas detrito-lateríticas localizadas na porção leste. Ao norte, estão áreas com altas concentrações de eU, superiores a 3 ppm, com dimensões aproximadas de 10 km x 10 km, que correspondem ao mica xisto da Fm. Ticunzal (Fig. 1).

Com base na imagem da razão eU/K (Fig. 6), é possível verificar que o enriquecimento de urânio em relação ao potássio se dá principalmente nas áreas onde ocorrem as crostas lateríticas e ao biotita granito (Fig. 1).

O produto da razão eU/eTh (Fig. 7) mostra enriquecimento em eU, relativamente ao eTh, na porção NW da área onde ocorrem rochas ígneas da Fm. Aurumina e em rochas da Fm. Ticunzal (Fig. 1). É possível também identificar a partir deste mapa o contato entre as rochas sedimentares e embasamento na região.

Com relação à imagem da composição ternária RGB/ KeTheU (Fig. 8), podemos observar com clareza três domínios, que representam o afloramento das rochas do embasamento (porção oeste, em cores quentes), das rochas calcárias que apresentam baixos teores de radioelementos como uma faixa delgada escura e chegando na sequência sedimentar (porção leste da área, com cores mais frias).

A imagem da amplitude do sinal analítico (ASA), com o filtro passa alta (Fig. 9), mostra o posicionamento das fontes magnéticas mais rasas na região estudada. O relevo magnético é bastante movimentado, indicando regiões com maior conteúdo de minerais magnéticos sobre o biotita granito e às rochas da Fm. Serra de Santa Helena, a nordeste e no centro, algumas vezes, também estão relacionados às rochas da Fm. Lagoa do Jacaré.

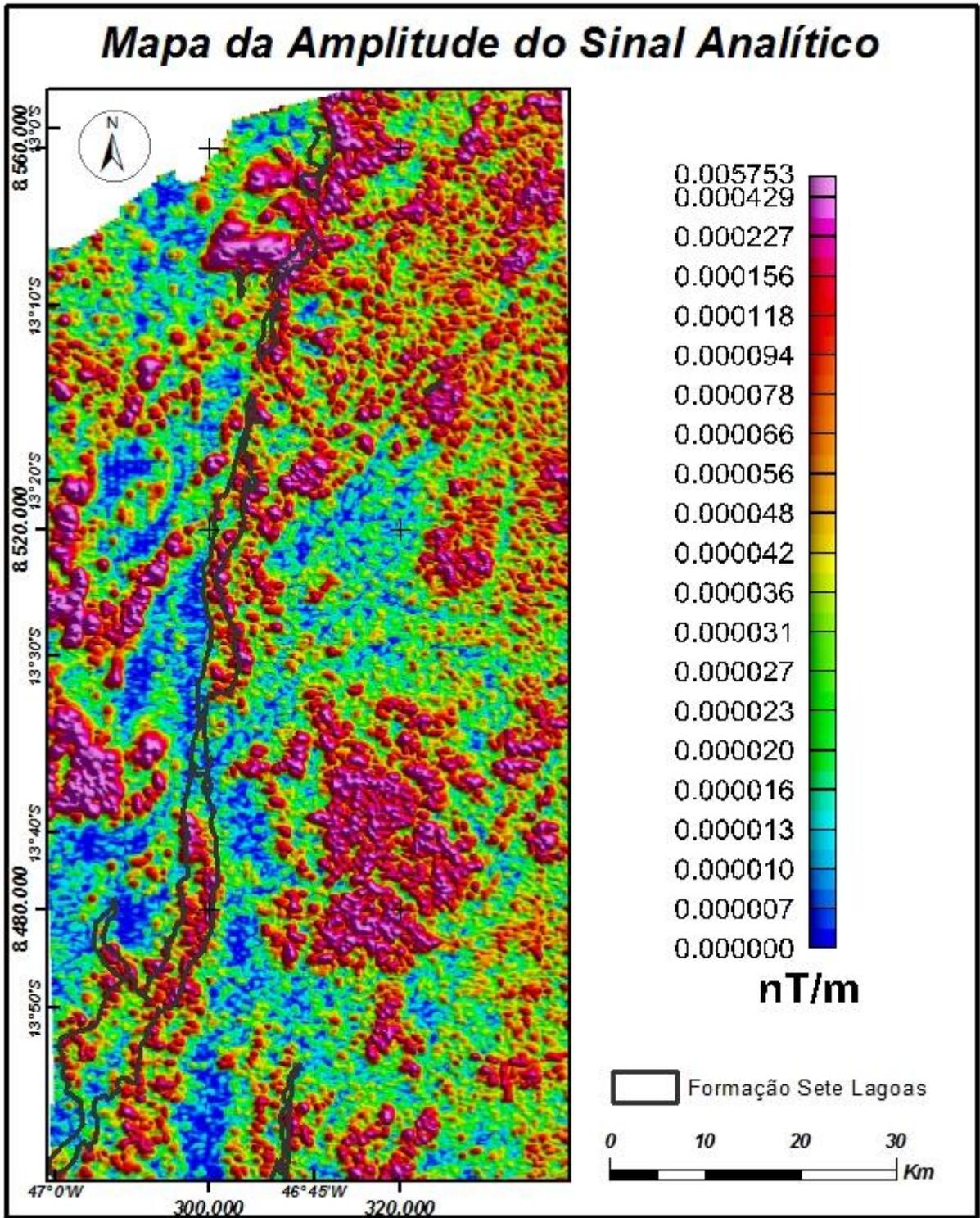


Fig. 9 – Imagem da amplitude do sinal analítico (ASA) com filtro passa alta.

6.4. Regressão múltipla

As técnicas de análise multivariável têm como objetivo central considerar diversas variáveis relacionadas simultaneamente (Davis, 1973). Na técnica de regressão múltipla qualquer variável pode ser considerada como função de qualquer outra variável. No estudo em pauta, investigou-se a relação linear simples da variável teor equivalente de urânio com as demais variáveis produzidas no aerolevante. Também, observou-se a regressão múltipla entre a variável teor equivalente de urânio e as demais variáveis gamaespectrométricas e a amplitude do sinal analítico. Como objetivo procurou-se modelar e remover os efeitos de processos geológicos dos diferentes litotipos, ou ainda realçar concentrações anômalas dos radioelementos. O modelo de regressão em cada um dos casos foi subtraído dos dados originais e os resíduos foram observados espacialmente (Pires, 1995; Wellman, 1998).

Foram gerados produtos como gráficos de dispersão do eTh, K e ASA em função do eU (Fig. 10, 11 e 12, respectivamente), permitindo assim analisar a correlação direta ou inversa destes elementos. Foram assim calculadas as retas de regressão destas correlações representadas pelas equações 1, 2 e 3. Estas retas são representadas em preto nas figuras 10, 11 e 12, respectivamente. Com base na análise dos gráficos de dispersão e suas respectivas retas de regressão, verificou-se que estas, embora registrassem a relação de dependência estatística do urânio com os demais parâmetros, tinham como valor de interseção das retas de regressão um baixo teor de urânio. Com isso, optou-se por deslocar paralelamente a reta de regressão de tal modo que o valor de urânio na interseção representasse sempre um teor mínimo de 2 ppm, correspondente a média da crosta terrestre (IAEA, 2003). As retas de regressão assim obtidas, definidas a partir das equações 4, 5 e 6; são representadas em azul nas figuras 10, 11 e 12, respectivamente. Estes resultados foram fundamentais na metodologia de estabelecer e definir concentrações anômalas de urânio na área independente do litotipo.

$$U = 0,915 + 0,074 * Th \quad (1)$$

$$Un = 2 + 0,074 * Th \quad (4)$$

$$U = 1,739 + 0,093 * K \quad (2)$$

$$Un = 2 + 0,093 * K \quad (5)$$

$$U = 2,004 - 35,223 * ASA \quad (3)$$

$$Un = 2 - 35,223 * ASA \quad (6)$$

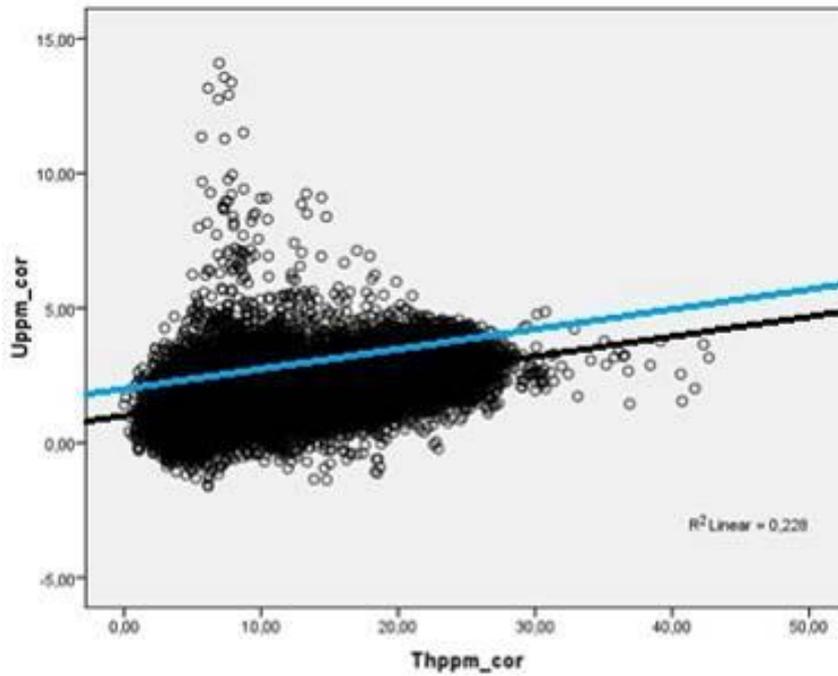


Fig. 10 – Gráfico da dispersão de tório em função do urânio e as retas de distribuição: em preto a reta original, e em azul a reta deslocada até 2 ppm.

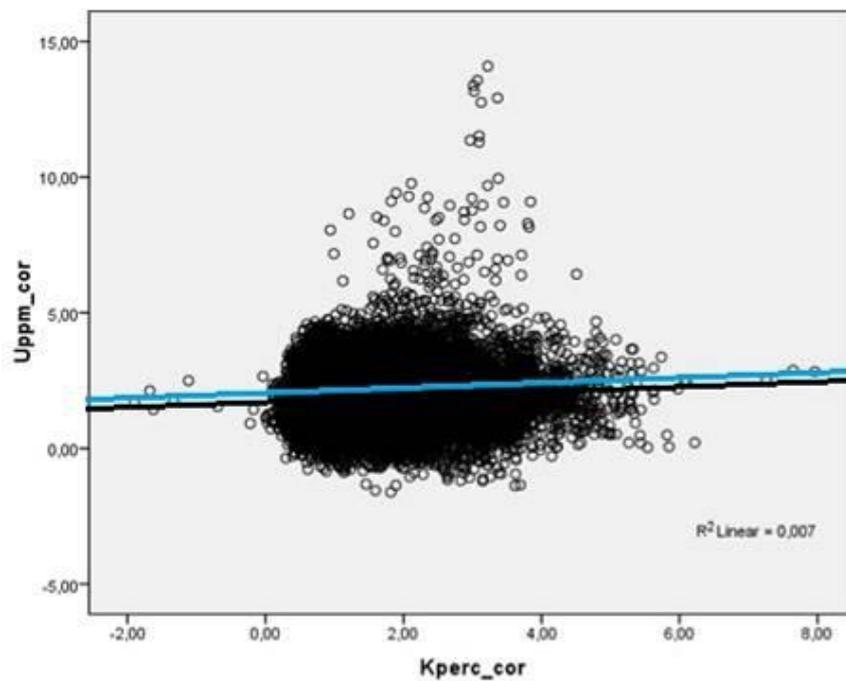


Fig. 11 – Gráfico da dispersão de potássio em função do urânio e as retas de regressão: em preto a reta original, e em azul a reta deslocada até 2 ppm.

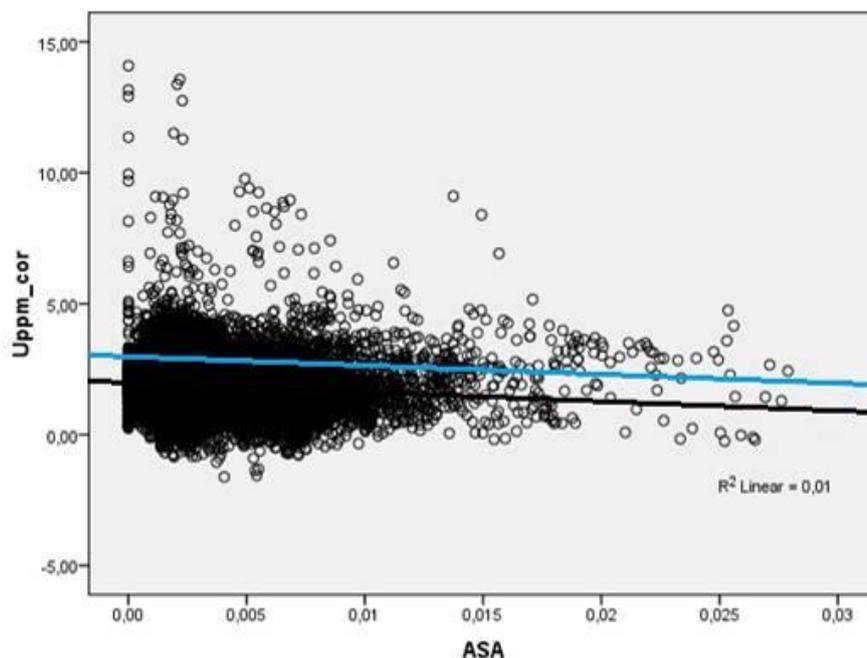


Fig. 12 – Gráfico da dispersão dos valores da amplitude do sinal analítico em função do urânio e as retas de regressão: em preto a reta original, e em azul a reta deslocada até 2 ppm.

A novas equações geradas foram aplicadas aos dados e gerados mapas com valores estimados de urânio (ppm) normalizados em relação ao K, eTh e ASA, para uma melhor visualização da anomalias deste elemento. A diferença destes para o mapa do urânio original apresenta novas áreas alvo com valores considerados anômalos de urânio.

Nos mapas de estimativa de urânio gerados (Fig. 13, 14 e 15), observa-se os valores acima da média em colorido. Os valores correspondentes ao valor da média mais dois desvios-padrão estão representados pela coloração magenta, no topo da legenda.

