

Levantamentos Gamaespectrométricos em Granitos Diferenciados. II: O Exemplo do Granito Joaquim Murtinho, Complexo Granítico Cunhaporanga, Paraná

Gamma-spectrometric Surveys in Differentiated Granites. II: the Joaquim Murtinho Granite in the Cunhaporanga Granitic Complex, Paraná, SE Brazil

Francisco José Fonseca Ferreira¹ (francisco.ferreira@ufpr.br), Allan Fruchting² (allan.fruchting@vmetais.com.br),
Gilson Burigo Guimarães³ (gburigo@ig.com.br), Luizemara Soares Alves⁴ (luizemara@petrobras.com.br),
Victor Miguel Oliveira Martin⁵ (vicmartin6@ig.com.br), Horstpeter Herberto Gustavo José Ulbrich⁵ (hulbrich@usp.br)

¹Departamento de Geologia - Centro Politécnico - UFPR/LPGA

Caixa Postal 19045, CEP 81531-980, Curitiba, PR, BR

²Votorantim Metais, São Paulo, SP, BR

³Departamento de Geociências - UEPG, Ponta Grossa, PR, BR

⁴Petrobras S.A. - Exploração/Geofísica/Métodos Potenciais, Rio de Janeiro, RJ, BR

⁵Departamento de Mineralogia e Geotectônica - Instituto de Geociências - USP, São Paulo, SP, BR

Recebido em 28 de novembro de 2007; aceito em 05 de agosto de 2008

RESUMO

Mapeamento detalhado na região de Joaquim Murtinho, no Complexo Granítico Cunhaporanga (CGC), Neoproterozoico, no estado do Paraná, SE do Brasil, permitiu redefinir o Granito Joaquim Murtinho (GJM), uma intrusão tardia no CGC, composta inteiramente por alaskitos, álcali-feldspato leucogranitos, com área de exposição em torno de 10 km². A unidade está em contato tectônico para W com o Grupo Castro, Neoproterozoico a Eocambriano, com rochas sedimentares e vulcânicas, e é intrusivo em unidades menos evoluídas do CGC, mais para E. Petrograficamente, o GJM é composto por mesoperitita e quartzo, com micas alteradas subordinadas e minerais acessórios, principalmente zircão; os granitos constituintes, equi a inequigranulares, estão em geral deformados (com texturas cataclásticas), frequentemente brechados, e podem mostrar estruturas miarolíticas. Atividades hidrotermal e deutérica são geradoras de minerais tardios como albita, sericita, carbonatos e hematita. Um estudo gamaespectrométrico terrestre (canais de contagem total, K, eU, eTh; 231 estações) coletou dados para a construção de vários mapas (CT-Ueq, K%, eU-ppm, eTh-ppm, e derivados), o GJM mostrando anomalias nos respectivos canais de CT e dos elementos K, eTh e eU (menos evidentes em vários mapas derivados), em comparação com outras unidades vizinhas do CGC, por estar enriquecido nestes três elementos. O comportamento geoquímico do K, do U e do Th é usado como base para avaliação dos mapas. Forte intemperismo (clima subtropical, temperaturas médias moderadas a elevadas, fortes precipitações) afeta em especial os feldspatos e biotita, lixiviando deles o K, e pode desestabilizar também fases acessórias portadoras de U e Th. O Th, pouco solúvel como cátion, deve acumular-se no solo residual retido em minerais "restíticos", enquanto parte do U pode migrar (em ambiente oxidante como ion uranila). O feldspato potássico, em particular, converte-se nesta situação completamente em argilominerais sem K (caulinita). Métodos gamaespectrométricos são claramente eficientes para identificar fácies em rochas granitoides, em especial quando aplicados ao estudo daqueles enriquecidos em K, Th e U.

Palavras-chave: Complexo Granítico Cunhaporanga, Granito Joaquim Murtinho, granitos alaskíticos, minerais de U-Th em granitos, levantamento gamaespectrométrico terrestre, comportamento do U-Th-K no intemperismo.

ABSTRACT

Detailed mapping at the NW corner of the large Neoproterozoic Cunhaporanga Granitic Complex (CGC), Paraná state, SE Brazil, redefined the Joaquim Murtinho Granite (JMG), a late intrusion in CGC with an exposed area of about 10 km², made up mainly by evolved "alaskites" (alkali-feldspar leucogranites). This unit is in tectonic contact with the Neoproterozoic-Eocambrian volcano-sedimentary Castro Group, to the W, and is intrusive into other less evolved granitic units of the CGC

to the E. Petrographically, JMG shows mainly mesoperthite and quartz, with subordinate amounts of altered micas and some accessory phases, mainly zircon. The equi to inequigranular granites are usually deformed with cataclastic textures, are often brecciated, and may have miarolitic structures. Formation of late albite, sericite, carbonate and hematite was caused by deuteric and hydrothermal alteration. A gamma-ray spectrometric survey at 231 stations which measured total counts (TC), Ueq K%, eU ppm and eTh ppm was used to construct several direct and derived maps. Compared to neighboring units the JMG has significant anomalies, especially in the TC, %K, eTh and eU maps, although the differences are less obvious in some derived maps. These evolved granites are enriched in these three elements. Geochemical behavior of K, Th and U is used to analyse the results observed in maps. Enhanced weathering under a subtropical climate with moderate to high average temperatures and heavy rainfall affects mainly feldspars and biotite, and may also destabilize most U and Th-bearing accessory phases. Th is most likely retained in restite minerals in soils, being relatively immobile, while part of U may migrate as uranyl ion in oxidizing media. K is especially affected by feldspar alteration to K-free clays (mainly kaolinite), and may be completely leached. Gamma-ray spectrometric methods are valid tools to study facies in granitic rocks, especially in those that are enriched in K, Th and U.

Keywords: Cunhaporanga Granitic Complex, Joaquim Murtinho Granite, alaskitic granites, gamma-spectrometric terrestrial survey, U-Th minerals in granites, behaviour of K-Th-U during weathering.

INTRODUÇÃO

O presente trabalho faz parte do projeto intitulado “Os granitoides do Complexo Granitoide Cunhaporanga, PR: estudos geofísicos, geoquímicos e mineralógicos”, iniciado em 1990 e financiado por vários auxílios ao longo dos anos. O objetivo final deste trabalho é o de apresentar e discutir os dados de levantamento gamaespectrométrico terrestre focado no Granito Joaquim Murtinho (GJM), um granitoide evoluído aflorante à NW do Complexo Granítico Cunhaporanga (CGC), perto da localidade de Joaquim Murtinho, estado do Paraná, enriquecido em elementos como K, Th e U. Numa primeira parte, foi discutida a temática da metodologia e do comportamento geoquímico dos elementos K, Th e U, em particular durante o intemperismo (Ulbrich et al., 2009, neste volume). É chamada a atenção sobre a facilidade com que K pode ser lixiviado, em condições de intemperismo subtropical, com períodos sazonais de chuva e temperaturas relativamente elevadas, um fator climático, portanto, que deve ser considerado como relevante nas interpretações dos mapas gamaespectrométricos.

OBJETIVOS

O objetivo essencial do estudo é identificar áreas radioanômalas enriquecidas em K, Th e U, em rochas do GJM e maciços vizinhos, tentando também avaliar a possibilidade de utilizar a distribuição dos elementos radioquímicos em relação ao relevo da área (Minty, 1997; Pickup e Marks, 2000), ainda ressaltando como a distribuição dos mencionados elementos é fortemente influenciada pelo controle do intemperismo (Ulbrich et al., 2009, neste volume). Para tanto, foram gerados mapas gamaespectrométricos com os dados coletados em estações de medição, sobrepostos ao mapa geológico da área de estudo, permitindo estabelecer a correspondência entre as anomalias re-

gistradas e a geologia do GJM e das rochas vizinhas. Os levantamentos aerogeofísicos do Projeto Serra do Mar Sul (CPRM, 1978; GEOFOTO, 1978a, 1978b) foram a base utilizada para realizar, previamente, uma avaliação das respostas gamaespectrométricas, em comparação com os dados terrestres, como apresentado em trabalho prévio e resumos em congressos (Guimarães et al., 2001; Ferreira et al., 2006a, 2006b). A revisão feita posteriormente para corrigir o posicionamento das linhas de voo e nivelar os dados, além da conversão de cps (contagens por segundo) para % de K e ppm de equivalentes de U (eU) e Th (eTh) (ver BARMP, 1997; Misener et al., 1997), permitiu avançar na análise dos dados aerogamaespectrométricos (Ferreira et al., 2006a).

LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo, situada no município de Pirai do Sul, perto da vila ou localidade de Joaquim Murtinho (Figura 1), é parte integrante da porção setentrional do CGC, limitada pelas coordenadas geodésicas 50°15' e 49° 45' de longitude oeste e 24°15' e 25°00' de latitude sul. O GJM encontra-se exposto na forma de lajes e matacões nas encostas e em pedreiras, em especial ao lado da rodovia PR-151 e da ferrovia Ponta Grossa-Itararé.

GEOLOGIA REGIONAL E LOCAL

O CGC é uma das maiores unidades presentes no embasamento cristalino do estado do Paraná, cobrindo perto de 3.000 km², inteiramente aflorantes nesse estado, e constituído por variados tipos de granitoides, entre os quais predominam os de natureza cálcio-alcalina, identificados pela paragênese máfica anfibólio-biotita-tianita e titanita-bioti-

ta, ocorrendo outros mais diferenciados em escala menor (com biotita e sem titanita, e com muscovita primária e biotita). Leucossienogranitoides e álcali-feldspato leucogranitoides (“*alasquitos*”) aparecem constituindo dois corpos de intrusão tardia, a NW como o já mencionado GJM, e a SW como o Granito Serra do Carambeí, com forma elipsoidal, ambas as unidades enriquecidas em U e Th, além de K (Guimarães, 1995, 2000; Prazeres Filho, 2000, 2005). Também como parte integrante do CGC aparecem megaenclaves mapeáveis (e.g., o “*Quartzito Serra das Pedras*”, com meta-arenitos, meta-arcóseos e finos leitos intemperizados argilosos, considerado correlato a rochas do Grupo Itaiacoca).

O CGC é intrusivo a E, no Grupo Itaiacoca, do Neoproterozoico, formado principalmente por metassedimentos clásticos e carbonáticos (e.g., Szabó et al., 2006). A W, ele está em contato, aparentemente sempre por falhas, com o Grupo Castro, do Neoproterozoico a Eocambriano, com sedimentos clásticos imaturos de granulação variada, associados com rochas vulcânicas e hipoabissais de natureza intermediária a ácida (andesitos, riolitos, depósitos ignimbríticos), localizados numa estrutura de graben (e.g., Trein e Fuck, 1967; Moro, 1993). O Complexo Granítico Três Córregos (CGTC), também do Neoproterozoico, está separado do Grupo Itaiacoca pela extensa zona de cisalhamento Itaipapuã (ZCI), de direção NE-SW; este complexo adentra o estado de São Paulo e cobre, na sua totalidade, perto de 5.000 km². Estas unidades são cortadas por inúmeros diques de diabásio, de espessuras decimétricas a métricas e comprimentos por vezes de vários km, com idades radiogênicas em torno de 130 Ma e considerados correlatos aos basaltos da Formação Serra Geral, do Neocomiano, encontradas na vizinha Bacia do Paraná, mais à W (e.g., Marques e Ernesto, 2004).

A estrutura dominante na região é o Arco de Ponta Grossa, um arqueamento regional que afeta todo o embasamento no Paraná, e que se manifesta como “alto estrutural” com direção NW-SE, identificada por provocar um marcado arco, com concavidade para SE, nos afloramentos das formações sedimentares que constituem, mais para W, a Bacia do Paraná.

O GJM foi descrito inicialmente durante o mapeamento da Folha de Joaquim Murtinho (escala 1:70.000) por geólogos da Comissão da Carta Geológica do Paraná (CCGP, 1970a), nas vizinhanças das localidades de Joaquim Murtinho, em Pirai do Sul, principalmente caracterizado por ser de natureza “*alasquítica*”, mostrando leucogranitos com pouco ou nenhum plagioclásio, na maioria das vezes verdadeiros álcali-feldspato granitos, situados no campo 2, eventualmente também incluindo rochas do campo 6*, quartzo álcali-feldspato sienitos, e os sienogranitos ricos em feldspato alcalino do campo 3a, no triângulo

Q-A-P da classificação modal de Streckeisen (cf. Le Maitre, 1989). As formas deste corpo são retangulares, limitado por contatos tectônicos tanto com o Grupo Castro, para oeste, como com vários dos granitoides do CGC, para leste, sendo-lhe atribuída inicialmente uma área de exposição superior aos 60 km², e com extensão, para sul, na folha vizinha (CCGP, 1970a). No mesmo ano, foi publicada a Folha Geológica de Varzeão (CCGP, 1970b), localizando-se nela, a 35 km de Joaquim Murtinho, um segundo “*Granito Joaquim Murtinho*”, também “*alasquítico*”, com apenas 1 km² de afloramentos, em parte em contato com os metassedimentos do Grupo Açungui.

O atual GJM foi redefinido, após trabalhos de mapeamento faciológico de maior detalhe, como granito de constituição “*alasquítica*” (Guimarães, 1995; Guimarães e Ulbrich, 1996), em concordância com o trabalho pioneiro (CCGP, 1970a), mas com superfície aflorante de apenas 10 km², encontrado em torno da localidade de Joaquim Murtinho; é considerado intrusivo em outras unidades ou domínios do CGC. Para oeste, o GJM mostra contato tectônico com o Grupo Castro, Neoproterozoico a Eocambriano (com siltitos, argilitos, arcóseos, conglomerados e rochas vulcânicas intermediárias a ácidas, em parte piroclásticas), e é coberto discordantemente pelos arenitos devonianos da Formação Furnas, da sequência da Bacia do Paraná.

O mapa faciológico de detalhe na região de Joaquim Murtinho é apresentado na Figura 1 (Guimarães, 1995). Como unidades mapeáveis (Ulbrich et al., 2001) foram definidas várias “associações de fácies” neoproterozoicas (NPA). A NPA I mostra monzogranitos a granodioritos, equigranulares a porfiríticos. A NPA II aparece com monzogranitos e granodioritos finos a médios, cinzentos e levemente foliados. A NPA III apresenta monzogranitos a granodioritos inequigranulares a porfiríticos, vermelhos, em parte cataclásticos. A NPA IV, integralmente restrita ao GJM e constituindo quase sua totalidade, mostra álcali-feldspato granitos médios a grossos, avermelhados ou cinzentos, cataclásticos a brechados, e em parte com estrutura miarolítica. Finalmente, a NPA V, também considerada manifestação pertencente ao GJM, ocorre como corpos menores (diques etc.), com álcali-feldspato granitos alaranjados, e sienitos e quartzo-sienitos inequigranulares a porfiríticos, amarelo-rosados. As associações I e II são as mais antigas, invadidas pelas rochas da associação III, enquanto as de número IV e V identificam as intrusões derradeiras. Do ponto de vista petrográfico e químico (Guimarães, 1995, 2000), as associações I, II e III mostram feições equivalentes aos dos granitos tipo I (“*ígneo*”) enquanto que as manifestações últimas, mais evoluídas, equivalem a granitos tipo A (Clarke, 1992; Clemens et al., 1986; Collins et al., 1982; Eby, 1992; Pitcher, 1993). Posteriormente, foi rea-