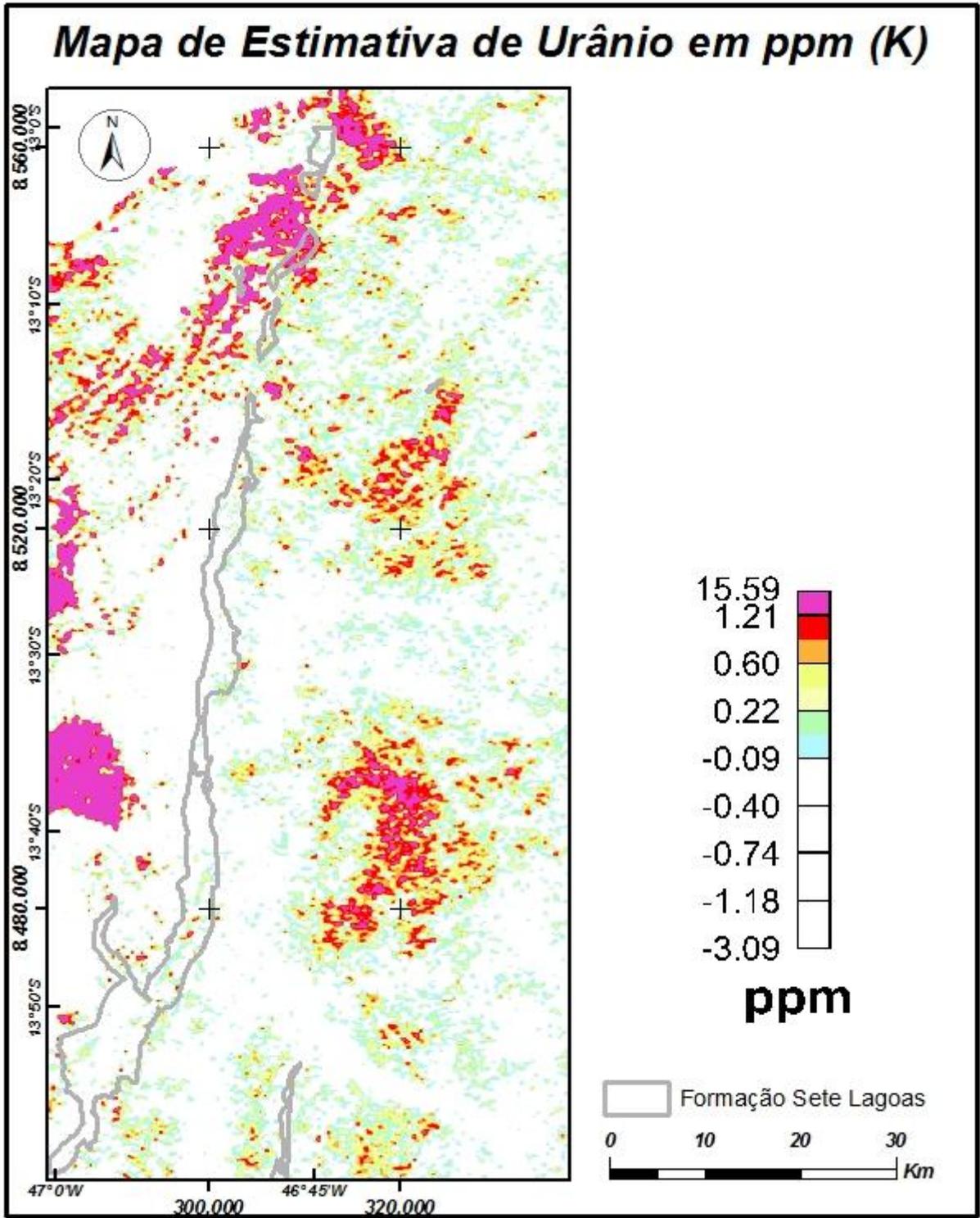


Fig. 13 – Mapa da estimativa U (ppm), calculado a partir da regressão linear com relação ao K.

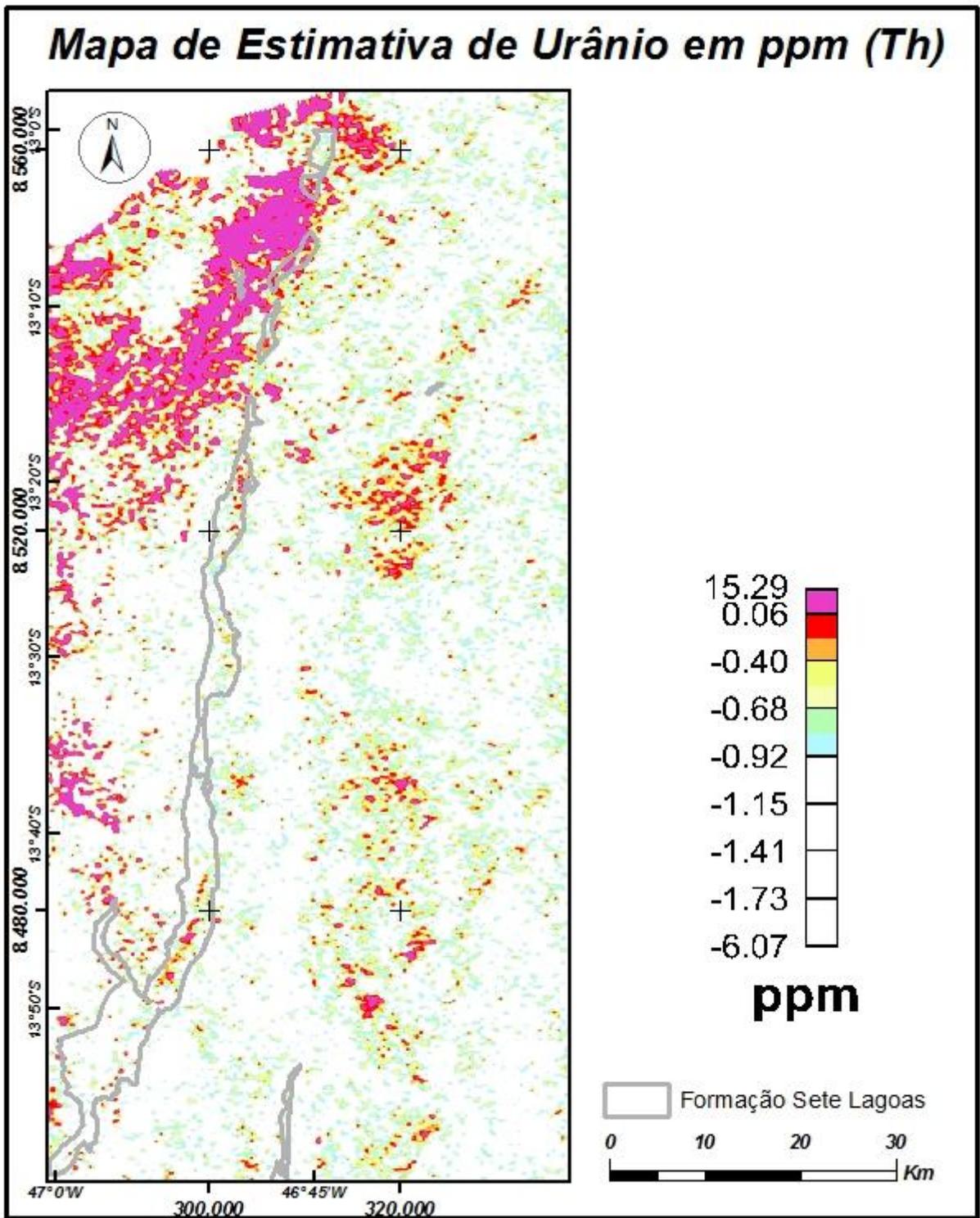


Fig. 14 –Mapa da estimativa de U (ppm), calculado a partir da regressão linear com relação ao Th.

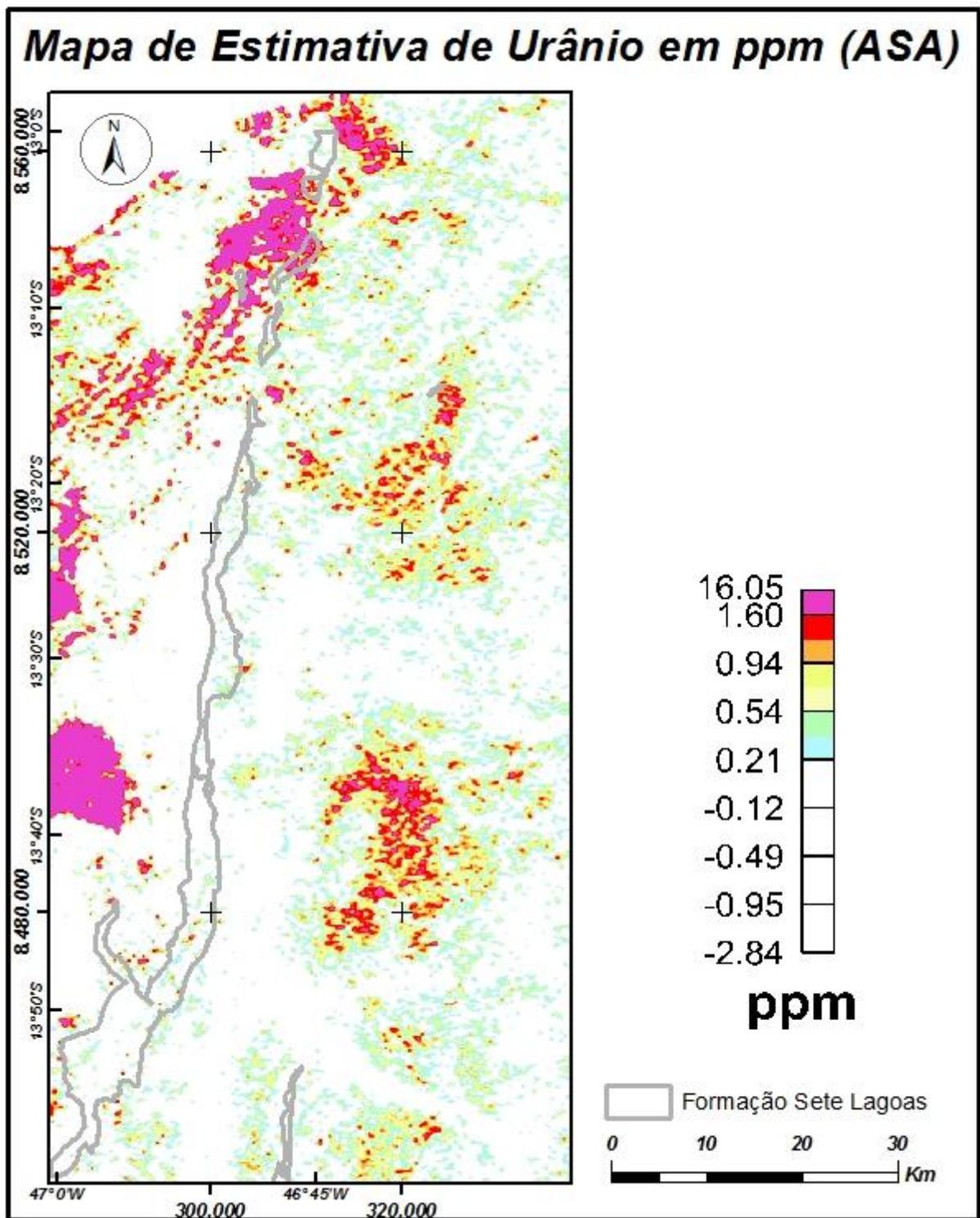


Fig. 15 –Mapa da estimativa de U (ppm), calculado a partir da regressão linear com relação ao ASA.

Após análise de cada uma das imagens do urânio anômalo, pode-se observar que o mapa de estimativa de urânio gerado em relação ao K (Fig. 13) apresenta um enriquecimento no

elemento principalmente na região do biotita granito, Suíte Pedra Branca, e nas regiões onde são encontradas as crostas lateríticas. O mapa da estimativa de urânio normalizado pelo eTh (Fig. 14) mostra que as principais regiões, onde ocorre o enriquecimento, estão localizadas na porção noroeste, região dominada por rochas do embasamento, como às da Fm. Ticunzal. A normalização a partir da imagem ASA (Fig. 15) evidencia o enriquecimento de urânio nas regiões correspondentes ao biotita granito, as porções de crosta laterítica e na região onde se localiza a Formação Ticunzal, com suas rochas metamórficas.

Mattoso & Formoso (2007) mostram que a assinatura geoquímica para os depósitos sedimentares químicos de fosfatos em pelitos, carbonatos e arenitos compreende os elementos P, N, F, C e U, podendo ocorrer a incorporação de outros elementos devido a fatores externos do ambiente geotectônico e das condições locais de formação do depósito.

Os dados de geoquímica utilizados neste trabalho foram retirados do SIG de Goiás, estes fazem parte do banco de dados de sedimentos ativos de corrente da CPRM e Nuclebrás (Moreira *et al.*, 2008). Cabe salientar que não temos controle sobre estes dados, uma vez que no banco de dados do SIG de Goiás não há informações sobre a proveniência destes dados, tais como data e metodologia de aquisição.

Procurou-se trabalhar também com as informações de geoquímica para a região, sendo feita a correlação dos elementos em relação ao fósforo (Tab. 1). Notou-se uma correlação muito alta entre este e os elementos metálicos, como a correlação entre o P e o F, da ordem de 80,1%, correlação esta esperada, uma vez que a apatita possui ambos os elementos em sua composição. Esta análise foi feita utilizando-se todos os dados do SIG de Goiás (Moreira *et al.*, 2008) para a área de estudo.

A partir da base de dados da geoquímica e dos produtos de geofísica aérea foi realizado um processamento utilizando metodologia de integração que analisa principalmente os elementos P e F. Para esta análise os valores foram normalizados para que a diferença de unidades de medida entre os diferentes elementos analisados não influencie o resultado.

A estatística dos dados geoquímicos para o fósforo forneceu valor médio de 196 ppm e de 208 ppm para o desvio padrão. A partir da aplicação da metodologia usual para este tipo de dado, definiu-se o teor médio como o background, o teor médio mais dois desvios padrões

como limiar e teores acima disto como teores possivelmente anômalos. No caso em pauta, teores de fósforo acima de 600 ppm foram considerados anômalos (Fig. 16).

Tab. 1 – Tabelas com as correlações entre o fósforo e os outros elementos analisados com os dados de geoquímica.

	P - Correlação Pearson	Número de amostras		P - Correlação Pearson	Número de amostras
Cu	,659**	1162	Mo	-,336**	1162
Pb	,592**	1162	Sn	-,120**	1162
Zn	,623**	1162	V	,357**	1162
Ni	,641**	1162	Ag	-,225**	1162
Co	,641**	1162	Zr	-,166**	1162
Cr	,598**	1162	Y	-,156**	1162
F	,801**	1162	La	-,274**	1162
Fe	,642**	1162	Sc	,328**	1162
Mn	,534**	1162	Sr	0,005	1162
Nb	-,396**	1162	Ga	,633**	1162
Ba	-,171**	1162	Ca	,233**	1162
B	-,307**	1162	Mg	,524**	1162
Bi	-,420**	1162	Ph	,586**	1162
Be	-,145**	1162	Au	.a	1162
Ti	,184**	1162	As	.a	1162

** - Correlação é significativa em 99% dos casos

* - Correlação é significativa em 95% dos casos

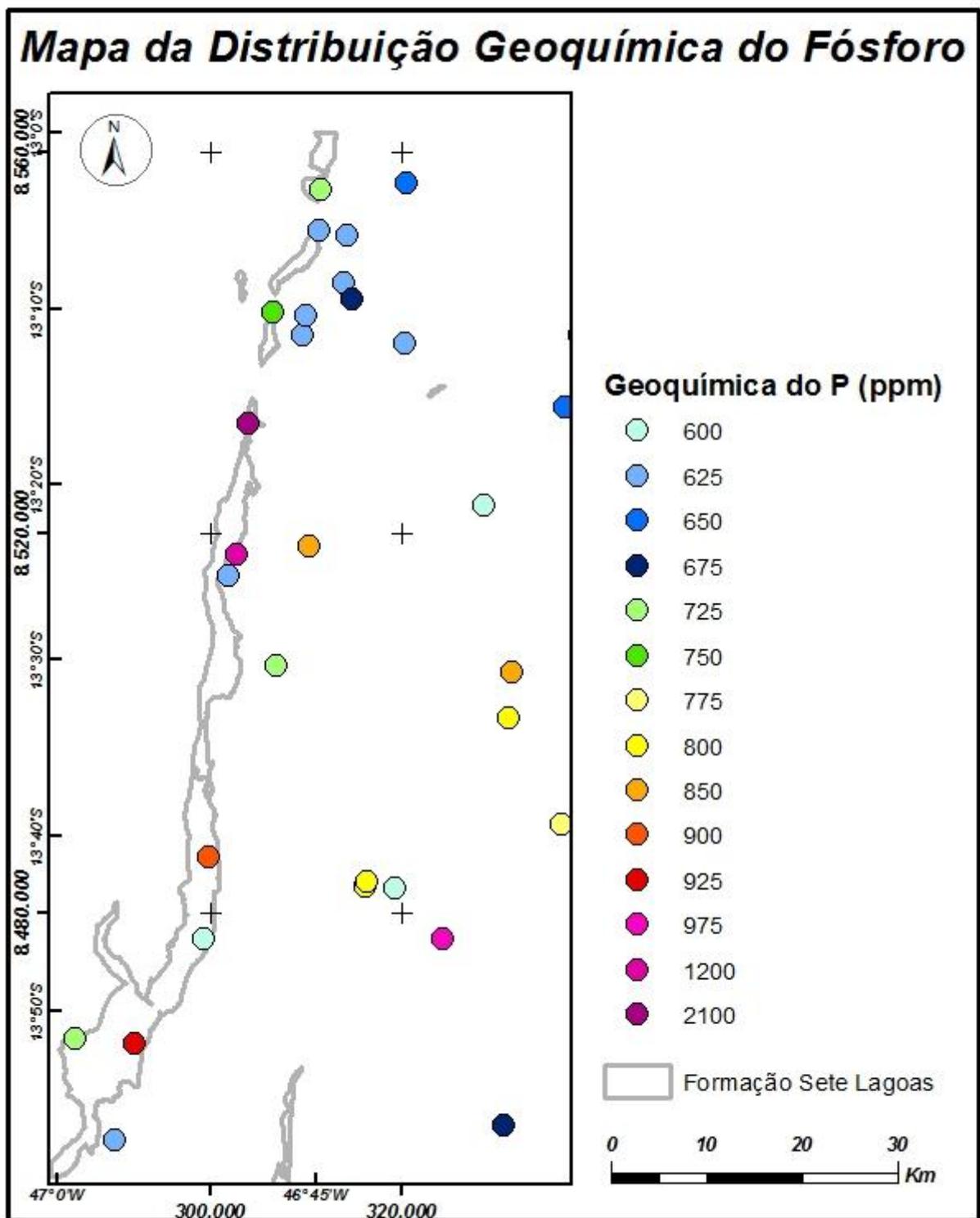


Fig. 16 – Mapa com a disposição dos pontos de sedimentação de corrente com valores acima de 600 ppm, o que equivale a média mais 2 desvios padrão.