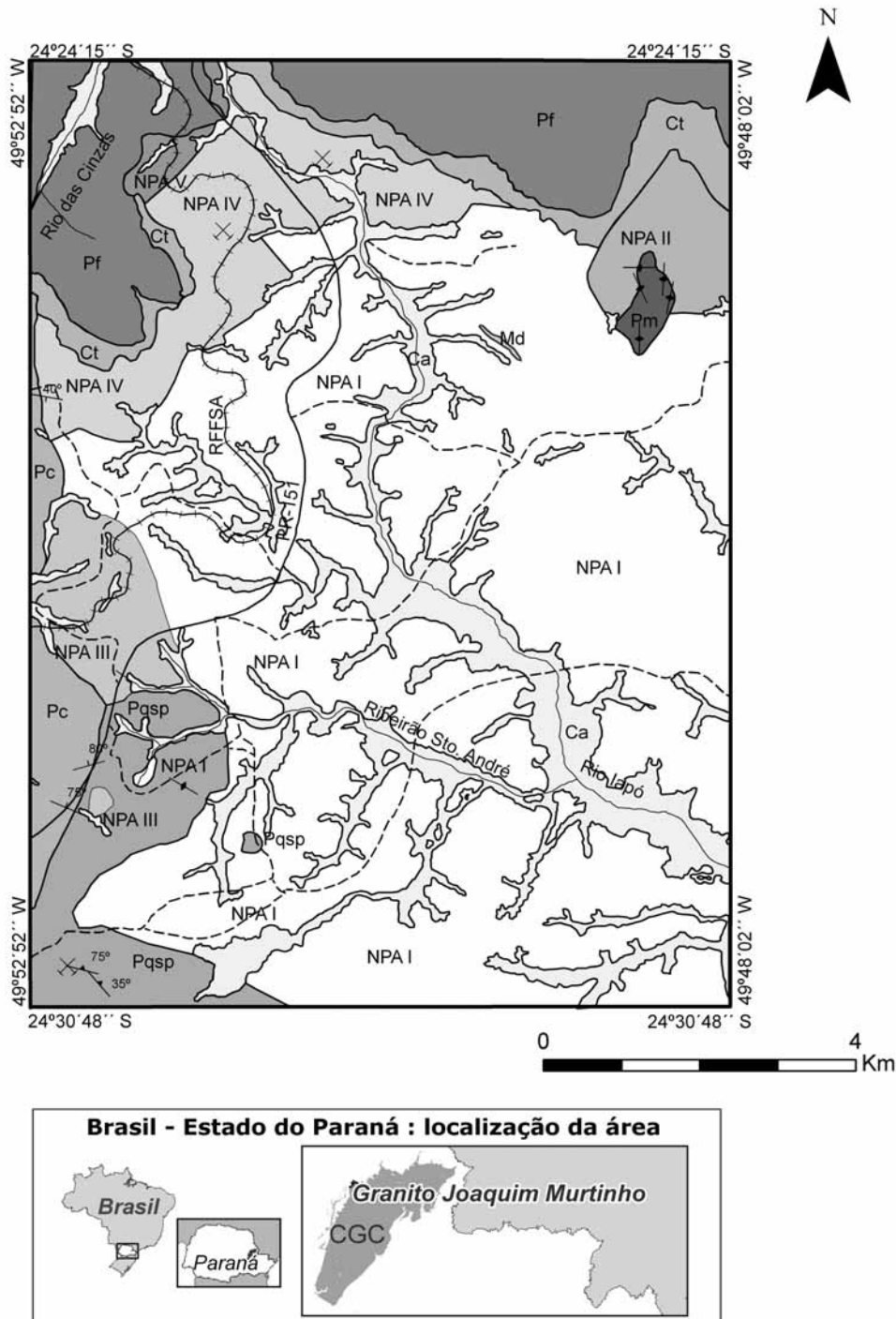


Figura 1. Localização da área estudada, junto com mapa faciológico do Granito Joaquim Murinho e vizinhanças (Guimarães, 1995). **Pm.** Proterozoico, milonitos. **NPA I.** Neoproterozoico (NP), associação de fácies I (monzogranitos a granodioritos, em parte porfíricos). **NPA II.** NP, associação II (monzogranitos a granodioritos [médios]). **NPA III.** NP, associação III (granitoides inequigranulares a porfíricos). **NPA IV.** NP, associação IV (álcali-feldspato granitoides róseos). **NPA V.** NP, associação V (granitoides inequigranulares, alaranjados); IV e V constituem o Granito Joaquim Murinho. **Pc.** Paleozoico inferior, Grupo Castro (siltitos, argilitos, arcósios e conglomerados). **Pf.** Paleozoico inferior, Formação Furnas (arenitos vários, brancos). **Md.** Mesozoico, diques de diabásios. **Ct.** Cenozoico, talus. **Ca.** Cenozoico, aluvião.

lizado um mapeamento abrangente na totalidade da área do CGC (Guimarães, 2000), ocasião em que foi adotado como critério norteador para o detalhamento o conceito de “domínio petrográfico”, que permite agrupar numa única unidade mapeável de caráter *informal* várias fácies textural e mineralogicamente similares. Neste caso, atendendo às recomendações dos códigos estratigráficos, deve ser utilizada, de preferência, uma denominação geográfica para identificar esses “domínios” (ver discussão e exemplos em Ulbrich et al., 2001). A equivalência entre a denominação mais antiga, lançada na Figura 1 (Guimarães, 1995), e a dos “domínios petrográficos” (Guimarães, 2000) aparece explicada na legenda da Figura 5 (ver mais adiante).

As rochas do GJM (da associação IV) mostram sempre cataclase incipiente ou até avançada, muitas vezes aparecendo com aspecto brechado e com os planos de fratura preenchidos por hematita, fluorita e/ou sulfetos (pirita, calcopirita, galena etc.). Localmente, são observadas cavidades miarolíticas. A textura das rochas constituintes do GJM é muito variada, desde equigranular média ou fina, localmente até afanítica, passando para muito grossa em algumas fácies, encontrando-se também concentrações locais pegmatoides com quartzo e feldspatos. Determinações químicas em quatro destas rochas alaskíticas indicam concentração de SiO₂ (entre 73,60 e 78,03%), Na₂O (entre 3,82 e 4,12%) e K₂O (entre 4,27 e 4,12%; 3,54 e 3,42% do elemento K), ocorrendo ainda teores muito baixos de MgO (0,07 a 0,28%) e CaO (0,34 e 0,15%). Os valores previamente conhecidos de Th (14 a 22 ppm) e U (em torno de 30 ppm) (Guimarães, 2000) são meramente indicativos, determinados por FRX, motivo pelo qual foram obtidos novos valores por ICP-MS (duas determinações, com valores de U de 5,35 e 6,23 ppm, e de Th de 26,6 e 19,7 ppm; dados próprios).

Os minerais predominantes nas rochas da associação IV são feldspato potássico (na forma de mesopertita), quartzo e biotita, esta totalmente substituída por argilominerais e óxidos-hidróxidos de ferro. Cristais quadrangulares de zircão aparecem como principal acessório, em parte zonados e parcialmente metamictizados. Ao microscópio, as feições mais marcantes são a deformação cataclástica e as transformações, por vezes muito marcadas, durante uma fase deutérica, inicial, e outra hidrotermal, mais tardia, com formação de mesopertitas e albitização, muscovitização, argilização e hematitização (razão da cor avermelhada destes granitoides).

METODOLOGIA

Para os levantamentos na região do GJM, foram realizadas duas etapas de campo, de quatro dias cada uma, com

a coleta de dados gamaespectrométricos terrestres, para posterior processamento dos dados e futura interpretação.

A aquisição dos dados terrestres foi realizada com um gamaespectrômetro GS-512 de 512 canais, fabricado pela Scintrex/Geofyzika, pertencente ao Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada (LPGA), da Universidade Federal do Paraná, em Curitiba, PR, seguindo procedimentos padrões (e.g., IAEA, 1991; Ferreira, 1991). Foram levantados 231 pontos, tentando estabelecer um espaçamento médio de 500 m, distribuídos ao longo de estradas, no GJM e também em maciços vizinhos, a fim de obter o contraste entre os litotipos (Figura 2). O posicionamento das estações foi realizado por um medidor GPS XL da Magellan, apoiado por fotografias aéreas de 1980, em escala 1:25.000, cedidas pela Mineropar.

As leituras gamaespectrométricas foram obtidas como contagens por segundo (cps) e automaticamente transformadas em concentrações de K em % e de U e Th em ppm (eU e eTh), com base em procedimento de calibração realizado no Instituto de Radioproteção e Dosimetria, IRD, da Comissão Nacional de Energia Nuclear, CNEN, do Rio de Janeiro, RJ (Becegato e Ferreira, 2006; Barretto et al., 1986). Procedimentos para calibração e análise de dados gamaespectrométricos são discutidos em Grasty (1976), Grasty et al. (1997) e Minty et al. (1997).

A interpolação dos dados do GJM foi realizada primeiramente pelo sistema Geovisual (de autoria de Jorge K. Yamamoto, IGc/USP), através do método de triangulação de Delaunay, com células de 300 x 300 m e, posteriormente, por mínima curvatura, através do *software* OasisMontajTM. O método de triangulação foi escolhido porque este granito apresenta contatos tectônicos angulosos e, caso fosse aplicado o método de mínima curvatura inicialmente, ocorreria a geração de um efeito de extrapolação das concentrações e, portanto, uma indefinição dos limites das anomalias. O método de triangulação apresentou imagens com efeitos de borda mais atenuados, em comparação com o método da mínima curvatura, assim permitindo observar se valores anômalos fora dos domínios do GJM seriam leituras reais ou anomalias fabricadas pelo método. Após a interpolação nesse sistema, os dados foram exportados para o *software* OasisMontajTM, uma operação necessária por não apresentar o sistema GeoVisual recursos gráficos, de conversões de arquivos e de gerenciamento de dados. Nesse sistema, então, optou-se por uma reinterpolação dos dados (para garantir uma maior precisão), desta vez pelo método de mínima curvatura. Finalmente, após a reinterpolação, foram gerados os mapas referentes aos dados, comparados com o mapa geológico base, escala 1:50.000, elaborado por Guimarães (1995), com o intuito de realizar a integração geofísico-geológica.

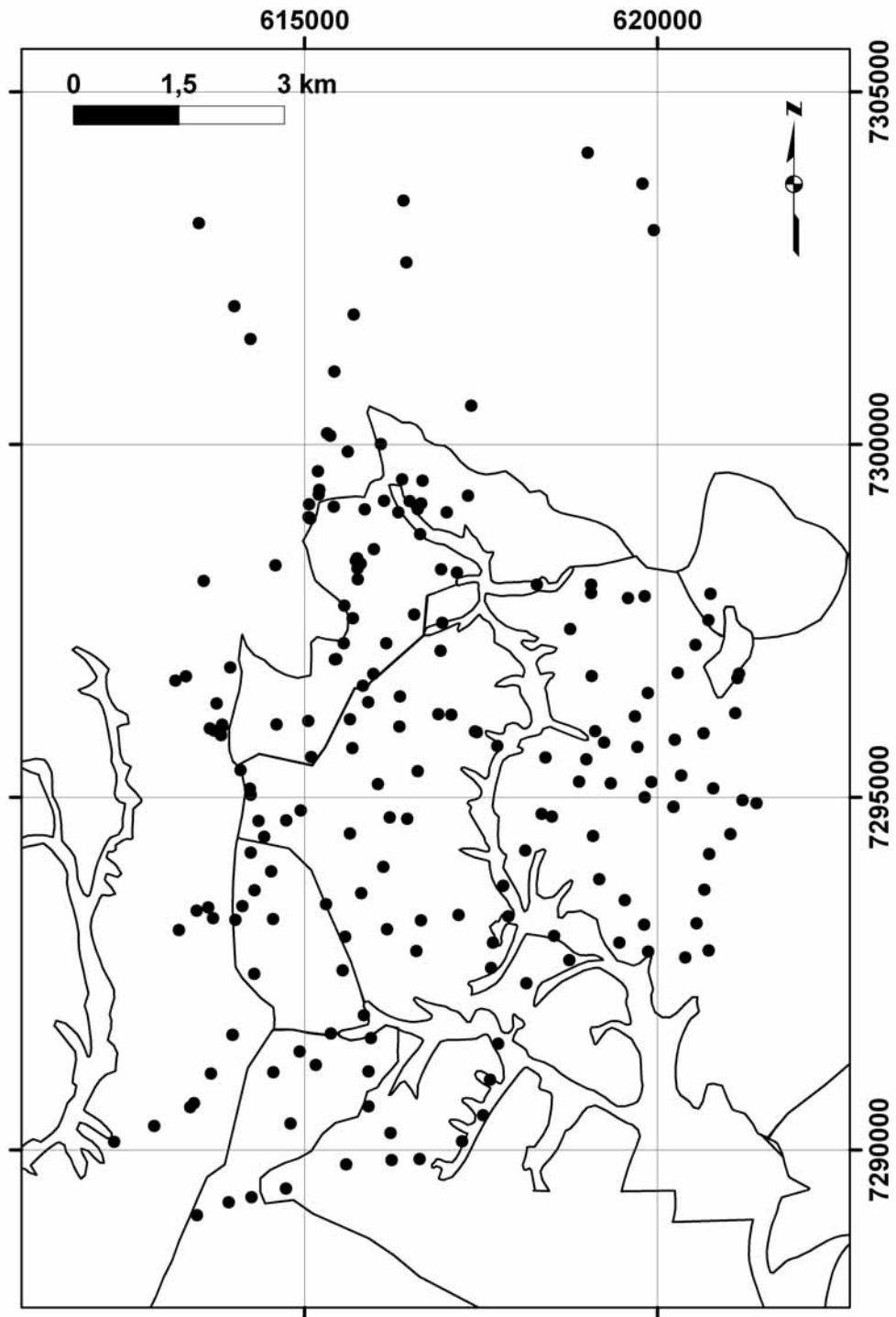


Figura 2. Localização das estações terrestres para o levantamento gamaespectrométrico na região do Granito Joaquim Murtinho.

Os mapas elaborados foram os seguintes: contagem total (CT, em eU, equivalentes de U), potássio (K, em %), urânio (eU, em ppm), tório (eTh, em ppm), o ternário K-Th-U, os com razões Th/K, U/K e U/Th, o com o parâmetro F, e os Kd e Ud, ambos normalizados pelo eTh (para uma discussão, ver Ulbrich et al., 2009, neste volume).

Mapas gamaespectrométricos

Mapas diretos: distribuição dos elementos K, Th e U, e contagem total

Em geral, os mapas com estes elementos são mostrados no formato *color-graded*, com vermelho intenso a lilás representando os valores mais elevados, passando sucessivamente pelo amarelo e azul claro até o azul profundo, para os valores mais baixos.

Os mapas de distribuição do K, no caso das regiões com granitoides aflorantes no Brasil, mostram uma grande variedade de respostas. Os casos extremos são, por um lado, mapas com elevados teores, como esperado, confirmando-se então a presença de granitos *frescos* na superfície (em geral, como “mar” de matações ou lajedos, a típica forma de afloramento destas rochas nas regiões meridionais brasileiras). Por outro lado, em áreas com forte intemperismo e presença de cobertura de solos residuais, as respostas são nulas ou de baixa intensidade, geradas pelo processo de forte *lixiviação* do elemento; materiais aluvionares e/ou coluvionares derivados dessas rochas mostrarão também o mesmo efeito.

Os mapas de distribuição do Th e do U podem indicar, por um lado, claramente a presença desses elementos através de teores destacados, como esperado em granitoides. Neste caso favorável, as diferenças nas abundâncias podem ser interpretadas como evidência de concentrações variadas desses elementos, um corpo de granito diferenciado (e.g., alásquítico) certamente se destacando de outro da linhagem cálcio-alcalina pela maior concentração de minerais acessórios portadores de U e Th e, em consequência, maior enriquecimento nesses elementos (ver listagem deles, e discussão, em Ulbrich et al., 2009, neste volume). Bastante frequente, entretanto, é o caso de contrastes entre ambos os mapas, um deles (em geral, o do U) mostrando irregularidades e/ou regiões granitoides com menor destaque, uma resposta notada em especial nos granitoides intemperizados e por conseguinte com baixos teores de K, sugerindo que os processos intempéricos são também os responsáveis pela remoção pelo menos parcial ou até total do U. Pelo contrário, os mapas do Th em granitoides mostram frequentemente respostas elevadas, mesmo em regiões de granitos fortemente intemperizados (com baixa resposta do K), indicando uma concentração de fases mi-

nerais acessórias com Th nos solos residuais, como consequência da menor mobilidade do último elemento durante o intemperismo.

O mapa de contagem total, no qual as contagens por segundo são convertidas em ppm de um determinado elemento (e.g., U), deve ser interpretado sempre em conjunto com os mapas dos elementos K, eU e eTh.

Mapas derivados: razões eU/K, eU/eTh, eTh/K

Mapas derivados frequentemente calculados são os mapas com as razões eU/eTh, eU/eK, e eTh/K. Os elementos K, Th e U, mesmo que enriquecidos em granitos diferenciados, mostram comportamentos geoquímicos não uniformes durante a granitogênese, embora em geral correlatos. O controle sobre estas variações é resultado de vários fatores, em especial da situação geológica local (predomínio de um ou outro tipo geoquímico de granitoide), o processo de enriquecimento (por ex., por diferenciação magmática e/ou por ação hidrotermal) e, finalmente, o grau de intemperismo.

Desta sorte, granitos podem ocorrer com significativos incrementos no teor de K, geralmente acompanhados por enriquecimento nos teores de U e Th, em especial nas rochas que mostram fortes anomalias nesses dois elementos, e que serão detectadas em mapas das razões eU/K e eTh/K; pelo contrário, neste caso, o mapa da razão eU/eTh não mostrará grandes contrastes. Por outra parte, também são encontrados os casos em que ocorrem incrementos em K e U, porém menores ou inexistentes em Th, em áreas com alteração hidrotermal, particularmente as do tipo potássico e/ou filico, do que pode decorrer a identificação de tais áreas pela gamaespectrometria e o eventual estabelecimento de relações com processos de mineralização de metais-base (Cu, Pb, Zn), além de ouro e prata em vários ambientes geológicos (e.g., Shives et al., 2000). Neste último caso, a relação Th/K, descrita por Ostrovskiy (1975), é baixa, ressaltando o chamado “antagonismo” entre o tório e o potássio, o primeiro aumentando quando o segundo diminui. Em tais ambientes, o parâmetro $F = K \times eU/eTh$ de Efimov (1978, *apud* Gnojek e Prichystal, 1985) realça o enriquecimento de K e U em relação ao Th. Assim, será encontrada uma razão tipicamente alta quando os maciços rochosos foram submetidos ao enriquecimento de potássio e urânio por alteração hidrotermal, ou muito baixa em áreas com forte intemperismo por causa da lixiviação do K, com formação de argilominerais pobres no elemento. Deve ser lembrado, entretanto, que este princípio do antagonismo K/Th não se aplica às rochas granitoides, nas quais existe em geral uma correlação positiva entre K e Th, como destacado em compilações de dados geoquímicos (e.g., Dickson e Scott, 1997; ver também Tabela 1).