Com base nestas informações, foram delimitadas pequenas áreas contendo os valores geoquímicos anômalos de fósforo, para as quais foram aplicadas técnicas de regressões

múltiplas, confrontando-se os comportamentos de fósforo e urânio em relação à geofísica (K, eTh, eU, eU/K, eU/eTh, eTh/K, ASA) e ao fluor.

As novas funções foram aplicadas em toda a área de estudo, dando origem a novos mapas de estimativa de urânio (Fig. 17) onde estariam representadas as regiões com mesma resposta geoquímica e geofísica que as áreas com elevado teor de P (com base nos pontos da geoquímica de sedimentos de corrente). Estes são mapas de estimativa de valores anômalos de urânio, em ppm.

Da mesma forma que nos mapas mostrados anteriormente, a palheta de cores da legenda do mapa foi elaborada com o objetivo de mostrar somente os valores acima da média. No mapa em questão, a cor magenta representa o valor da média mais dois desvios-padrão, o que é considerado anômalo neste trabalho. As regiões indicadas com urânio anômalo neste trabalho, figura 10, correspondem ao biotita granito e, na região nordeste, as rochas metamórficas do embasamento, representadas com valores acima de 2,46 ppm nas cores vermelho e magenta (Fig. 17).

Tendo em vista a alta correlação do fósforo com o fluor, tanto nos dados da área de estudo como na bibliografia, foram gerados produtos que correlacionam estas informações, a partir da aplicação da regressão correspondente aos elementos utilizados (K, Th, U/K, U/Th, Th/K, ASA, P e F). A figura 18 mostra a estimativa de fósforo em ppm, quando aplicada a equação de regressão do P com relação à U, K, Th, U/K, U/Th, Th/K e ASA. O mapa 19 mostra a estimativa de urânio em ppm, quando aplicada a equação de regressão do U com relação à K, Th, U, UK, UTh, ThK, ASA, P e F.

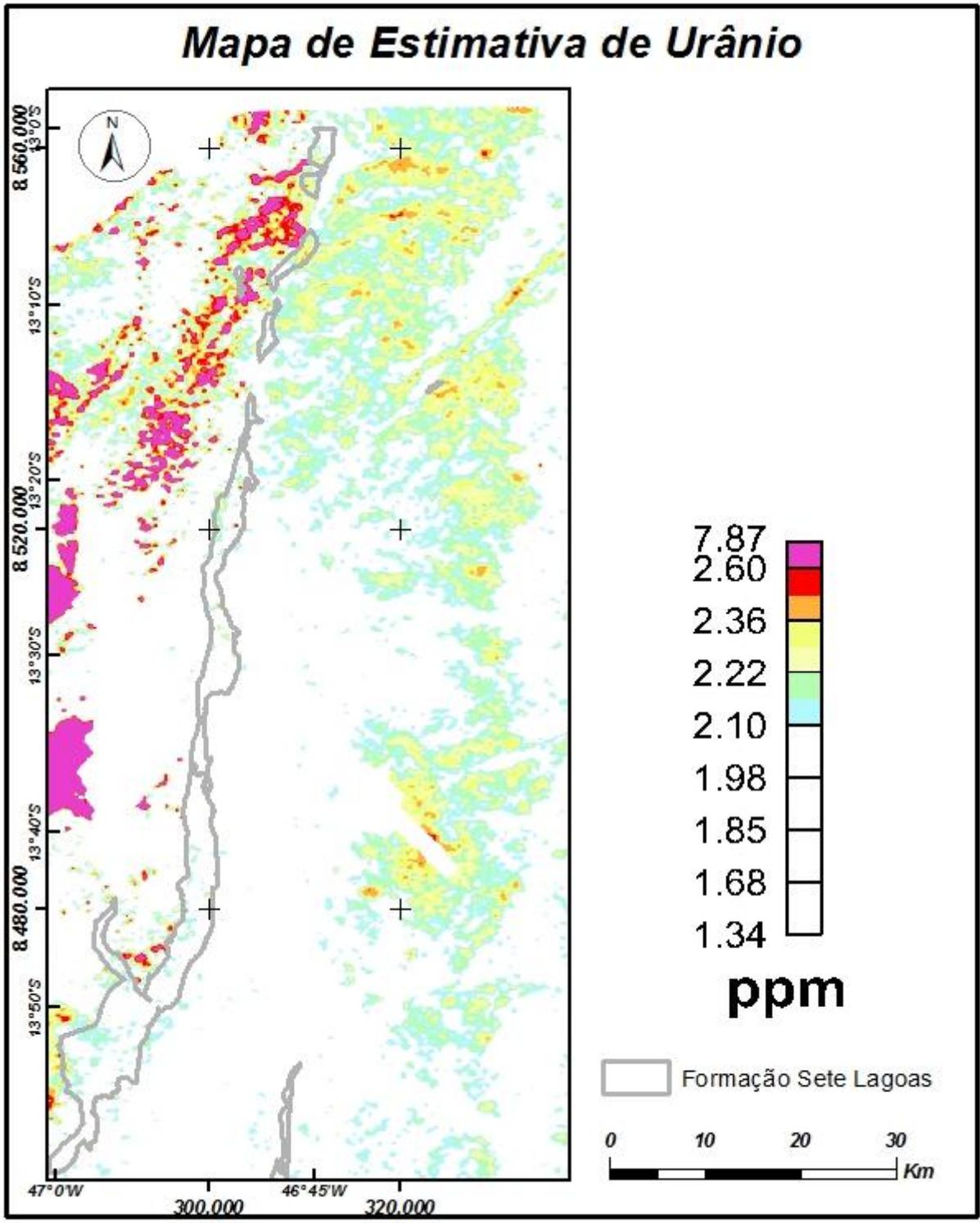


Fig. 17 – Mapa da estimativa de urânio em ppm, quando aplicada a equação de regressão do U com relação à Th, K, U/K, U/Th, Th/K e ASA.

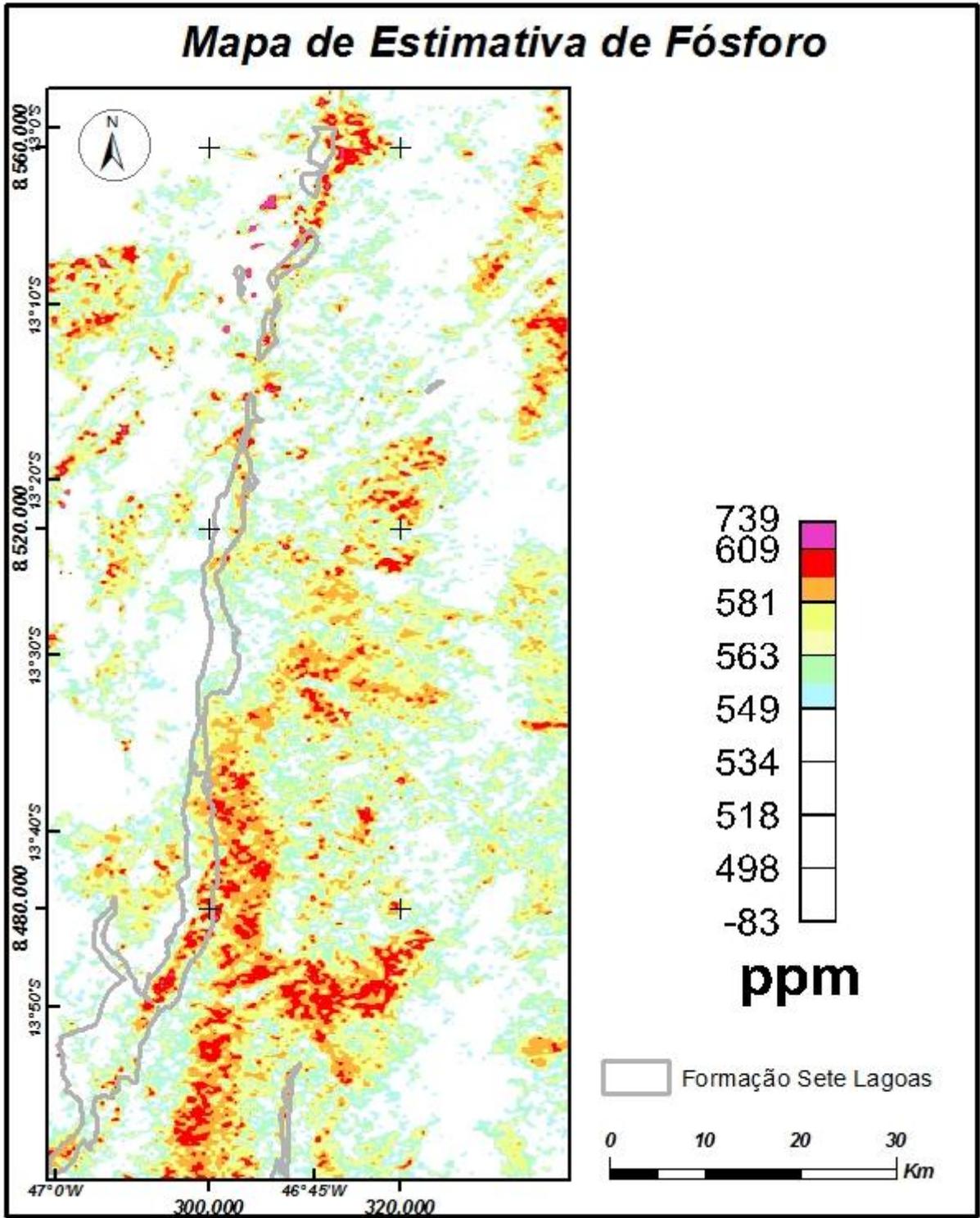


Fig. 18 – Mapa da estimativa de fósforo (ppm), quando aplicada a equação de regressão do P com relação aos elementos U, K, Th, U/K, U/Th, Th/K, ASA.

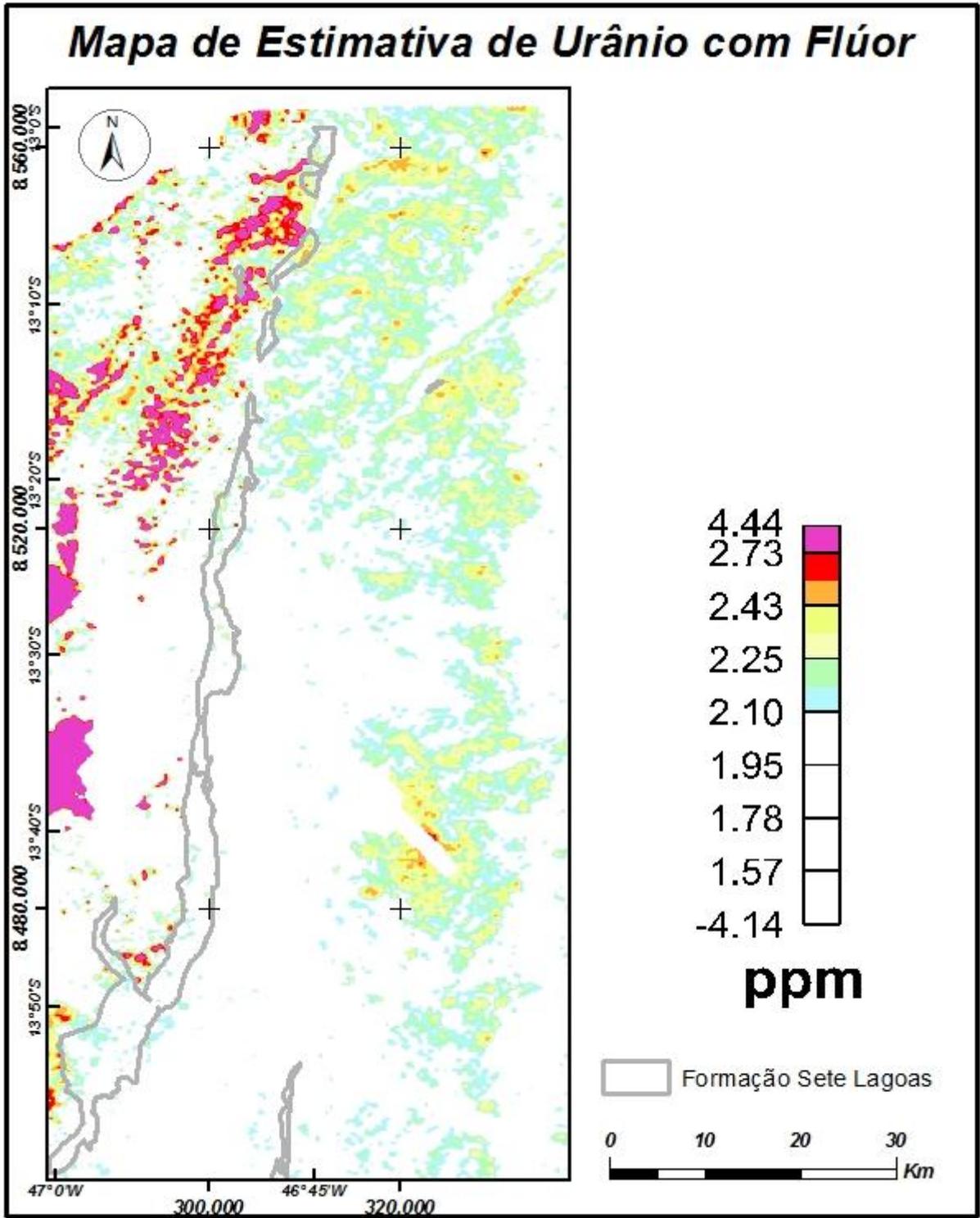


Fig. 19 – Mapa da estimativa de urânio em ppm, quando aplicada a equação de regressão do U com relação à K, Th, U, U/K, U/Th, Th/K, ASA, P e F.

6.5. Discussões e Conclusões

É possível observar uma semelhança muito grande entre os mapas de estimativa de U em ppm levando em consideração os elementos K, Th, U, U/K, U/Th, Th/K, ASA, P (Fig. 17) e, levando em consideração os mesmos elementos e incluindo o flúor durante o cálculo da regressão (Fig. 18). Analisando-se a estatística entre ambos os mapas nota-se que a diferença é da ordem de valores decimais.

Como podemos observar nas imagens geradas com os resultados das regressões, áreas que apresentam crosta laterítica e rochas ígneas são bem mapeadas pelos elevados valores dos radioelementos U e Th.

Pequenas anomalias de P e U foram identificadas nos sedimentos das formações Serra de Santa Helena e Sete Lagoas, Grupo Bambuí, que apresentam conhecidos corpos de rocha fosfática na área de estudo.

Após a análise das imagens geradas neste trabalho, principalmente das estimativas de urânio e fósforo, pode-se concluir que:

Retirando-se as áreas de interferência de altos valores de eU e eTh, como áreas de embasamento e crostas lateríticas, é possível mapear áreas enriquecidas em U e P, o que pode indicar novas áreas de prospecção de fosforitos; e

Foram selecionados quatro perfis (Fig. 20) para investigação com gamaespectrometria terrestre, considerando-se os resultados dos processamentos, imagens de estimativa de U e P, e a geologia conhecida para a região; e o quinto perfil selecionado na área da Mineração Itafós, onde existe um corpo fosforítico conhecido.

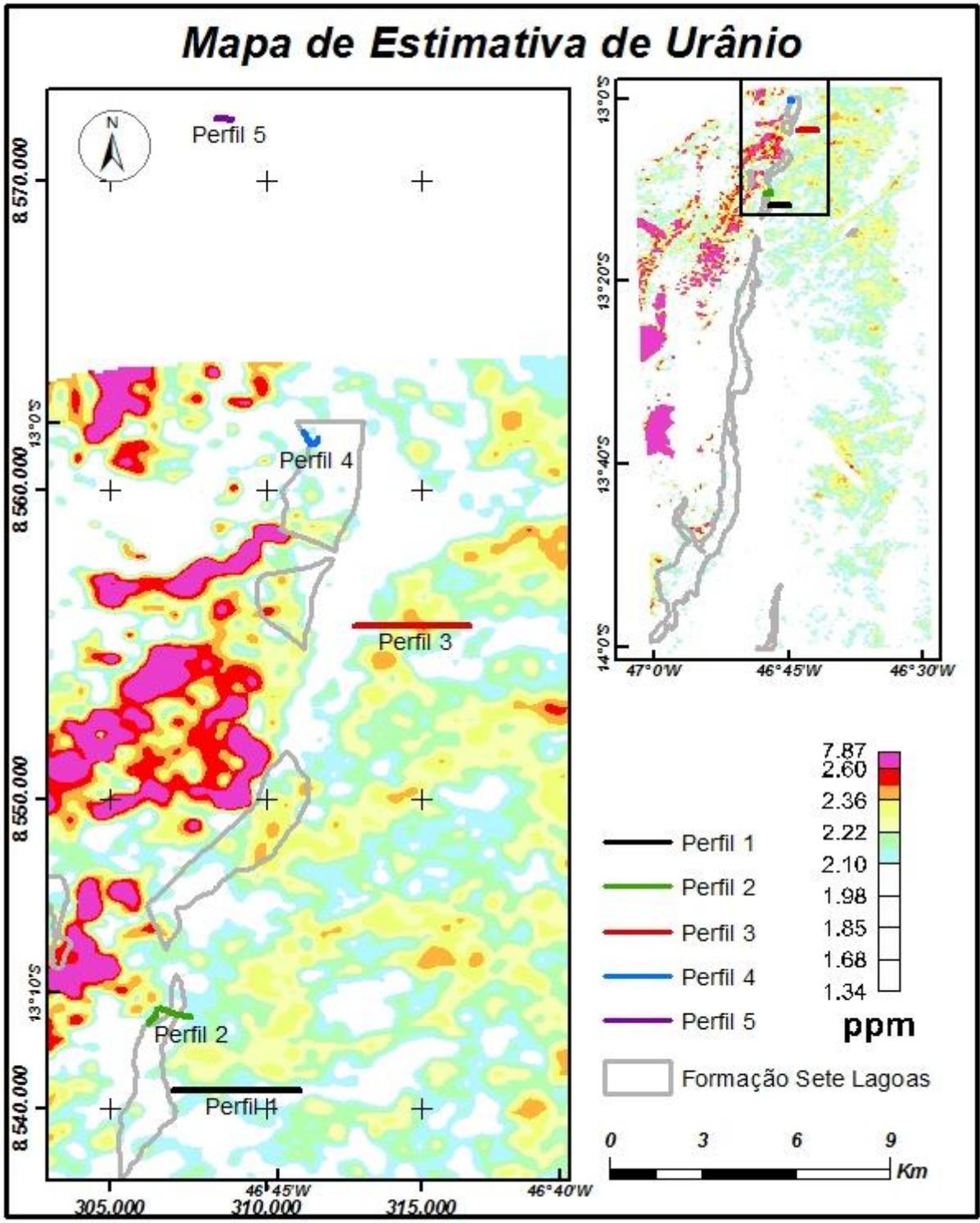


Fig. 20 – Detalhe do mapa de eU (ppm) (Fig. 10) e localização dos quatro perfis selecionados para “follow up” com gamaespectrometria terrestre.

6.6. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto de Geociências da Universidade de Brasília (IG/ UnB) por toda a infraestrutura e equipamentos cedidos, a Itafós Mineração Ltda pelo apoio na etapa de campo, pelas informações disponibilizadas e pela permissão para publicação destes dados, e a Superintendência de Geologia e Mineração do Governo do Estado de Goiás pela cessão dos dados aerogeofísicos da área 5.

6.7. Referências bibliográficas

- Dardenne, M. A. 1978. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. In. SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 30, Recife, Anais, 2: 597-610.
- Davis, J. C. 1973. Statistics and data analysis in geology. Copyright. Kansas Geological Survey. 550 p.
- Ferreira, C. J.; Moreira-Nordemann, L. M. e Nordemann, D. J. R. 1992. A radioatividade natural da região de Irecê, BA. Revista Brasileira de Geociências. 22 (2): 167-174.
- IAEA – International Atomic Energy Agency, 2003. Guideline for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data. Vienna, Austria.
- Lasa Engenharia e Prospecções, 2006. Levantamento Aerogeofísico do Estado de Goiás – 3ª Etapa. Relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos. Texto técnico. 138p.
- Mattoso, S. Q. & Formoso, M. L. L. 2007. Princípios Básicos para Prospecção Geoquímica. In: Licht, O. A. B., De Mello, C. S. B. e Da Silva, C. R (eds.) *Prospecção Geoquímica – Depósitos minerais metálicos, não-metálicos, óleo e gás*. CPRM. Editora Planeta Terra. p.97.
- Monteiro, C. 2009. Fosforitos do grupo Bambuí na Região de Campos belos (GO)/ Arraias (TO) na borda oeste do Cráton São Francisco. Tese de Mestrado no Programa de Geologia da Universidade de Brasília. 114 p.
- Moreira, M. L. O.; Moreton, L. C.; Araújo, V. A.; Lacerda, J. V. e Costa, H. F. 2008. Geologia do Estado de Goiás e Distrito Federal. Escala 1:500.000. Goiânia: CPRM/SIC – FUNMINERAL. 141p.
- Pires, A. C. B. 1995. Identificação Geofísica de Áreas de Alteração Hidrotermal, Crixás-Guarinos, Goiás. Revista Brasileira de Geociências, S. Paulo, 25 (1): 61-68.
- Pires, A. C. B.; Vidotti, R. M.; Carmelo, A. C. 2010. Realce de anomalias de urânio por regressões múltiplas em levantamento aerogeofísico no sudeste de Goiás. In. IV SimBGf, Simpósio Brasileiro de Geofísica, Brasília, Anais.

- Souza, A. E. & Cardoso, V. R. S. 2008. Sumário Mineral – DNPM, Fosfato. <http://www.dnpm.gov.br/assets/galeriaDocumento/SumarioMineral2008/fosfato.pdf> (16/11/09).
- Souza, A. E. & Fonseca, D. S. 2009. Economia Mineral do Brasil – 2009, fosfato. DNPM. https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=4003 (17/11/10).
- Wellman, P. 1998, Mapping of a granite batholiths using geological and remotely sensed data: the Mount Edgar Batholith, Pilbara Craton. *Exploration Geophysics*, 29: 643-648.

Prospecção de fosforitos utilizando gamaespectrometria terrestre no nordeste de Goiás

Abstract

The Bambuí Group, where the study area is located, has in its development as enabling environment for the formation of phosphate rocks, presenting itself as an area of economic interest. The use of gamma ray method aims at targeting for exploration of ore, since the apatite mineral phosphate generally has a high content of uranium. For this finality was made the acquisition of approximately 10 linear kilometers (527 stations) of ground gamma ray spectrometry data along five pre-selected profiles based on geophysical data, geochemical and geology information known. The analysis of the uranium, thorium and potash elements obtained and their ratios indicate that the enrichment of U relative to K is well mapped by the ratios U/Th and U/K, like was confirmed by check field.

Resumo

O Grupo Bambuí, onde se encontra inserida a área de trabalho, possui um ambiente favorável à formação de rochas fosfáticas, apresentando-se assim como uma região de interesse econômico. A utilização do método gamaespectrométrico tem como finalidade a seleção de alvos para prospecção do minério, uma vez que a apatita, mineral fosfático, geralmente apresenta um teor elevado de U. Para este fim foi realizada a aquisição de, aproximadamente, 10 km lineares, totalizando 527 estações de dados gamaespectrométricos terrestres ao longo de cinco perfis pré-selecionados com base em dados aerogeofísicos, informações de geoquímica e geologia de domínio público. A análise dos dados dos radioelementos obtidos e suas razões indicam que o enriquecimento de U em relação ao K, é bem mapeado pelas razões UTh e UK, o que foi confirmado em cheque de campo.

7.1. Introdução

Localizada no nordeste do Estado de Goiás e sudeste do Tocantins, a área de estudo encontra-se a cerca de 330 km de Brasília. Com uma extensão de aproximadamente 7.000 km², alongada na direção N-S, abrange municípios como Campos Belos, Monte Alegre de Goiás e Nova Roma em Goiás e Arraias no Tocantins.

A sedimentação do Grupo Bambuí, na Faixa Brasília, teve início com os diamictitos durante um período glacial. O derretimento das camadas de gelo permitiu a instalação de um ambiente marinho epicontinental, e iniciou-se a deposição de sedimentos pelito-carbonatados que se sobrepõe ao Cráton São Francisco. O ambiente criado em função da deglaciação estabeleceu também as condições climáticas necessárias para a deposição dos sedimentos fosfáticos na região (Dardenne, 1978).

A geologia utilizada no trabalho (Fig. 1) é resultado do levantamento geológico das folhas Monte Alegre de Goiás, Nova Roma e Cavalcante, em escala 1:100.000, realizado pelo programa Geologia do Brasil (PGB/PGL) do Serviço Geológico do Brasil (CPRM) em 2006 (Moreira *et al.*, 2008). Uma característica marcante que pode ser observada na área é a diferenciação de rochas de origem ígnea (embasamento) na porção oeste, e de rochas de origem sedimentar na porção leste da área.

Na área de estudos a cobertura vegetal é pouco densa, podendo esta ser percorrida sem maiores dificuldades; o clima semiárido é responsável pela existência de um manto de alteração pouco espesso e descontínuo, que favorece a ocorrência de afloramentos rochosos. Ferreira *et al.* (1992) relataram que rochas calcárias geralmente apresentam baixos teores de elementos radioativos. Isto permitiria um contraste das rochas mineralizadas na região, uma vez que a apatita geralmente possui um teor elevado de U e Th e, a rocha encaixante normalmente é o calcário.

Alguns estudos realizados na Síria (*e.g.* Ashfahani, 2002) mostraram que a gamaespectrometria é uma ótima ferramenta para a prospecção de fosfato, visto que a interpretação radiométrica dos levantamentos realizados em furos de sondagem mostraram uma boa correlação entre o conteúdo de U e P₂O₅. Outro resultado obtido pelo mesmo

autor foi a intensidade de radioatividade nas camadas de fosforitos que variaram entre 130 e 383 cps, com média em 270 cps e desvio padrão de 57 cps.

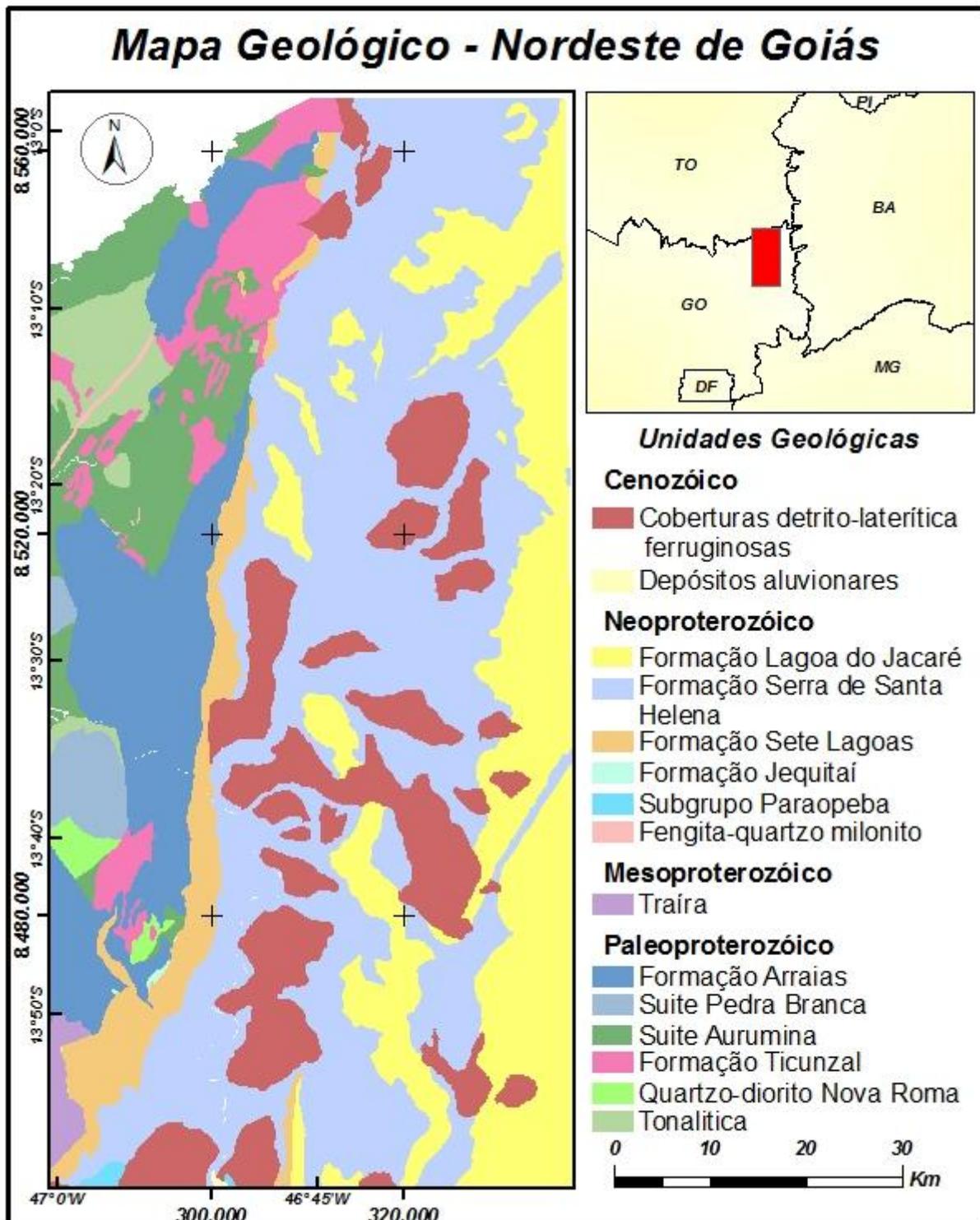


Fig. 1 – Mapa da geologia da área de estudos (modificado de Moreira *et al.*, 2008).

Na Arábia Saudita, depósito de Al-Jalamid, Wynn (1996) conseguiu estabelecer relação de contagem de raios gama e teor de fosfato, fornecendo uma resposta rápida em profundidade da avaliação dos recursos de fosfato.

Durante o período de 04 a 21 de maio de 2010 foi realizada a aquisição de dados de geofísica terrestre, utilizando o método gamaespectrométrico, onde foram medidos os teores médios dos elementos K, Th, U e contagem total.

O levantamento foi realizado em perfis pré-selecionados com base nos resultados obtidos para mapeamento das áreas anômalas de fósforo (Fig. 2a) e urânio (Fig. 3 e 2b – este levando em consideração a presença do flúor), a partir dos resultados obtidos com o processamento de dados públicos de geofísica aérea, geoquímica de sedimento de corrente e geologia da região (Fianco *et al.*, 2010a; Fianco *et al.*, 2010b).

Os cinco perfis (Fig. 3) selecionados e executados obedeceram a diferentes padrões de escolha, sendo o primeiro deles traçado em função das anomalias de urânio, flúor e fósforo mapeados como base no processamento de regressão múltipla de dados de aerogeofísica e geoquímica (Fianco *et al.* 2010), apesar de existir apenas uma litologia mapeada; o segundo, assim como no primeiro caso, apresentou feições anômalas de urânio, flúor e fósforo, porém apresentando diferentes litologias ao longo do perfil; o terceiro perfil, de acordo com mapeamento geológico realizado pela empresa Itafós Mineração, apresenta como litologia apenas siltito, contudo apresenta anomalias nos mapas de urânio e flúor estimado; o quarto perfil traçado sobre siltito foi selecionado com base na assinatura anômala de flúor e fósforo, não apresentando nenhuma feição anômala em urânio; o quinto perfil foi executado em uma área próxima a mina (no estado do Tocantins), sobre siltito e fosforito mapeado pela Itafós, em uma linha onde já existiam informações de geoquímica, esta última região não é recoberta pelos dados aerogeofísicos utilizados para gerar o mapa apresentado na figura 3.