Entretanto, a discussão a seguir mostra que estas razões devem ser analisadas com cautela. Para tal, apela-se a um exemplo numérico tomando como base as proporções médias dos três elementos na crosta superior (2,32% K, 2,7 ppm de U e 10,5 ppm de Th; Tabela 1; Rudnick e Gao, 2004). Neste caso, as razões Th/K = 4,53 e U/K = 1,16, são os valores de referência na crosta superior, mas que podem ser bastante maiores em granitos evoluídos. O Th, geralmente contido como elemento menor em minerais acessórios, é de mobilização mais difícil e pode ficar retido, durante o intemperismo, junto com esses minerais no solo residual. Não é o caso do U, cuja mobilidade frente ao intemperismo é maior (ver Ulbrich et al., 2009, neste volume). K, por outro lado, pode ser inteiramente lixiviado nas regiões de climas tropicais a subtropicais, razão pela qual as medidas gamaespectrométricas nessas regiões, em solos bem desenvolvidos e aluviões, podem registrar valores próximos de zero ou até zero. A experiência mostra, ainda, que os valores medidos de eTh e eU, nesses casos, dificilmente são zero (pelo menos, em regiões com rochas graníticas; ver, mais adiante, os mapas do GJM). Por este motivo, deve ser atribuído um valor arbitrário para o K, caso as medidas do elemento sejam “zero” ou estejam perto deste valor, com o qual as razões U/K e Th/K podem mostrar valores muito altos. Assim, atribuir ao K um valor numérico baixo (e.g., 0,001%, quando as contagens são muito baixas), eleva exageradamente as razões U/K e Th/K: no exemplo numérico mostrado da crosta superior, essas razões numéricas seriam respectivamente de 1.160 e 4.530, que

apareceriam no mapa *color-graded* com grande destaque, fazendo que outras razões mais “normais” (e.g., tais como 1,2 e 4,5) fiquem minimizadas. Em função deste “efeito K”, valores muito maiores que as razões normais passam a dominar as estatísticas, criando altos anômalos e, ao mesmo tempo, ocultando as variações mais significativas, todas submersas na cor azul que identificaria as razões mais baixas, embora normais. Por este motivo, para diminuir o “efeito K” no cálculo das razões U/K e Th/K, recomenda-se atribuir ao elemento (caso as contagens dele sejam muito baixas ou até nulas) um valor mínimo da ordem de 0,1% (ou eventualmente 0,01%), com o qual também é descartada a divisão pelo valor “zero”.

Os mapas “normalizados” Ud e Kd

Pode-se normalizar K e U pelo Th, como proposto por Saunders et al. (1987, 1993, 1994; ver também Pires, 1995), através das fórmulas:

$$K_d = (K_s - K_i) / K_i$$

$$U_d = (U_s - U_i) / U_i$$

onde:

$$K_i = (\text{média de } K_s / \text{média de } Th_s) \times Th_s$$

$$U_i = (\text{média de } U_s / \text{média de } Th_s) \times Th_s$$

e onde os valores K_s , Th_s e U_s correspondem aos valores reais medidos desses elementos, para cada ponto da malha.

Tabela 1. Composições de crosta continental e de diversos tipos de granitoides. **C.C.** Crosta continental. **Nd.** Não determinado. **TTG.** Tonalitos, trondhjemitos, granitos. **PRB.** *Peninsular Range batholith*, batólito da Cadeia Peninsular, Califórnia. **LFB.** *Lachlan Fold Belt*, cinturão dobrado Lachlan, SE Austrália. Fonte dos dados: Rudnick e Gao (2004); Kemp e Hawkesworth (2004).

	%K	ppm U	ppm Th
C. C. superior	2,6	2,7	10,5
C. C. intermediária	1,91	1,3	6,5
C. C. inferior	0,51	0,2	1,2
Média da C. C.	1,5	1,3	5,6
TTG	1,46	1,6	6,9
Granitoides, arco continental (PRB)	1,62	1,5	7,2
Granitoides, arco oceânico	1,15	0,37	0,83
Leucogranitos Himalaia	3,68	Nd	5
Granitos tipo A (LFB)	3,43	5	19,7
Hornblenda granitos (LFB)	2,89	5	20
Cordierita granitos (LFB)	3,4	5	19
Variações químicas no GJM (ver texto)	3,43; 3,54	5,4; 6,2	20; 27

Ki e Ui são os respectivos valores ideais definidos a partir do Th, e Kd e Ud representam os desvios de tais valores ideais, ou seja, as anomalias de interesse.

Segundo Saunders et al. (1987), a dependência da concentração de potássio com relação ao tório é representada por uma função linear que passa pela origem (ver também Fornazzari Neto e Ferreira, 2003).

Mapa derivado do parâmetro F

O parâmetro $F = (K) \times (eU/eTh)$, descrito por Efimov (1978; ver Gnojek e Prichystal, 1985) ressalta simultaneamente a abundância do K e da razão eU/eTh . A razão U/Th típica da crosta continental superior está em torno de 0,25, mas em granitos especializados pode ser bastante maior que um, quando ocorre enriquecimento em U, ou até menor que 0,25, no caso mais frequente (em granitoides *sensu latu*) em que Th se concentra mais que U. Os granitos especializados, por outra parte, são bastante ricos em K (e.g., 3 - 5% K), motivo pelo qual o fator F deve ficar elevado (e.g., > 1), um comportamento que também se repete em rochas com alteração hidrotermal caracterizada por enriquecimento nos teores de K. O parâmetro F pode ser expresso de várias maneiras, como segue:

$$F = K \cdot eU/eTh = K/(eTh/eU) = eU/(eTh/K)$$

Efimov (op. cit.), pelo menos em regiões de climas temperados ou frios, sugeriu valores de 1,2 a 1,3 para o fator F em rochas não alteradas (e.g., granitos e rochas metamórficas quartzo-feldspáticas), e índices entre 2 e 5, excepcionalmente 10, para rochas hidrotermalmente alteradas; valores maiores podem também ocorrer no caso de granitos evoluídos frescos. Um exemplo interessante de levantamento gamaespectrométrico é relatado em Gnojek e Prichystal (1985), no qual áreas de alteração hidrotermal, identificando o posicionamento de mineralizações de Zn, aparecem com altos teores de K, moderados de eU (1 - 4 ppm), e relativamente baixos de eTh (1 - 6 ppm), motivo pelo qual a anomalia não é enfatizada nos mapas convencionais de CT, K, eU e eTh, mas realçada nos mapas que mostram a razão Th/K e o fator F, até porque K e Th apresentam neste exemplo o chamado “antagonismo” K-Th (Ostrovskiy, 1975, e também os comentários sobre a sua inexistência em rochas granitoides, no presente trabalho; ver também Pires, 1995).

O mapa ternário K-eTh-eU

Neste mapa, que deve ser mostrado na forma *color-scale*, cada um dos três elementos K (em %), Th e U (ambos em ppm) aparece no vértice de um triângulo equilátero

(teor de 100% do respectivo elemento), representado por uma determinada cor (RBG), com gradações conforme a variação dos teores; a cor branca representa teores elevados dos três elementos, enquanto a cor negra revela teores baixos dos mesmos. Este mapa, como outros mapas derivados, ajuda a ressaltar contrastes, eventualmente menos evidentes nos mapas diretos.

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

Cada litotipo da área de estudo (Quartzito Serra das Pedras, milonitos, as associações graníticas NPA I, NPA II, NPA III, NPA IV e NPA V, e ainda aluviões) oferece respostas diferentes tanto na contagem total quanto nos canais do K, do eTh e do eU. A seguir são apresentados os resultados registrados nos mapas gamaespectrométricos integrados ao mapa geológico simplificado, principalmente da área alvo de estudo, o GJM.