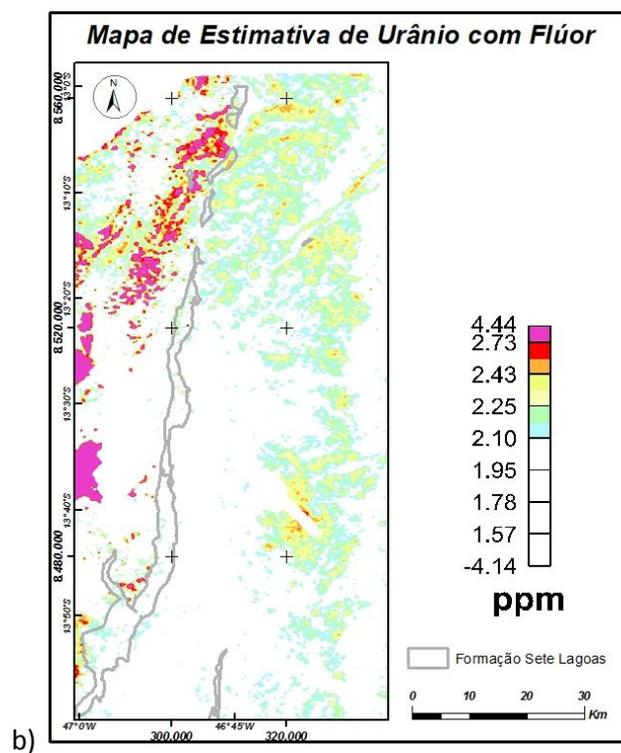
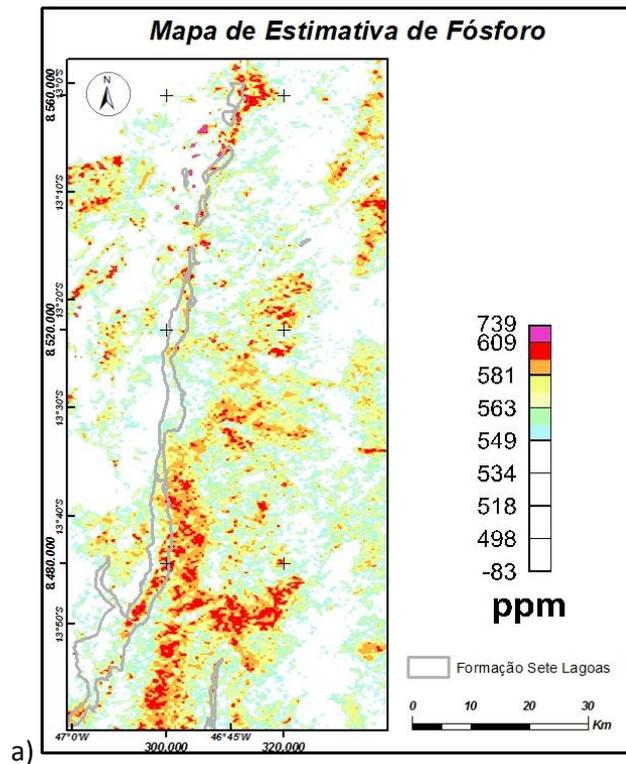


Fig. 2 – a) Mapa da estimativa de fósforo em ppm, quando aplicada a equação de regressão do P com relação à U, K, Th, UK, UTh, ThK, ASA. b) Mapa da estimativa de urânio em ppm, quando aplicada a equação de regressão do U com relação à K, Th, U, UK, UTh, ThK, ASA, P e F.

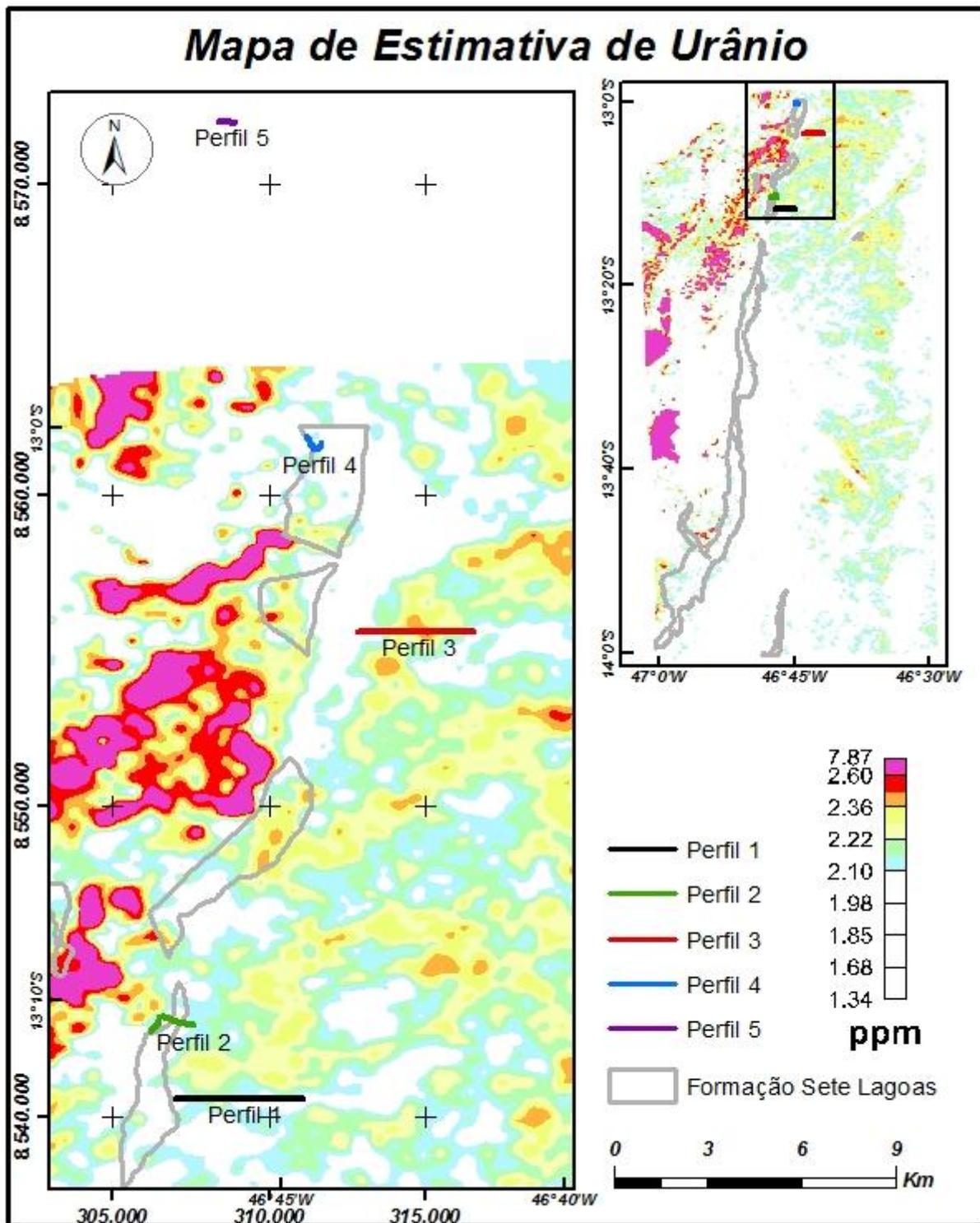


Fig. 3 – Mapa de urânio estimado e localização dos 5 perfis de gamaespectrometria terrestre.

7.2. Aquisição de dados

O gamaespectrômetro utilizado durante o levantamento foi o modelo GR-320, com um detector de iodeto de sódio ativado com tálio (NaI(Tl)) com dimensões de 75 mm de diâmetro por 75 mm de espessura. A resolução é de 256 canais, e apresenta uma fonte interna de céσιο na base do detector para estabilização do sistema (Exploranium, 2007).

Foram executados no total aproximadamente 10.712 metros de levantamento, com estações de amostragem a cada 20 metros de espaçamento, totalizando 527 estações no total (Tab. 1). Em cada estação o tempo de leitura pelo espectrômetro foi de 300 segundos, este tempo de leitura tem como base a recomendação do guia de mapeamento radiométrico (IAEA, 2003).

Tab. 1 – Informações sobre os perfis de dados terrestre tais como: extensão e o número de estações executadas em cada um deles.

Perfil / Bloco	Total (m)	Numero de estações
Perfil 1 / Leste	3.885	197
Perfil 2 / Lucia	1.688	82
Perfil 3 / Cabeçudo	3.709	179
Perfil 4 / Avião	850	41
Perfil 5 / Coité	580	28
Total	10.712	527

Levando-se em consideração que teores dos radioelementos podem ser susceptíveis a efeitos ambientais, pedogenéticos, geomorfológicos, geoquímicos e variações litológicas (e.g. Dickson & Scott, 1997), tomou-se o cuidado para evitar época de chuva, regiões próximas a drenagens e manter sempre a mesma distância entre o equipamento e o terreno.

Conforme informações verbais fornecidas pelos geólogos da Mineração Itafós, os corpos mineralizados na região apresentam, em geral, extensões de até 100 metros e largura de 40 metros e possuem direção preferencial NW-SE. Para garantir ao menos 1 ponto de amostragem sobre a mineralização, o espaçamento entre as estações foi definido com 20 metros, garantindo também uma boa distribuição espacial dos dados.

7.3. Análise dos dados

Os resultados da aquisição de dados de geofísica terrestre de gamaespectrometria serão apresentados e discutidos a seguir. Serão apresentados os perfis dos radioelementos U e Th em ppm e K em porcentagem, da contagem total em cps e as razões U/K e U/Th. As razões foram calculadas após analisar-se a correlação entre os perfis de cada elemento, onde se observou uma correlação inversa entre os dados de potássio e urânio.

Perfil 1

Localizado no Bloco Leste, o perfil 1 possui 3.885 metros de extensão e direção E-W localizado na porção centro sul da figura 3. Este perfil foi traçado nesta área em função das anomalias de U, F e P mapeados com o processamento dos dados aéreos e integração com geoquímica de sedimento de corrente. Além disso, existe um ponto de análise geoquímica de sedimento de corrente próximo deste perfil com valor de P superior a 600 ppm (Moreira *et al.*, 2008). Ao longo de quase toda a linha a variação topográfica é pequena e a vegetação quase exclusivamente pasto. Na extremidade leste da linha, o perfil atravessou um pequeno córrego. Este perfil não apresenta mineralização conhecida.

A litologia predominante ao longo do perfil é siltito, ocorrendo porém no início deste, blocos de calcário e ao longo do mesmo, trechos com feições de laterização. Cabe salientar aqui a existência de um córrego (indicado pela seta azul, Fig. 4a).

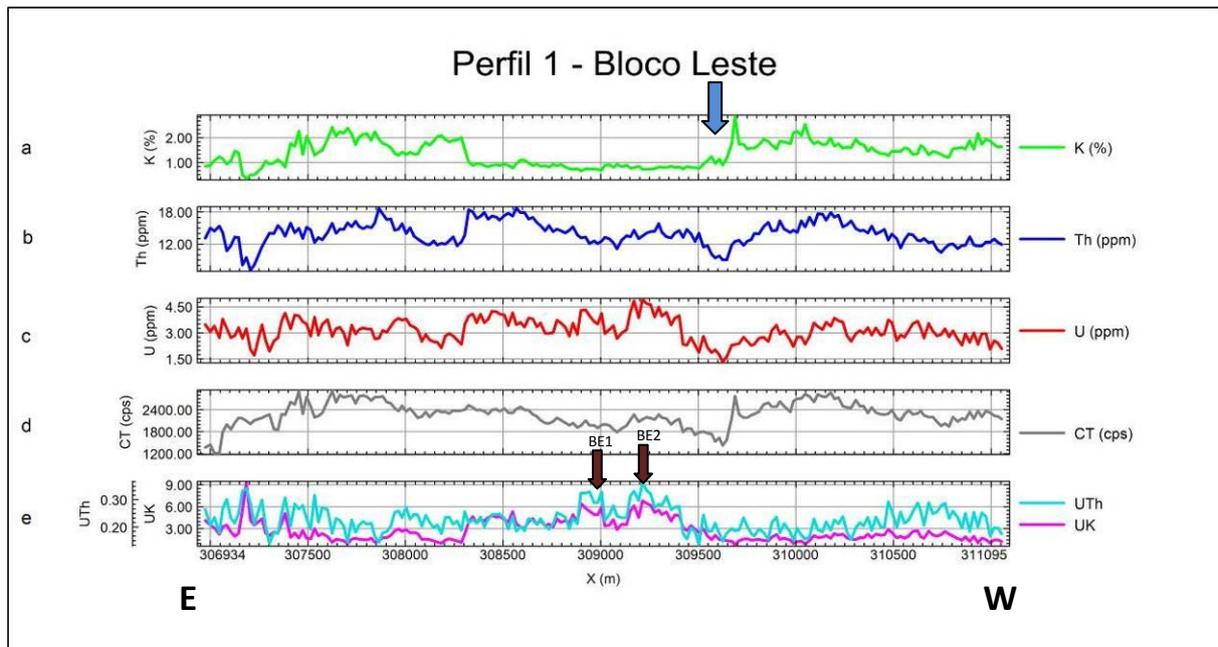


Fig. 4 – Perfis dos valores dos radioelementos K (a), Th (b), U (c) e a contagem total (d) adquiridos neste trabalho, e as razões U/Th e U/K (e) para o Perfil 1 do Bloco Leste. A seta azul indica a localização do córrego, e as setas marrons regiões anômalas (BE1 e BE2).

A figura 4 apresenta os dados pós-processados dos radioelementos U, Th e K; A contagem total (cps), e; as razões U/Th e U/K.

O perfil do K (Fig. 4a) apresenta uma feição bastante evidente na porção central, uma região aplainada com valores em torno de 1 % bordejada abruptamente por valores mais elevados do elemento. Nas outras regiões as concentrações de K variam entre 1 e 3 por cento, valores estes em torno do valor médio de K na crosta (2,5%), sendo que no início do perfil (oeste) os valores são mais baixos.

O perfil do Th (Fig. 4b) apresenta um padrão irregular, com as concentrações variando entre 8 e 18 ppm, e, de maneira geral, com valores acima do valor médio de Th na crosta (8-12 ppm). O perfil do U (Fig. 4c), também apresenta um padrão irregular, com valores do radioelemento variando entre 1 e 4 ppm. Na região central, contudo, pode-se observar dois picos sutis de enriquecimento deste elemento. Nestes dois perfis pode-se observar melhor as regiões alagadas, uma vez que os valores dos elementos decaem significativamente.

O perfil da contagem total apresenta dois baixos significativos na concentração dos radioelementos (Fig. 4d), a primeira a oeste do perfil onde existe a ocorrência de calcários e a segunda nas proximidades da coordenada leste 309500, onde existe um córrego.

Nos perfis das razões U/K e U/Th (Fig. 4e) é possível identificar dois picos principais, indicados pelas setas BE1 e BE2 nos quais os teores de urânio em relação ao Th e ao K são elevados. Estes pontos foram selecionados para cheque de campo.

Apesar de ter sido mapeada apenas uma litologia ao longo de quase todo o perfil, a exceção do calcário no início da linha, observa-se grandes variações na concentração dos elementos ao longo do mesmo, como a região onde o K (Fig. 4a) apresenta valores baixos, correlacionado a dois picos de valores de U (Fig. 4c). Os dois altos assinalados no perfil das razões (BE1 e BE2) poderiam ser eventualmente explicados pela presença de concreções lateríticas encontradas nesta região.

Perfil 2

Localizado no Bloco Lúcia, o perfil 2 apresenta 1.688 m de extensão e foi traçado por cortar diferentes litologias, inclusive um fosforito mapeado pela Itafós. Esta área não apresenta nenhum ponto com geoquímica de P anômalo, contudo, através do processamento utilizando o método de regressões múltiplas, onde foram integradas informações de geofísica e geoquímica, foram mapeadas feições anômalas em U, F e P, estas cortadas pelo perfil. A princípio o perfil seria uma linha retilínea E-W, porém devido a falta de autorização para a abertura de picadas pelo proprietário da terra, o traçado da linha foi modificado (perfil azul na Fig. 3).

A geologia ao longo deste perfil apresenta variações, passando de solo silto-argiloso, por uma zona de falha com xisto e seixos de quartzo, seguida por siltito. Existe ainda, mapeado pela Itafós na área, afloramentos de fosforito, o qual aparentemente é interceptado pelo perfil em duas regiões.

A figura 5 apresenta os dados pós-processados dos radioelementos U, Th e K; a contagem total (cps), e as razões U/Th e U/K para o perfil 2.

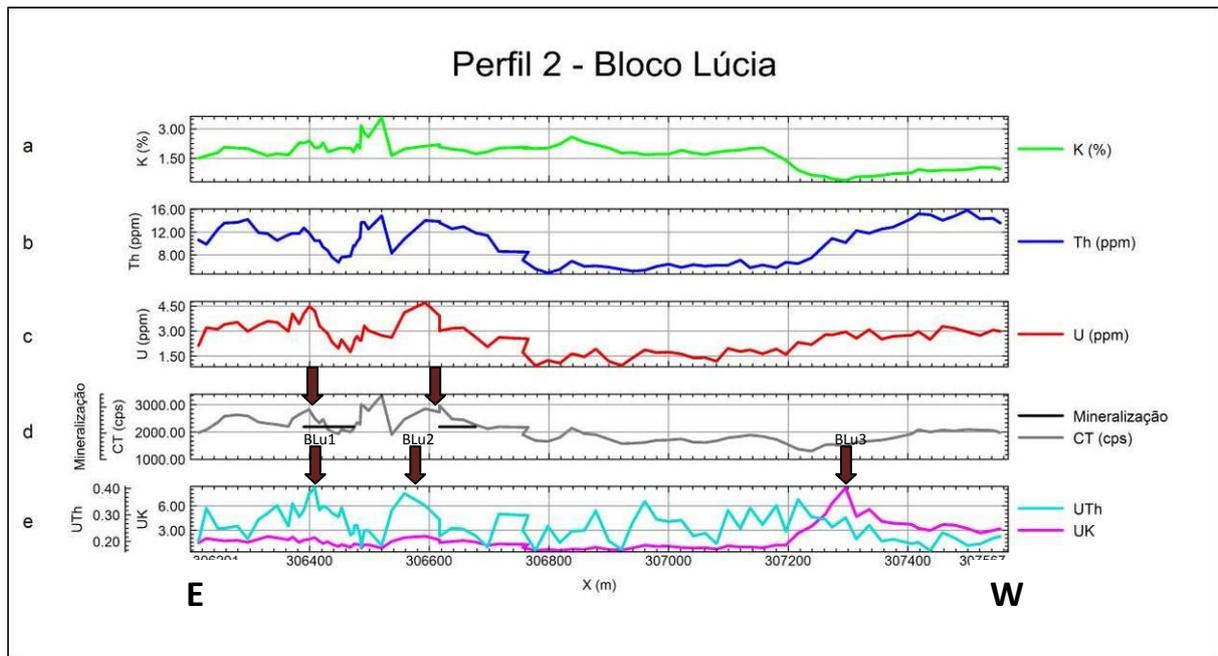


Fig. 5 – Perfis dos valores dos radioelementos K (a), Th (b), U (c) e a contagem total (d) coletados no campo, e as razões U/Th e U/K (e) para o Perfil 2 do Bloco Lúcia. As setas marrons indicam regiões anômalas (BLu1, BLu2 e BLu3).

O perfil do radioelemento K (Fig. 5a), apresenta valores médios em torno de 1,5 a 2 por cento, abaixo da média da crosta (2,5%). Contudo, pode-se observar em torno da coordenada leste 306500m, um pico de concentração do elemento que chega a quase 4 %. Nos últimos 300 metros do perfil nota-se também uma queda significativa nos valores de K.

A variação de valores de tório é significativa ao longo de todo o perfil (Fig. 5b), entre 4 e 16 ppm. No início do perfil os valores são mais expressivos, destacando-se um pico bem marcado com concentração em torno de 15 ppm do elemento, acima da média da crosta (8-12 ppm). Depois deste trecho, ocorre uma queda na concentração do Th ao longo de quase 400 metros de extensão, sendo que os valores encontrados aqui apresentam uma média de 5 ppm. Na parte final do perfil os teores voltam a subir consideravelmente, atingindo novamente valores de até 16 ppm.

O perfil do urânio (Fig. 5c) apresenta um padrão parecido com o perfil do tório (Fig. 5b) onde o valor médio do primeiro trecho da linha é mais elevado (3ppm), sofrendo uma queda na porção central e um ligeiro aumento na parte final da linha. Na parte inicial ainda, destacam-

se dois picos mais evidentes com maiores concentrações de urânio, atingindo valores relativamente elevados de até 4,5 ppm.

O perfil da contagem total (Fig. 5d) mostra um comportamento mais regular, com variações menos significativas, porém não menos importantes. A primeira metade do perfil 2d (Fig. 5) apresenta pelo menos 3 picos importantes, sendo o pico central o mais evidente, e os laterais (indicados pelas setas marrons) com importância relevante, considerando a presença dos corpos mineralizados mapeados pela Itafós assinalados no perfil da contagem total (CT) com traços pretos. A segunda metade apresenta um comportamento mais constante, não apresentando feições importantes.

O perfil da razão U/Th (Fig. 5e) apresenta um comportamento regular com um pico bastante evidente no último quarto da linha, indicado pela seta BLu3 (Fig. 5e). O perfil da razão U/K (Fig. 5e) apresenta um padrão irregular, com vários altos e baixos, pode-se observar dois picos neste perfil, identificados pelas setas BLu1 e BLu2 (Fig. 5e) coincidentes com as regiões mineralizadas. Estes pontos são indicados para de cheque de campo.

Analisando especialmente os dois trechos onde ocorrem as mineralizações mapeadas na área e os perfis dos radioelementos, pode-se verificar que existe um deslocamento de alguns metros entre a mineralização (traços pretos no perfil da CT) e os picos de urânio (Fig. 5c) com mais de 3 ppm, e que nestas mesmas regiões o perfil da razão U/Th (Fig. 5e) também apresenta valores relativamente elevados de U e Th. O pico evidenciado no perfil da razão UK (Fig. 5e), e denominado BLu3 (Fig. 5e), merce uma investigação mais detalhada. Partindo do princípio e análise de outros perfis como os blocos Lúcia e Coité, nos quais os corpos mineralizados apresentam respostas das razões U/Th e U/K com valores elevados.

Perfil 3

Localizado no Bloco Cabeçudo, o perfil 3 possui 3.709 m de extensão com direção E-W, cortando duas litologias distintas de acordo com o SIG de Goiás (Moreira *et al.*, 2008), porém de acordo com o mapeamento realizado pela Itafós, esta região apresenta apenas silito. Este perfil atravessa anomalias de U e F bastante evidentes nos mapas destas unidades, e não possui nenhuma anomalia de fósforo relacionada (perfil magenta na Fig. 3). O perfil está

localizado quase exclusivamente em área de pastagem, cruzando um brejo no final da linha, a leste.

A geologia ao longo deste perfil apresenta-se bastante monótona, com litologia predominantemente siltosa, ocorrendo apenas pequenas variações composicionais e de coloração. A topografia não varia muito ao longo do perfil, e a vegetação é variada; pasto, áreas desmatadas, e floresta.

A figura 6 apresenta os dados pós-processados dos radioelementos U, Th e K; a contagem total (cps), e; as razões U/Th e U/K.

O perfil do K (Fig. 6a) apresenta nesta linha um comportamento com baixa concentração do elemento no início, elevando este teor para em torno de 0,8 %, e com alguns picos chegando a 1,6%, como ocorre no centro e no final do perfil, todos os valores estão abaixo da concentração média deste elemento na crosta (2,5%). Na região indicada pela seta azul os teores decaem abruptamente, representando bem a presença de água.

Os valores de Th não apresentam variações significativas ao longo de todo o perfil 3 (Fig. 6b), a exceção da região mapeada com a presença de uma área de brejo (indicada pela seta azul), onde os valores decaem de 10 ppm para quase 0 ppm. Os teores médios de Th ao longo do perfil estão em torno de 15 ppm, portanto acima dos valores médios deste elemento na crosta (8-12 ppm).

O perfil do K (Fig. 6a) apresenta nesta linha um comportamento com baixa concentração do elemento no início, elevando este teor para em torno de 0,8 %, e com alguns picos chegando a 1,6%, como ocorre no centro e no final do perfil, todos os valores estão abaixo da concentração média deste elemento na crosta (2,5%). Na região indicada pela seta azul os teores decaem abruptamente, representando bem a presença de água.

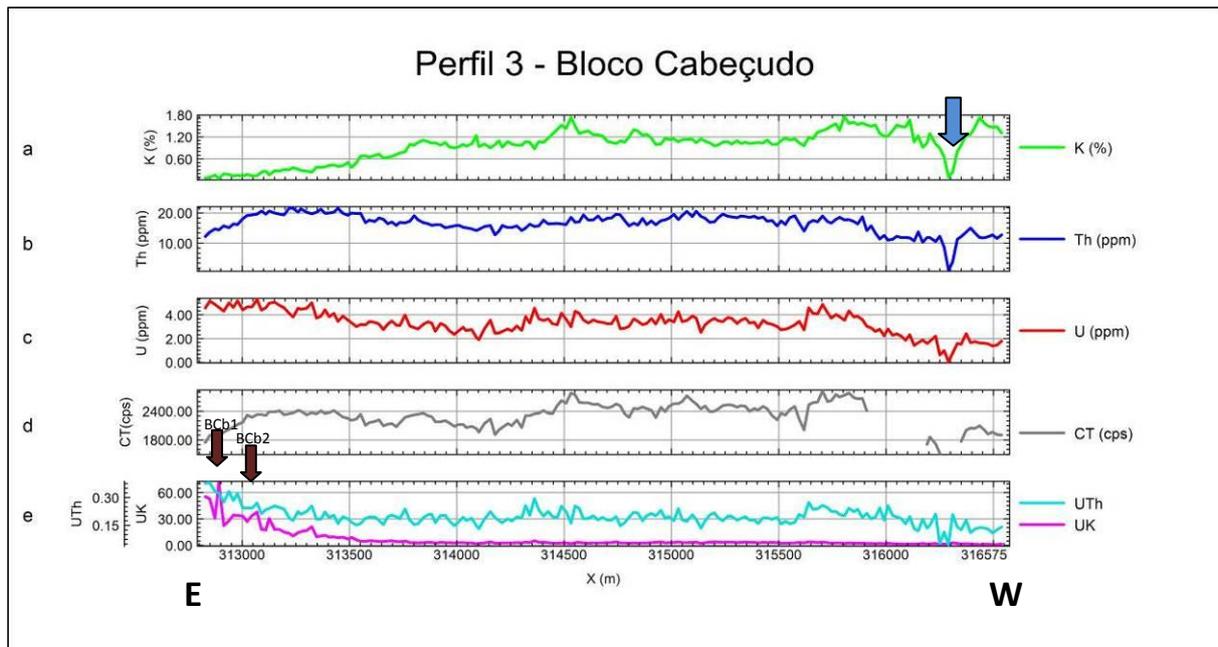


Fig. 6 – Perfis dos valores dos radioelementos K (a), Th (b), U (c) e a contagem total (d) coletados no campo, e as razões U/Th e U/K (e) para o Perfil 3 do Bloco Cabeçudo. A seta azul indica uma região de brejo, e as setas marrons feições anômalas (BCb1 e BCb2).

Os valores de Th não apresentam variações significativas ao longo de todo o perfil 3 (Fig. 6b), a exceção da região mapeada com a presença de uma área de brejo (indicada pela seta azul), onde os valores decaem de 10 ppm para quase 0 ppm. Os teores médios de Th ao longo do perfil estão em torno de 15 ppm, portanto acima dos valores médios deste elemento na crosta (8-12 ppm).

Assim como acontece no perfil 3b, o perfil do urânio (Fig. 6c) não apresenta variações significativas em seus teores, a exceção dos últimos 500 metros, onde existe uma região de brejo mapeado e os valores tendem a 0 ppm. Os valores de urânio ao longo do perfil apresentam um valor médio acima de 3 ppm, o que pode ser considerado elevado para o elemento se considerado que a média do elemento na crosta terrestre é de 2 ppm.

A contagem total apresenta um perfil (Fig. 6d) com variações mais evidentes, no início e final do perfil onde os valores de concentração de radioelementos são mais baixos e, na porção central onde os valores aumentam, porém sem nenhum pico mais evidente.

O perfil da razão U/Th (Fig. 6e) apresenta um comportamento bastante regular apresentando apenas um baixo na região do brejo, e um alto no início do perfil, mas nada

muito significativo. Com relação ao perfil da razão U/K (Fig. 6e), este apresenta uma porção anômala no início da linha, com valores mais elevados e um pico, indicado pela seta marrom BCb1 (Fig. 6e) bem marcado. Nesta região pode-se observar um enriquecimento em urânio em relação ao potássio.

No início do perfil existe uma faixa de aproximadamente 700 metros onde o U (Fig. 6c) apresenta teores com cerca de 4 ppm, e onde os teores de K são quase nulos. Apesar dos corpos mineralizados conhecidos na região terem extensões menores que 100 metros, este trecho assinalado com a seta BCb2 (Fig. 6e) apresenta um padrão interessante, se comparado aos padrões que ocorrem onde existe mineralização conhecida, merecendo uma melhor investigação. Estes pontos assinalados no perfil 3 (Fig. 6e) das razões são indicados como pontos de cheque de campo.

Como se pode observar no perfil 3 (Fig. 6d), existem trechos de linha com falta de informação, estes correspondem aos períodos onde não foi possível a anotação analógica dos dados devido a um problema momentâneo no visor do equipamento.

Perfil 4

Localizado no Bloco Avião, o perfil 4 encontra-se logo atrás (a oeste) da Mineração Itafós, com 850 m de extensão (perfil roxo na Fig. 3). O perfil, primeiramente traçado com direção E-W, foi modificado devido a problema com o superficiário, sendo então executado ao longo de estradas secundárias existentes na região. O levantamento realizado corta as anomalias de fluor e fósforo mapeados para a região, porém sem nenhuma anomalia de urânio. O relevo na região é bastante acidentado, porém ao longo de quase todo o perfil existia rocha aflorante. A litologia na área é dominada por siltito. A área se encontra próximo a um ponto de amostragem geoquímica com valor do elemento P acima de 600 ppm.

O perfil aqui levantado corta essencialmente solo siltoso, com fragmentos de siltito e afloramento de siltito, localmente. O levantamento foi realizado sobre a estrada secundária que corta a área. Existe na região um corpo de fosforito mapeado pela Itafós (Fig. 7d).

A figura 7 apresenta os dados pós-processados dos radioelementos U, Th e K; A contagem total (cps), e; as razões U/Th e U/K.