Na construção dos mapas foram utilizados os canais do K, do eTh e do eU, a partir dos quais foram sobrepostos os contornos geológicos (e.g., o do GJM) e áreas radioanômalas. Dessa maneira, aparecem identificados nos mapas os contornos das várias unidades geológicas representadas na Figura 1, a Figura 2 mostrando a distribuição das estações de medição. Foram também calculadas médias de valores (K em %, e os equivalentes eTh e eU, em ppm), identificando por meio do *Grid 1* a média de teores da área total, com o *Grid 2* a média do GJM e com o *Grid 3* a média da área restante com exclusão do GJM. Os resultados são apresentados na Figura 3. Para o *potássio*, no mapa da área completa de estudo, a média total fica em torno de 1,88 K%, enquanto que no GJM essa média é de 2,47 K%, portanto claramente uma região enriquecida em K. A área restante, sem o GJM, mostra média de 1,86%. As determinações geoquímicas, em rochas frescas, indicam teores de K de 3,42 e 3,54%, que não são muito diferentes dos valores médios indicados. O valor médio de eTh do GJM é de 23,99 ppm, enquanto que na área inteira a média é de 14,81 ppm, caindo para 13,22 ppm no trato sem o GJM (Figura 3). Os valores médios aqui citados, em especial para o eTh e o eU, são muito parecidos com os detectados por determinações geoquímicas em rochas mais frescas do GJM, com teores de Th entre 20 e 27 ppm. O GJM, outra vez, apresenta os maiores teores de eU (5,46 ppm) e também médias superiores para os *Grids 1* e *3* (respectivamente, 3,36 e 3,05 ppm de eU, Figura 3). Os valores medidos de U em rochas frescas do GJM estão em torno de 5,4 e 6,2 ppm, similares aos que foram registrados pelas medições gamaespectrométricas. Os valores médios de crosta continental e de vários tipos de granitoides estão registrados na Tabela 1, permitindo a comparação com os valores obtidos para o GJM por determinações

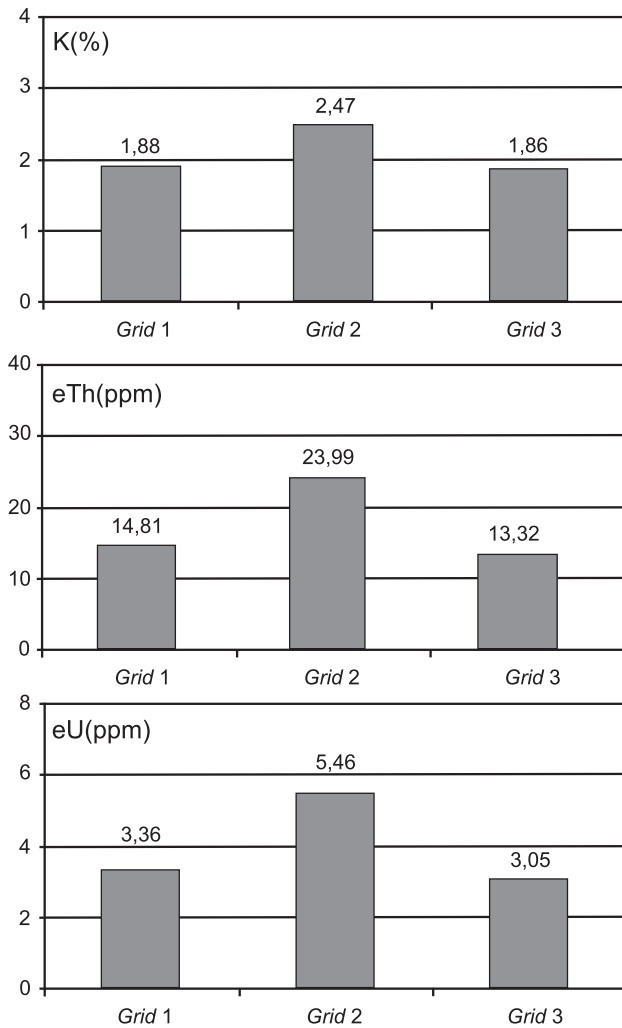


Figura 3. Médias de leituras gamaespectrométricas de K, Th e U na região do Granito Joaquim Murtinho. O *Grid 1* mostra os valores médios de leituras para toda a região levantada, o *Grid 2* o dos valores correspondentes exclusivamente ao GJM, e o *Grid 3*, a média para o resto da região, descontadas as leituras levantadas no GJM (ver texto, para comentários).

químicas e por espectrometria. Os resultados registrados mostram que, em princípio, a gamaespectrometria pode ser um excelente indicador dos valores reais dos elementos U e Th em granitos.

Uma ilustração das medidas realizadas com o gamaespectrômetro pode ser vista no espectro obtido na estação 120 (contagem total em granito relativamente fresco do GJM, Figura 4), a mesma figura registrando as respostas dos canais do K, do eU e do eTh para, respectivamente, um granito pouco alterado do GJM (estação 139), um

afioramento sobre o “Quartzito Serra das Pedras” (estação 219), e em aluvião (estação 202), as duas últimas com nenhuma resposta no canal de K, e pequenas nos canais de Th e U (Figura 4).

Na Figura 5 é apresentado o mapa de contagem total (CT), na forma de urânio equivalente (ver um espectro típico de contagem total na Figura 4). O GJM se destaca pelos valores máximos em toda a área, com forte coincidência entre a área destacada como anomalia e o seu contorno geológico. Deficiências e irregularidades na anomalia são devidas à falta de medições nessas regiões do GJM. Assim, o relevo é mais acentuado na parte NE do GJM, tornando-a menos acessível e com menor número de estações. Em consequência, aí a anomalia fica menos pronunciada, possivelmente em parte também pelo efeito de carreamento dos radionuclédeos, retidos no solo residual em minerais resistentes e movimentados para regiões mais baixas por gravidade e agentes de erosão. De qualquer maneira, toda a região granítica, e não apenas a do GJM, mostra anomalias significativas em CT, derivadas da contribuição dos três elementos (K, eTh e eU; Figura 5; ver abaixo). Também é observado um efeito decorrente do método de interpolação, registrando indevidamente valores altos em regiões que sabidamente mostram contagens baixas ou nulas em CT, K, Th e U, como os aluviões. Faltam ali estações de coleta de dados, fato em parte explicado pela dificuldade de ingressar nessas áreas com o equipamento, motivo pelo qual as medições foram sistematicamente realizadas ao longo de estradas (comparar Figuras 2 e 5).

A Figura 5 exhibe também o mapa do potássio. A discrepância entre os valores máximos e médios do K (Figura 3) pode ser explicada com base no intemperismo e a lixiviação pelo menos parcial do elemento, indicando tratar-se de regiões onde os processos intempéricos transformaram apenas em parte o feldspato potássico em caulinita. Por outro lado, os valores máximos (acima de 5% de K) referem-se a medições pontuais, que identificam áreas sujeitas a marcado enriquecimento do elemento, possivelmente por alteração hidrotermal e/ou deutérica, que acompanha os fenômenos de brechamento e catáclase, característicos do GJM. As áreas no GJM e de outros granitoides, mostrando teores muito baixos de K (Figura 5) devem corresponder a regiões com poucos afloramentos, mas muito solo (coluvial ou residual), com maior atividade intempérica e portanto mais pobres em K. Esta explicação é mais factível das alternativas (e.g., que os granitos situados nesses locais seriam outras fácies empobrecidas em feldspato potássico), já que o mapeamento de detalhe (Guimarães, 1995) estabeleceu que toda a área do GJM era ocupada por granitos alaskíticos.

Os litotipos das outras associações graníticas apresentam índices médios a altos de potássio, porém menores