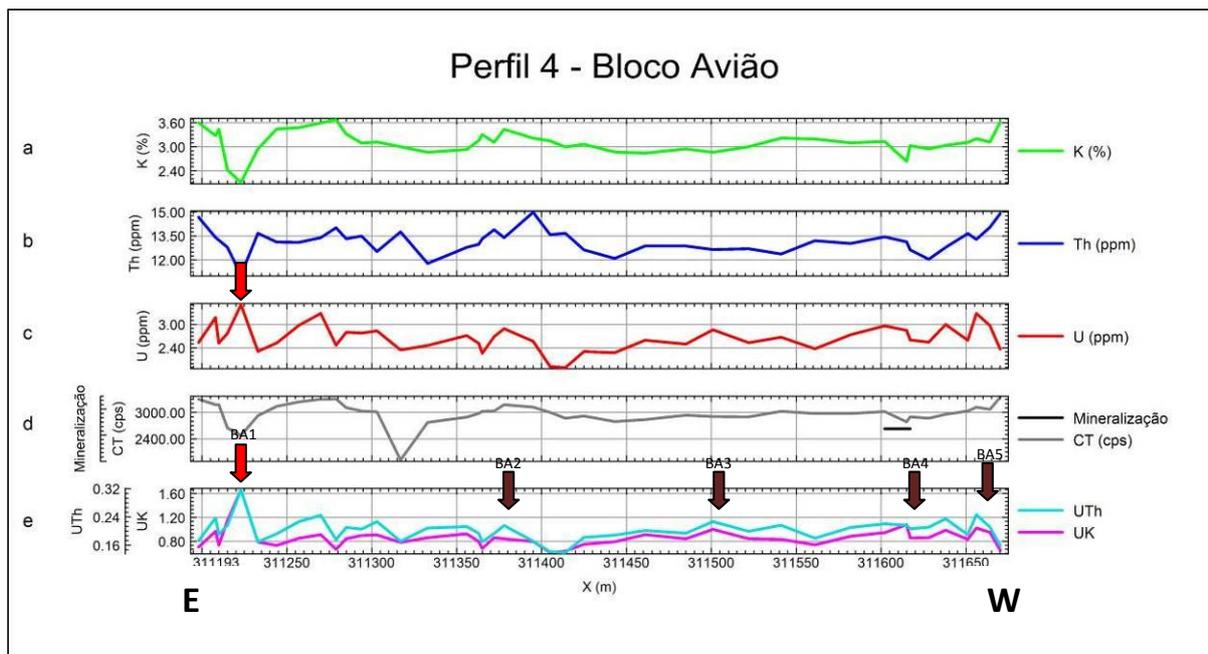


Fig. 7 – Perfis dos valores dos radioelementos K (a), Th (b), U (c) e a contagem total (d) coletados no campo, e as razões U/Th e U/K (e) para o Perfil 4 do Bloco Avião. As setas deste perfil indicam feições anômalas, sendo as em vermelho com prioridade 1 (BA1) e as marrons com prioridade 2 (BA2, BA3, BA4 e BA5).

O K apresenta uma depleção bastante marcada logo no início do perfil 4a (Fig. 7), porém no restante da linha mostra valores que variam em torno de 3 %, localmente atingindo 3,6 %. Na região onde foi marcada a existência de mineralização (esta mapeada próximo da linha), ocorre uma ligeira queda na concentração de potássio. Nos últimos metros da linha o teor do radioelemento sofre outro aumento.

O tório apresenta uma queda significativa no início do perfil 4b (Fig. 7), onde também diminuiu a concentração de K, porém aumentando os teores para uma média de 13 ppm. Próximo da coordenada leste 311400m ocorre um pico do elemento, que atinge o patamar de 15 ppm. A exemplo do que ocorre com o potássio, nos últimos metros da linha o tório tem um aumento na concentração.

O perfil do U, (Fig. 7c) mostra um comportamento irregular, com um pico bastante acentuado no início da linha (seta vermelha). Possui ainda dois picos menores tanto do lado direito, como do lado esquerdo deste pico principal. Estes três altos no perfil de U possuem teores maiores que 3 ppm. Seguindo em direção ao final da linha ocorrem variações entre

1,6 e 3 ppm do elemento, e no final da mesma, um novo pico do radioelemento com teor acima de 3 ppm. Na região da mineralização ocorre um ligeiro aumento nas concentrações do elemento, elevando os teores para 3 ppm.

O perfil da contagem total (Fig. 7d) apresenta um comportamento mais constante, com duas grandes depleções, uma no início do perfil onde ocorre o pico do urânio, e a outra próxima da coordenada leste 311320m. Pode-se observar ainda que na região onde foi assinalada a mineralização, ocorre uma ligeira queda nas concentrações dos radioelementos.

No perfil 6 das razões U/K e U/Th (Fig. 7e), pode-se observar um pico bem marcado no início da linha, este indicado pela seta vermelha BA1 (Fig. 7e) e outros picos menos evidentes ao longo de toda a linha assinalados com as setas marrons denominadas BA2, BA3, BA4 e BA5 (Fig. 7e).

Apesar da litologia mapeada ao longo de todo o perfil 4 ser constante, siltito, pode-se verificar variações na composição do mesmo através da indicação dos perfis dos 3 radioelementos (K, Th e U). Como analisado individualmente, na região onde foi traçada a localização de uma ocorrência de minério próximo da linha levantada, os valores de K sofrem uma ligeira queda, enquanto os valores de Th e U apresentam uma pequena elevação, o que também é observado nos perfis das razões.

As setas no perfil das razões (Fig. 7e) indicam locais de cheque de campo. Estes picos indicam um enriquecimento de urânio em relação aos radioelementos Th e K.

Perfil 5

Localizado no Bloco Coité, o perfil 5 encontra-se no estado do Tocantins, área onde existe uma cava de extração de fosfato pela Itafós, porém sem nenhuma informação de geofísica aérea. Este perfil possui 580 m de comprimento com direção E-W, ao longo do qual foram executadas 28 leituras. O levantamento cruza um corpo de fosforito mapeado. Este perfil foi escolhido por já ter amostragem de solo para geoquímica, além de levantamentos geofísicos com GPR e imageamento elétrico bidimensional.

A litologia que predomina ao longo deste perfil é o siltito, sendo que existe um corpo fosforítico mapeado (Fig. 8d) pela Itafós. Foram encontrados localmente fragmentos de

silexito. A posição indicada pela seta azul (Fig. 8a) marca a existência de um córrego que corta o perfil. A área possui o relevo um pouco acidentado e no início da linha onde a vegetação é pasto, passando para uma vegetação de maior porte próximo ao córrego.

A figura 8 apresenta os dados pós-processados dos radioelementos U, Th e K; A contagem total (cps), e; as razões U/Th e U/K.

O perfil do potássio (Fig. 8a) apresenta um comportamento marcado por um alto no início da linha e uma queda significativa dos valores da metade da linha até o final. Os valores variam de aproximadamente 4 % nas regiões mais altas, atingindo em torno de 0 % na região mais baixas, região esta que apresenta um corpo de fosforito mapeado pela Itafós. Na porção indicada pela seta azul, ocorre uma pequena queda no valor do elemento, marcando a existência de um córrego.

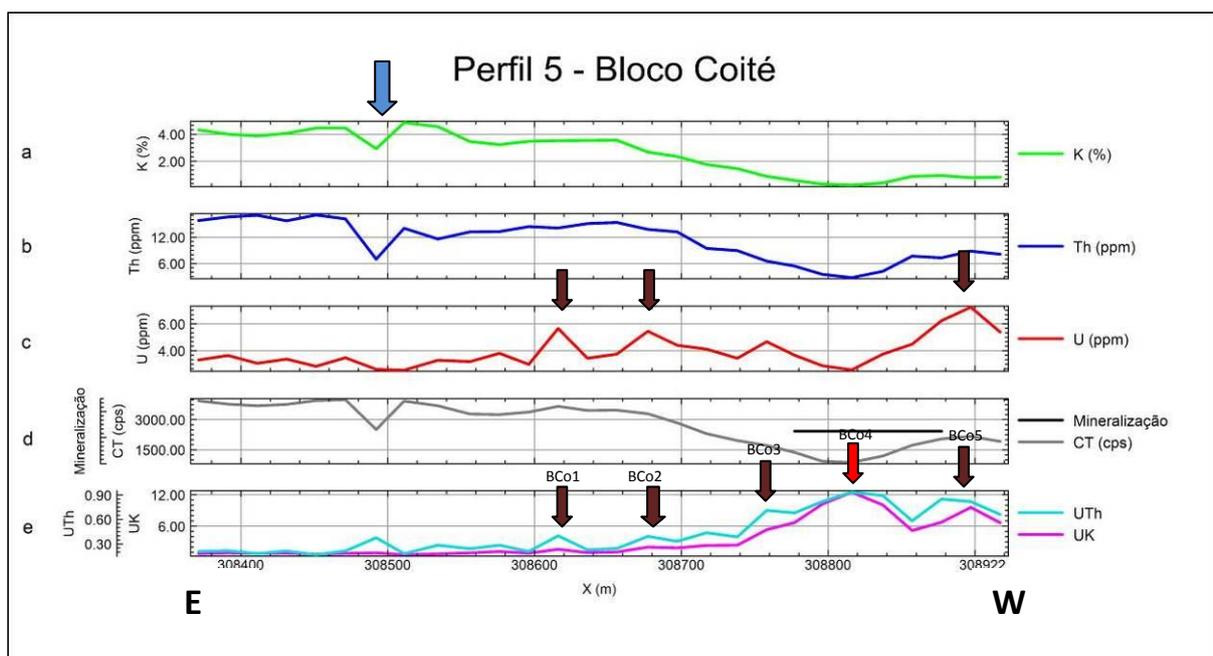


Fig. 8 – Perfis dos valores dos radioelementos K (a), Th (b), U (c) e a contagem total (d) coletados no campo, e as razões U/Th e U/K (e) para o Perfil 5 do Bloco Coité. A seta azul indica a presença de um córrego na área, e as outras setas regiões consideradas anômalas nos perfis. A seta vermelha indica prioridade 1 (BCo4) de investigação e, as marrons, prioridade 2 (BCo1, BCo2, BCo3 e BCo5).

O Th (Fig. 8b) apresenta um comportamento bastante semelhante ao do potássio (Fig. 8a), com os maiores valores (18 ppm) entre o início e a metade da linha, tendo uma queda significativa nos teores da metade até o final, onde atinge no seu ponto mais baixo, com valores em torno de 4 ppm, tendo um ligeiro aumento no final da linha.

O U (Fig. 8c) apresenta valores elevados ao longo de toda a linha, variando entre 2 e 7 ppm. Ocorre uma variação entre 2 e 4 ppm do início até quase a metade da linha, aparecendo dois picos de quase 6 ppm no centro da linha, assinalados com as setas marrons. Existe um pico um pouco menos evidente próximo da coordenada leste 308750m. Sobre a mineralização mapeada na região, ocorre uma ligeira queda nos valores de U, porém estes continuam elevados, acima de 3 ppm. No final da linha, assinalado pela seta marrom, ocorre um pico que atinge aproximadamente 7 ppm de U.

A contagem total (Fig. 8d) apresenta o mesmo comportamento dos elementos K e Th, com valores mais elevados no início da linha, uma ligeira queda na região onde existe o córrego, e uma queda dos valores na região onde foi mapeado o corpo mineralizado.

Os perfis das razões U/K e U/Th (Fig. 8e) apresentam comportamentos semelhantes entre si, e com o perfil do urânio. Valores baixos no início do perfil e um aumento significativo no último terço da linha, ou seja, uma tendência de crescimento de oeste para leste. Ao longo destes perfis foram assinalados com setas 5 picos de enriquecimento de U em relação ao Th e ao K, sendo os dois primeiros, BCo1 e BCo2 (Fig. 8e) com uma amplitude menor, e os três últimos, BCo3, BCo4 e BCo5 (Fig. 8e) com amplitudes maiores. É possível observar que a maior amplitude de enriquecimento de U relativo ocorre onde o fosforito foi mapeado e está assinalado no perfil, o que caracteriza que as regiões mineralizadas apresentariam baixos valores de K e Th em relação ao U. Estes pontos são indicados para cheque de campo.

7.4. Discussão e Conclusões

No perfil 5, correspondente ao Bloco Coité, é relevante ressaltar a marcante tendência de crescimento na razão U/K (Fig. 8e) no sentido de oeste para leste. Observe-se que os maiores valores da razão coincidem com a área mineralizada (traço preto no perfil da CT, fig.

8d), provando assim a eficiência do método gamaespectrométrico para o mapeamento de mineralização.

As áreas marcadas nos perfis 5d (Fig. 8), apesar de não apresentarem valores de U muito acima da média da crosta, apresentam valores relativos elevados (valores médios em torno de 3 a 4 ppm). Alguns pontos apresentam picos de U com depleções de K e Th, indicações importantes de que há uma correlação inversa entre estes elementos. De acordo com estas análises, conclui-se que as razões são os melhores produtos para mapear o fosforito.

É possível observar nos perfis que onde há informações de mineralização (Fig. 5d; Fig. 7d; Fig. 8d), ocorre um pequeno deslocamento entre a faixa mineralizada e os picos de urânio. Estas informações têm bases de posicionamento diversas e podem conter distorções em função da aquisição por diferentes equipamentos (GPS), os quais apresentam margem de erro de variada; ou metodologia diferente na aquisição dos dados de posicionamento.

Após a análise dos cinco perfis de gamaespectrometria terrestre, podemos afirmar que os perfis da razão U/Th e U/K são os melhores mapeadores de mineralização de fosforito. Visto que todas as mineralizações conhecidas nos perfis apresentam valores elevados com picos bem marcados nestes dados;

Foram selecionados dezessete locais para investigação de anomalias de radioelementos. Destas, oito com prioridade um e nove com prioridade dois. Sugere-se que sejam realizadas amostragem com trado nestas regiões para análise.

7.5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto de Geociências da Universidade de Brasília (IG/UnB) pela infraestrutura e equipamentos cedidos e, a Itafós Mineração Ltda pelo apoio na etapa de campo, pelas informações disponibilizadas e pela permissão para publicação destes dados.

7.6. Referências bibliográficas

- Asfahani, J. 2002. Phosphate Prospecting Using Natural Gamma Ray Well Logging in the Khneifiss Mine, Syria. <http://emg.geoscienceworld.org/cgi/content/abstract/11/1-4/61> (16/11/09).
- Dardenne, M. A. 1978. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 30, Recife, Anais, 2: 597-610.
- Dickson, B. L. & Scott, K. M. 1997. Interpretation of aerial gamma-ray surveys – adding the geochemical factors. In: Airborne Magnetic and Radiometric Surveys, ASGO Journal of Australian Geology & Geophysics, 17: 187-200.
- Exploranium – A division of SAIC Canada, 2007. GR-320. Portable Gamma Ray Spectrometer. Users' Manual. Revision 3.5.
- Ferreira, C. J. Moreira-Nordemann, L. M. e Nordemann, D. J. R. 1992. A radioatividade natural da região de Irecê, BA. Revista Brasileira de Geociências. 22 (2) : 167-174.
- Fianco, C. B. Vidotti, R. M., Pires, A. C & Carmelo, A. C. 2010a. Mapping phosphatic rocks using airborne geophysical data in the Northeast region of Goiás State, Brazil. In: 2010 Meeting of the Americas – AGU. Foz do Iguaçu. <http://www.agu.org/cgi-bin/SFgate/SFgate?language=English&verbose=0&listenv=table&application=ja10&convert=&converterthl=&refinequery=&formintern=&formextern=&transquery=phosphate%20and%20sc%3dns&lines=&multiple=0&descriptor=%2fdata%2fepubs%2fwais%2findexes%2fja10%2fja10%7c344%7c4583%7cMapping%20Phosphoritic%20Rocks%20using%20Airborne%20geophysical%20data%20in%20the%20Northeast%20region%20of%20Goi%26%23225%3bs%20State%2c%20Brazil%7cHTML%7clocalhost:0%7c%2fdata%2fepubs%2fwais%2findexes%2fja10%2fja10%7c5289986%205294569%20%2fdata%2fepubs%2fwais%2fdata%2fja10%2fja10.txt> (17/12/2010)
- Fianco, C. B. Vidotti, R. M., Pires, A. C & Carmelo, A. C. 2010b. Prospecção de fosforitos utilizando geofísica aérea no nordeste de Goiás - GO. In: IV Simpósio Brasileiro de Geofísica – SimBGF. Brasília, 2010.
- IAEA – International Atomic Energy Agency, 2003. Guideline for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data. Vienna, Austria.
- Moreira, M. L. O., Moreton, L. C., Araújo, V. A., Lacerda, J. V. e Costa, H. F. 2008. Geologia do Estado de Goiás e Distrito Federal. Escala 1:500.000. Goiânia: CPRM/SIC – FUNMINERAL. 141p.
- Monteiro, C. 2009. Fosforitos do grupo Bambuí na Região de Campos belos (GO)/ Arraias (TO) na borda oeste do Cráton São Francisco. Tese de Mestrado no Programa de Geologia da Universidade de Brasília. 114 p.
- Wynn, J. 1996. Geophysics Applied to Phosphate Exploration in Northern Saudi Arabia. <http://volcanoes.usgs.gov/jwynn/2phos.html> (17/11/09).

Discussões e Conclusões

É possível observar uma semelhança muito grande entre os mapas de estimativa de U em ppm levando em consideração os elementos K, Th, U, UK, UTh, ThK, ASA, P (Capítulo 6, Fig. 17) e, levando em consideração os mesmo elementos e incluindo o flúor durante o cálculo da regressão (Capítulo 6, Fig. 19). Analisando-se a estatística entre ambos os mapas nota-se que a diferença é da ordem de valores decimais.

Como podemos observar nas imagens geradas com os resultados das regressões, áreas que apresentam crosta laterítica e rochas ígneas são bem mapeadas pelos elevados valores dos radioelementos U e Th.

Pequenas anomalias de P e U foram identificadas nos sedimentos das formações Serra de Santa Helena e Sete Lagoas, Grupo Bambuí, que apresentam conhecidos corpos de rocha fosfática na área de estudo.

Após a análise das imagens geradas neste trabalho, principalmente das estimativas de urânio e fósforo a partir dos dados de geofísica aérea, pode-se concluir que:

- Retirando-se as áreas de interferência de altos valores de eU e eTh, como áreas de embasamento e crostas lateríticas, é possível mapear áreas enriquecidas em U e P, o que pode indicar novas áreas de prospecção de fosforitos; e
- Foram selecionados quatro perfis (Capítulo 6, Fig. 20) para investigação com gamaespectrometria terrestre, considerando-se os resultados dos processamentos, imagens de estimativa de U e P, e a geologia conhecida para a região; e um perfil na área da mina da Itafós, onde existe um corpo conhecido de fosforito. Importante ressaltar que outros fatores, como logística e áreas de interesse de acordo com o apoio recebido para a realização dos trabalhos de campo também foram considerados para a seleção dos perfis.

Os resultados das análises dos dados de gamaespectrometria terrestre adquiridos sobre os cinco perfis acima citados e processados mostram que:

- No perfil 5, correspondente ao Bloco Coité, é relevante ressaltar a marcante tendência de crescimento na razão UK (Capítulo 7, Fig. 8e) no sentido de oeste para leste. Observe-se que os maiores valores da razão coincidem com a área mineralizada (traço preto no perfil da CT, fig. 8d), provando assim a eficiência do método gamaespectrométrico para o mapeamento de mineralização.
- As áreas marcadas nos perfis 5d (Capítulo 7, Fig. 8), apesar de não apresentarem valores de U muito acima da média da crosta, apresentam valores relativos elevados (valores médios em torno de 3 a 4 ppm). Alguns pontos apresentam picos de U com depleções de K e Th, indicações importantes de que há uma correlação inversa entre estes elementos. De acordo com estas análises, conclui-se que as razões são os melhores produtos para mapear o fosforito.
- É possível observar nos perfis que onde há informações de mineralização (Capítulo 7, Fig. 5d; Fig. 7d; Fig. 8d), ocorre um pequeno deslocamento entre a faixa mineralizada e os picos de urânio. Estas informações têm bases de posicionamento diversas e podem conter distorções em função da aquisição por diferentes equipamentos (GPS), os quais apresentam margem de erro de variada; ou metodologia diferente na aquisição dos dados de posicionamento.
- Após a análise dos cinco perfis de gamaespectrometria terrestre, podemos afirmar que os perfis da razão UTh e UK são os melhores mapeadores de mineralização de fosforito. Visto que todas as mineralizações conhecidas nos perfis apresentam valores elevados com picos bem marcados nestes dados;
- Foram selecionados dezessete locais para investigação de anomalias de radioelementos. Destas, oito com prioridade um e nove com prioridade dois. Sugere-se que sejam realizadas amostragem com trado nestas regiões para análise.

Referências Bibliográficas

- Ashfahani, J. 2002. Phosphate Prospecting Using Natural Gamma Ray Well Logging in the Khneifiss Mine, Syria. <http://emg.geoscienceworld.org/cgi/content/abstract/11/1-4/61> (16/11/09).
- Almeida, F. F. M. de, Hasui, Y., Neves, B. B. de B. & Fuck, R. A. 1977. Províncias Estruturais Brasileiras. In: SBG, Simpósio de Geologia do Nordeste, Campina Grande – PB. Ats, p 363-391.
- Alvarenga, C. J. S., Dardenne, M. A., Botelho, N.F., Machado M. A., Lima, O. N. B., Almeida, T. 2006. Relatório final das folhas SD.23-V-C-III – Monte Alegre de Goiás; SD.23-V-C-V – Cavalcante; SD.23-V-C-VI – Nova Roma. Convênio UnB/FINATEC/CPRM. Brasília, 67 p.
- Bizzi, L. A. e Vidotti, R. M. 2003. Condicionamento do Magmatismo pós-Gondwana. *In*: Bizzi, L. A. *et al.* Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil: texto, mapas e SIG. Brasília: CPRM, 2003.
- Biondi, J. C. 2003. Processos metalogenéticos e os depósitos minerais brasileiros. Oficina do Texto, São Paulo. 528p.
- Boggiani, P. C., Fairchild, T. R., Coimbra, A. M. 1993. O Grupo Corumbá (Neoproterozóico-Cambriano) na região central da Serra da Bodoquena (Faixa Paraguai) Mato Grosso do Sul. *Revista Brasileira de Geociências* 23(3): 301-305.
- Boujo, A., Trompette, R., Flicoteaux, R., Melfi, A. J., Affaton, P., Blot, A., Monteir, M. D., De Oliveira, J. J. E Magat, P. 1994. Fosfatos sedimentares marinhos do Proterozóico Médio e Superior e do Cambriano da África e do Brasil: Geologia, Mineralogia, Geoquímica e Importância Econômica. *An. Acad. Bras. Ci.*, **66** (3).
- Branco, J. J. R. & Costa, da M. T. 1961. Roteiro da excursão Belo-Horizonte – Brasília. Publicações, XIV Congresso da Sociedade Brasileira de Geologia, Belo Horizonte, **15**, 25pp.
- Castro, G. L., Parente, C. V., Veríssimo, C. U. V., Sial, A. N., Garcia, M. G. M., Santos, R. V., Melo, R. C. de, Santos, A. A. 2005. Isótopos de carbono e oxigênio dos mármores associados com o depósito Fósforo Uranífero de Itataia, Ceará. *Revista Brasileira de Geociências* **35**(2): 199-208.
- Cook, P. J. & Shergold, J. H. 1984. Phosphorus, phosphorites and skeletal evolution evolution at the Precambrian-Cambrian boundary. *Nature*, 308:231-6.

- Cook, P. J. & Shergold, J. H. (Eds.) 1986. Phosphate deposits of the world. Volume 1: Proterozoic and Cambrian phosphorites. London, Cambridge University Press, 386 p.
- Cook, P. J. 1992. Phosphogenesis around the Proterozoic-Phanerozoic transition. *Journal of the Geological Society*, 149: p. 615-620.
- Costa, M. L., Da Silva, V. P. 2009. The proterozoic phosphates of Xambioá (Tocantins). In: *Simpósio Brasileiro de Metalogenia*, 2, Gramado, Anais.
- Cornejo, C. & Bartorelli, A. 2009. *Minerais e Pedras Preciosas do Brasil*. Solaris Edições Culturais. São Paulo. 704 p.
- Dardenne, M. A. 1978. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. In: *SBG, Congresso Brasileiro de Geologia*, 30, Recife, Anais, 2: 597-610.
- Dardenne, M. A., Trompette, R. R., Magalhães, L. F., Soares, L. A. 1986. Proterozoic and Cambrian phosphorites – regional review: Brazil. In: Cook, P. J., Shergold, J. H. (Eds.). *Phosphate deposits of the world. Proterozoic and Cambrian Phosphorites*, London, Cambridge University Press, p.116-131.
- Dardenne, M. A., Freitas-Silva, F. H., Dos Santos, G. M., Souza, J. F. C. 1997. Depósitos de Fosfato de Rocinha e Lagamar, Minas Gerais. In: Schobbenhaus, C., Queiroz, E. T. & Coelho, C. E. S. (Eds). *Principais depósitos minerais do Brasil – Rochas e minerais industriais*. 4v. (v. 4c). Brasília, DNPM, p.113-122.
- Dardenne, M. A. 2000. The Brasília Fold Belt. In: Cordani, U. G., Milani, E. J., Thomaz Filho, A., Campos, D. A. (Eds). *Tectonic Evolution of South America*. 31th International Geological Congress, Rio de Janeiro, Brazil. p.231-263.
- Dardenne, M.A., Schobbenhaus C. 2003. Depósitos Minerais no Tempo Geológico e Épocas Metalogenéticas. In: Bizzi, L.A., Schobbenhaus C., Vidotti R.M., Gonçalves J.H. (Eds). *Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil – Texto, mapas e SIG*. Brasília, CPRM, p. 365-448.
- Davis, J. C. 1973. *Statistics and data analysis in geology*. Copyright. Kansas Geological Survey. 550 p.
- Davis, J. C. (ed.) 1986. *Statistics and data analysis in geology*. John Wiley & Sons, 2. ed., U.S.A., 646p.

- Dickson, B. L. & Scott, K. M. 1997. Interpretation of aerial gamma-ray surveys – adding the geochemical factors. In: Airborne Magnetic and Radiometric Surveys, ASGO Journal of Australian Geology & Geophysics, **17** (2): 187-200.
- Donnelly, T. H., Shergold, J. H., Southgate, P. N., Barnes, C. J. 1990. Events leading to global phosphogenesis around the Proterozoic/Cambrian boundary. Geological Society, London, Special Publications; v. **52**; p. 273-287.
- Ferreira, C. J., Moreira-Nordemann, L. M. e Nordemann, D. J. R. 1992. A radioatividade natural da região de Irecê, BA. Revista Brasileira de Geociências. 22 (2) : 167-174.
- Fornazzari, L. N. e Ferreira, F. J. F. 2003. Gamaespectrometria integrada a dados exploratórios multifonte em ambiente SIG aplicada à prospecção de ouro na Folha Bovuverá, SC. Revista Brasileira de Geociências, **33** (2 - suplemento): 1997-208.
- Fuck, R.A. 1994. A Faixa Brasília e a Compartimentação Tectônica da Província Tocantins. In: SBG, Simposio de Geologia do Centro-Oeste, 4. Brasília. Anais, 1:184-187.
- Fuck, R. A., Pimentel, M. M., D'el Rey Silva, L. J. H. 1994. Compartimentação tectônica da porção oriental da Província Tocantins. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 38, Cambirú. Boletim de Res. Expandidos1, p. 215-217.
- GEOSOFT 2009. *OASIS Montaj 7.1*. GEOSOFT, Inc., Toronto.
- Guimaraes, E. M. 1997. Estudos de proveniência e diagenese com ênfase na caracterização dos filossilicatos dos grupos Paranoá e Bambuí na região de Bezerra-Cabeceiras, Goiás. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília. 269p.
- IAEA – International Atomic Energy Agency, 2003. Guideline for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data. Vienna, Austria.
- Justo, L. J. E. C. 2000. Fosfato da Serra da Bodoquena – Mato Grosso do Sul. In: Programa de Avaliação Geológico-econômica de insumos minerais para agricultura no Brasil, Projeto PIMA-GO/TO/MT/MS. Goiânia, CPRM, relatório final. 38p.
- Lasa Engenharia e Prospecções, 2006. Levantamento Aerogeofísico do Estado de Goiás – 3ª Etapa. Relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos. Texto técnico. 138p.

- Lima, O. N. B., Uhlein, A., Britto, W. de. 2007. Estratigrafia do Grupo Bambuí na Serra da Saudade e geologia do depósito fosfático de Cedro do Abaeté, Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geociências*, **37**(4 – suplemento): 204-215.
- Mattoso, S. Q. & Formoso, M. L. L. 2007. Princípios Básicos para Prospecção Geoquímica. *In: Licht, O. A. B., De Mello, C. S. B. e Da Silva, C. R (eds.) Prospecção Geoquímica – Depósitos minerais metálicos, não-metálicos, óleo e gás*. CPRM. Editora Planeta Terra. p.97.
- Mané, M. A. 1998. Aplicação de Métodos Geofísicos (Gamaespectrométricos e Perfilagem Geofísica), Imagens de Satélite TM/Landsat e Geoquímicos, na Caracterização de Zonas Mineralizadas em Fosfato. Estudo de Caso: Irecê – Bahia. Tese de doutorado. Departamento de Geofísica. Universidade de São Paulo.
- Minty, B. R. S. 1996. The fundamentals of airborne gamma-ray spectrometry. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, **17** (2).
- Misi, A., Kaufman, A. J., Veizer, J., Powis, K., Azmy, K., Boggiani, P. C., Gaucher, C., Teixeira, J. B. G., Sanches, A. L. & Iyer, S. S. S. 2007. Chemostratigraphic Correlation of Neoproterozoic Successions in South America. *Chem. Geol.*, 237:161-185.
- Monteiro, M. D., Andrade, A. R. F. de, Toniatti, G. 1997. Depósito de fosfato de Irecê, Bahia. *In: Schobbenhaus C., Queiroz E. T. de, Coelho C. E. S. (eds) Principais depósitos minerais do Brasil, v. IV, parte C, DNPM, CPRM*.
- Monteiro, C. 2009. Fosforitos do grupo Bambuí na Região de Campos belos (GO)/ Arraias (TO) na borda oeste do Cráton São Francisco. Tese de Mestrado no Programa de Geologia da Universidade de Brasília. 114 p.
- Moreira, M. L. O.; Moreton, L. C.; Araújo, V. A.; Lacerda, J. V. e Costa, H. F. 2008. Geologia do Estado de Goiás e Distrito Federal. Escala 1:500.000. Goiânia: CPRM/SIC – FUNMINERAL. 141p.
- Mourão, M.A.A. (1995). A unidade fosfática da Formação Sopa-Brumadinho, Supergrupo Espinhaço (região de Conceição do Mato Dentro, Minas Gerais): Petrografia, geoquímica e considerações genéticas. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 161 p.

- Nabighian, M. N., Grauch, V. J. S., Hansen, R. O., LaFehr, T. R., Li Y., Peirce, J. W., Phillips, J. D., and Ruder, M.E. 2005. The historical development of the magnetic method in exploration. *Geophysics*, 70(6): 33-61.
- Nogueira, G.M. S. dos. 1993. Enquadramento litoestratigráfico, sedimentologia, e evolução geoquímica do depósito fosfático de Lagamar, MG – Formação Vazante – Proterozóico Médio. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 134 p.
- Reeves C. (ed.) 2005. *Aeromagnetic Surveys. Principles, Practice & Interpretation*. Geosoft., 155p.
- Rocha-Campos, A. C. & Hasui, Y. 1981. Tillites f the Macaubas Group (Proterozoic) in Central Minas Gerais amd Southern Bahia, Brazil. In *Earth`s Pre-Peistocene Glacial Record*, ed. M. J. Hambrey & W. B. Harland, pp 933-8. Cambridge University Press, Cambridge.
- Roest W.R., Verhoef J., Pilkington M. 1992. Magnetic interpretation using 3D analytic signal. *Geophysics*, 57: 116-125.
- Souza, A.E. 2001. Fosfato. Balanço Mineral Brasileiro, 31p, 2001. www.dnpm.gov.br/assets/galeriadocumento/balancomineral2001/fosfato.pdf (17/11/09).
- Souza, A. E & Cardoso, V. R. S. 2008. Sumário Mineral – DNPM, Fosfato. <http://www.dnpm.gov.br/assets/galeriaDocumento/SumarioMineral2008/fosfato.pdf> (16/11/09).
- Souza, A. E. & Fonseca, D. S. 2009. Economia Mineral do Brasil – 2009, fosfato. DNPM. https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=4003 (17/11/10).
- Vasconcelos, R. M., Metelo, M. S., Mota, A. C., Gomes, R. D. 1990. Geofísica em levantamentos geológicos. Rio de Janeiro, DIGEOF-CPRM.
- Wilford, J. R., Bierwirth, P. N., Craig, M. A. 1997. Applications of airborne gamma-ray spectrometry in soil/regolith mapping and applied geomorphology. In: *Airborne Magnetic and Radiometric Surveys*, AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics, **17** (2): 201-216.
- Wynn, J. 1996. Geophysics Applied to Phosphate Exploration in Northern Saudi Arabia. <http://volcanoes.usgs.gov/jwynn/2phos.html> (17/11/09).