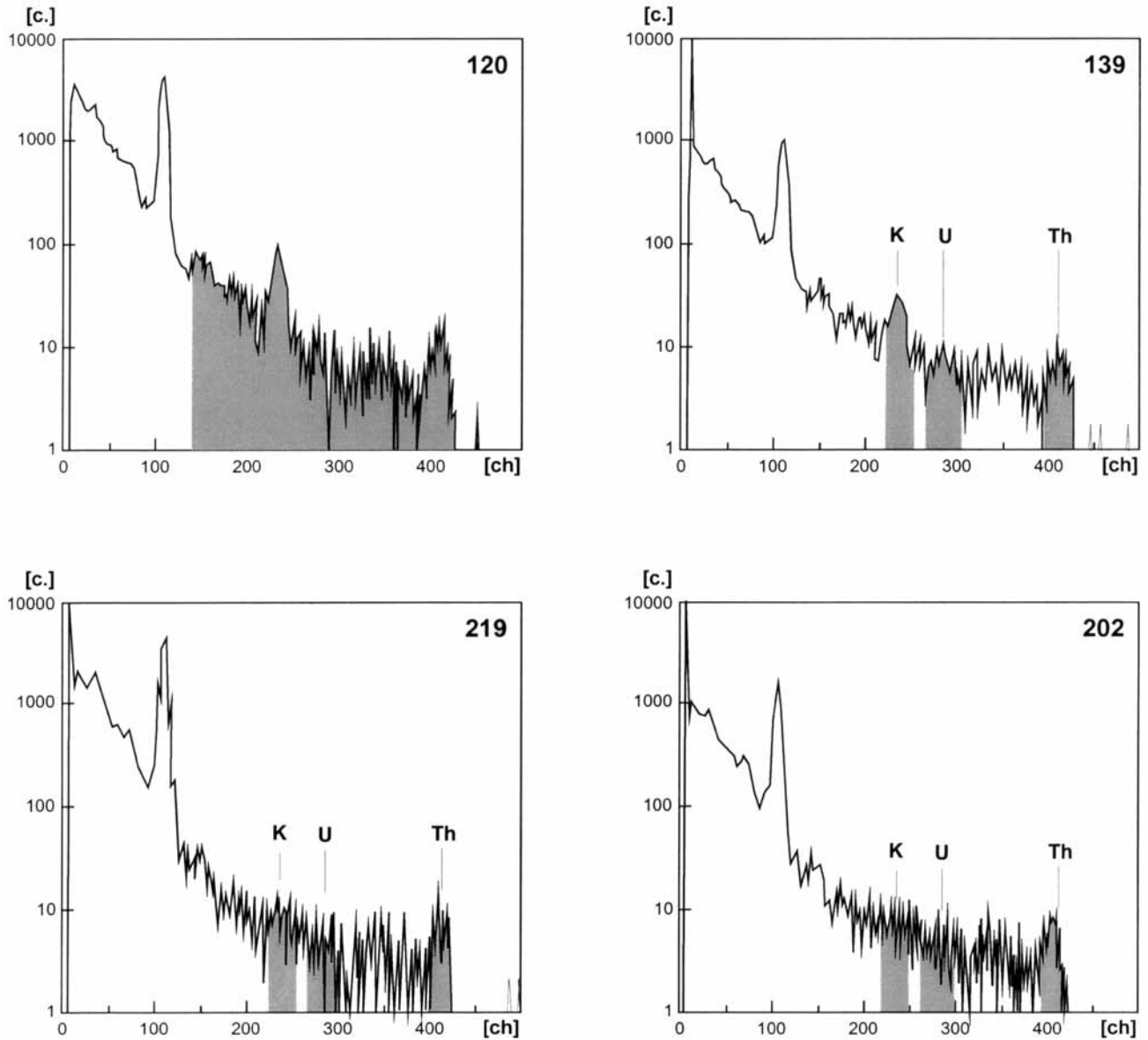


Figura 4. Exemplo de leitura de contagem total, em equivalentes de U, em granitoide relativamente fresco do GJM (estação 120) e exemplos de leitura nas três canais de K, Th e U, respectivamente na estação 139 (granito do GJM, relativamente fresco), estação 219 (unidade Quartzito Serra das Pedras) e estação 202 (aluvião).

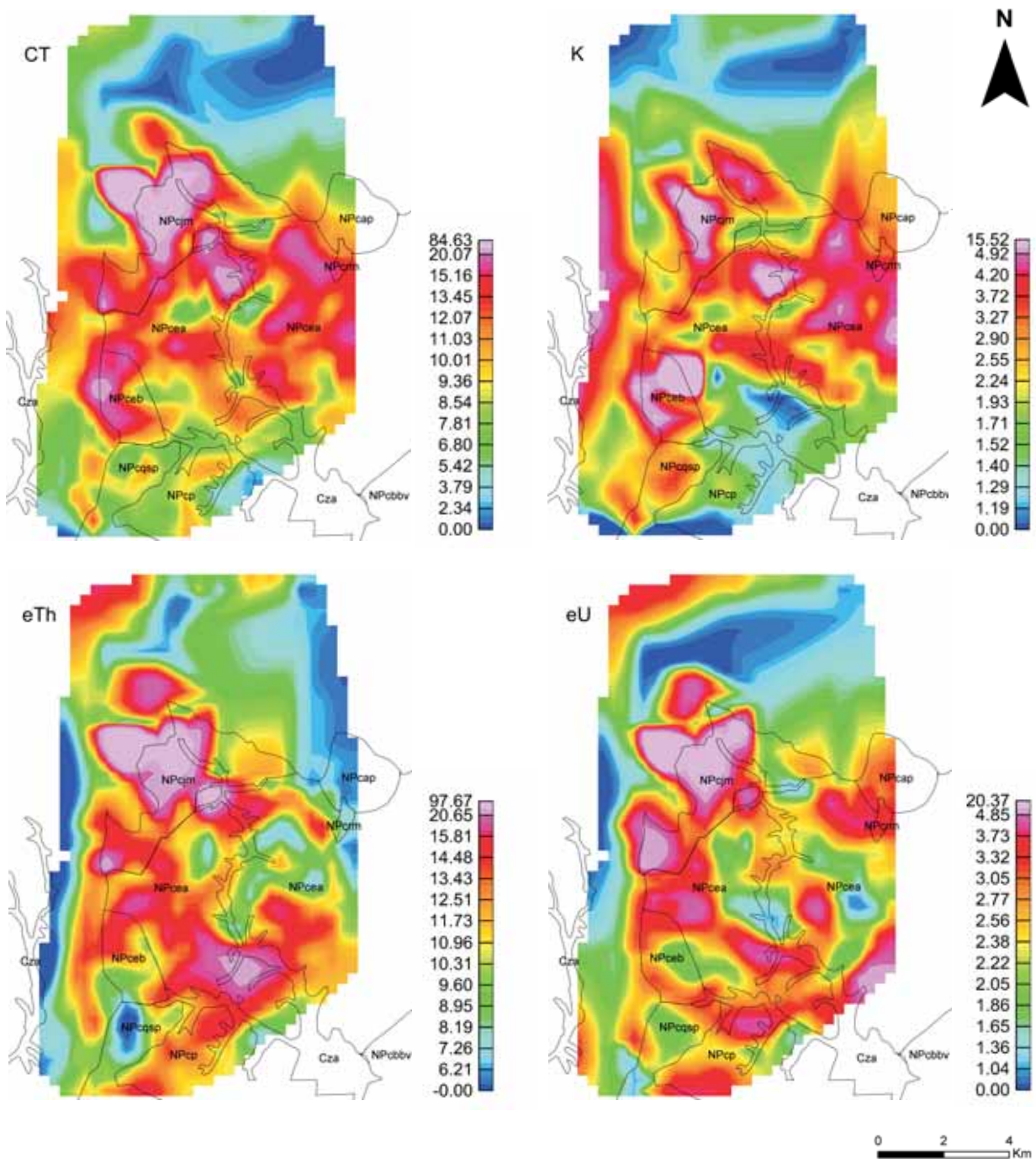


Figura 5. Mapas *color-scale* de Ct (contagem total), %K (porcentagem de K), eU e eTh (equivalentes de Th e U, em ppm). *Unidades no CGC (Neoproterozoico, NP):* **NPcjm.** Domínio petrográfico (Dp) Granito Joaquim Murtinho (equivalente a NPA IV; ver Figura 1); **NPcap.** Dp Arroio das Pedrinhas (equivalente a NPA II, Figura 1); **NPcrm.** Rochas metamórficas diversas; em parte, milonitos; **NPcea.** Dp Espigão Alto (equivalente a NPA I); **NPceb.** Dp Espalha Brasa (equivalente a NPA III); **NPcp.** Dp Pirai do Sul (equivalente a parte meridional de NPA I); **NPcosp.** Quartzito Serra das Pedras; **Cza.** depósitos aluvionares. A divisão do CGC em “domínios petrográficos”, aqui citados, foi adotada em Guimarães (2000), quando da realização de um trabalho mais abrangente de mapeamento do batólito, e equivale ao de “associação de fácies” adotada em Guimarães (1995).

quando comparados com a média registrada pelo GJM. As áreas em que o potássio é mais baixo representam os aluviões ou ainda o “Quartzito Serra das Pedras”, na parte sudeste da região.

O GJM apresenta também valores elevados de Th, em comparação com a área completa de estudo (Figura 5). Os granitoides desta região, entretanto, denotam acentuado enriquecimento em eTh (comparar com a média estimada de 10,5 ppm na crosta continental superior; Rudnick e Gao, 2004). Os valores máximos de eTh (acima de 20 ppm) correspondem, também, a medições pontuais, possivelmente registrando concentrações de minerais de Th. Nesse sentido, deve ser lembrado que o GJM (junto com o Granito Serra do Carambei, na parte SW do CGC), e áreas vizinhas, foi alvo de pesquisas para procura de minerais radioativos na década de 1970, tendo-se identificado bolsões com concentrações de thorita (ver referências bibliográficas em Guimarães, 1995, 2000).

Nas regiões mais intemperizadas, o Th deve estar presente em minerais resistentes, contidos no solo, e em parte deve ocorrer também como íon absorvido em hidróxidos etc., de Al, Fe, Mn e Ti, em argilominerais, e em outras substâncias. Outras regiões, com valores muito baixos de Th, podem representar áreas em parte cobertas por solo transportado, ou nas quais o elemento foi extraído mecanicamente, por transporte de coloides de vários tipos, em particular nos tratos com topografia mais acidentada. O “Quartzito Serra das Pedras” mostra contagens baixas.

A Figura 5 também indica as respostas do eU. O GJM, outra vez, apresenta os maiores teores, mas a região inteira de granitoides revela médias superiores (*Grids* 1, 2 e 3, respectivamente, com 3,36, 5,46 e 3,05 ppm de U, Figura 3). O caráter anômalo do GJM, em relação ao U, é mais destacado no mapa da região completa (Figura 5). Mesmo com forte intemperismo, o U, quando afetado por ele e mobilizado, deve ter ficado retido nos solos, absorvido em hidróxidos, coloides e outros compostos (Ulbrich et al., 2009, neste volume). Como esperado, a resposta é baixa sobre o “Quartzito Serra das Pedras”. Nas regiões com as associações *NPA I a III*, os valores são em geral mais baixos e, localmente, muito baixos ou inexistentes, indicando que os teores originais de U devem ter sido menores, mesmo lembrando que essas rochas também foram afetadas por intemperismo, com algum transporte do elemento e sua provável retenção em coloides, hidróxidos, argilominerais e outras substâncias.

Os valores de eU registrados no GJM claramente classificam este corpo como uma anomalia, lembrando que a média estimada de U na crosta continental superior é de 2,7 ppm (média de 1,3 ppm para toda a crosta continental; Tabela 1; Rudnick e Gao, 2004).

Por outra parte, deve ser ressaltado que algumas das áreas estudadas, com topografia mais plana, são objeto de intensa atividade agrícola (plantações de milho e soja) e portanto podem ter sido afetadas por sucessivas adições de fertilizantes (e.g., Souza e Ferreira, 2005; Becegato e Ferreira, 2005), que não deixam de ser fontes uraníferas, mesmo que em geral com teores bastante baixos, com possíveis interferências nas leituras efetuadas em campo (Ulbrich et al., 2009, neste volume).

Na Figura 6, são apresentados os mapas derivados eU/eTh, eTh/K, eU/K e do fator $F (= K \times eU/eTh)$. Embora o Th seja quase sempre mais abundante que o U, em granitoides, os incrementos de ambos os elementos, nessas rochas, mostram em geral correlação positiva; desta forma, existe certo paralelismo entre as áreas anômalas identificadas nos mapas de eU e eTh (Figura 5) e as que são ressaltadas no mapa eU/eTh (Figura 6). Da mesma maneira, são em boa parte coincidentes as regiões enriquecidas em K e em eTh e eU (Figura 5). Por este motivo, as anomalias de K, eU e eTh são convertidas em baixos valores nos mapas das razões eTh/K e eU/K, por efeito da divisão pelos elevados teores de K. A divisão por K gera no fator eU/K um incremento marcante (especialmente nas regiões com K empobrecido ou nulo, em decorrência da atribuição ao K de um valor mínimo arbitrário de 0,1%, ou similar, gerando assim valores altos da razão; Figura 6). Idêntico comportamento é observado no mapa da razão eTh/K, onde os menores índices oscilam entre 10 e 12, e os maiores superam 60; apenas os valores das razões estão aumentados, por aparecer o Th com teores maiores que o U nessas rochas.

Os mapas dos fatores normalizados Kd e Ud refletem, com menor intensidade, a distribuição dos elementos K e eU nos respectivos mapas dos elementos (Figuras 5 e 7). A sua interpretação, entretanto, é mais difícil. Assim, regiões carentes de K e eU (e.g., o Quartzito Serra das Pedras) aparecem marcadas por valores médios (positivos) de Kd e Ud. Os maiores valores de Kd e Ud correspondem à região ocupada pelo domínio petrográfico Espalha Brasa (Npceb, equivalente à associação NPA III; comparar Figura 1 com as Figuras 5 e 7). O GJM, como esperado, aparece identificado por valores médios (ainda positivos).

No caso do estudo do GJM, foi de grande interesse confeccionar o mapa ternário K-eTh-eU, que mostra a interação dos três elementos, claramente demarcando a área do maciço. Neste caso particular, o GJM concentra os maiores teores dos três elementos estudados, uma feição que é ressaltada neste mapa pela coloração branca (Figura 7). As outras regiões são de interpretação mais complexa neste mapa ternário, pois ela depende da contribuição relativa dos teores dos radionuclédeos.

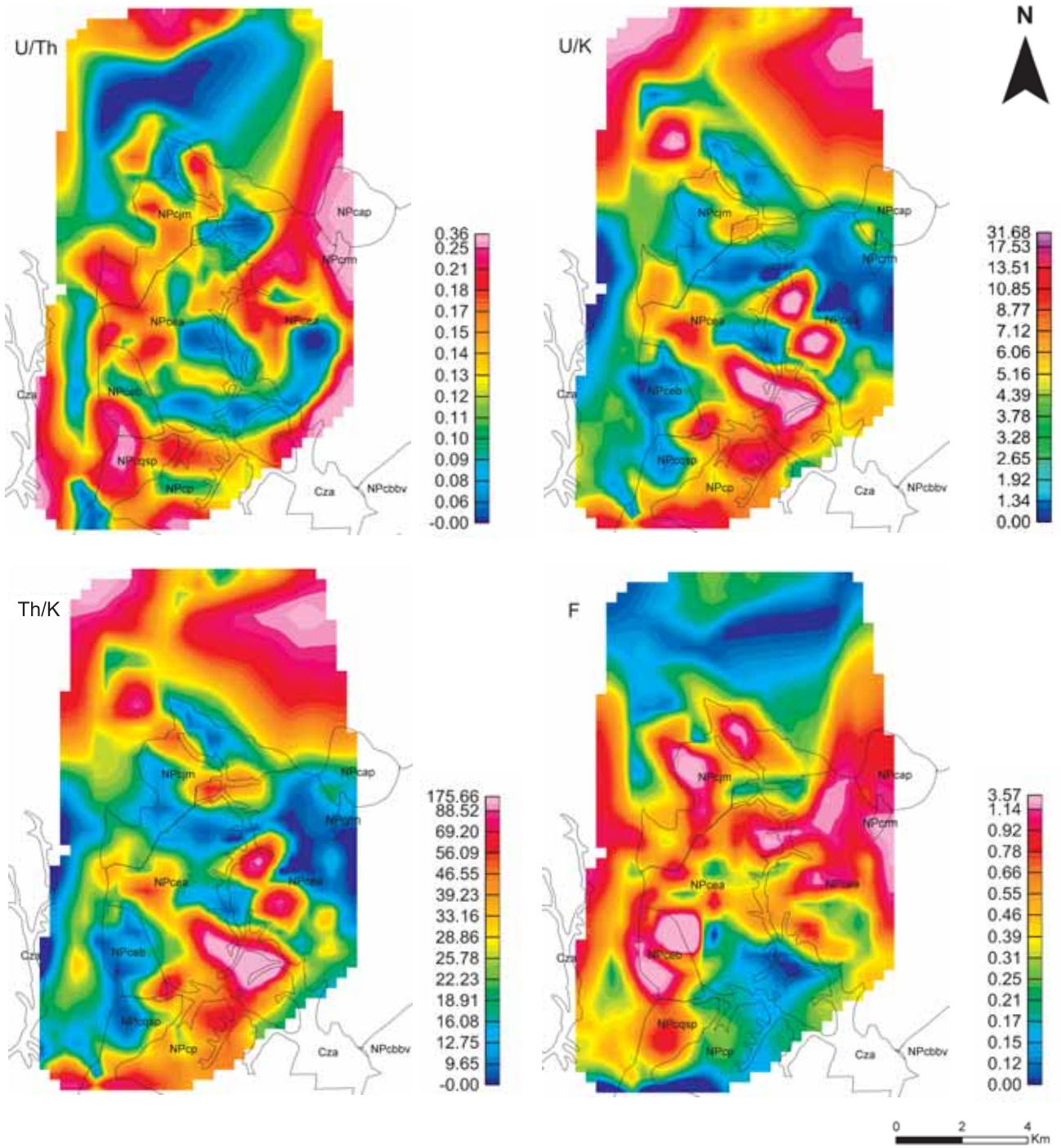


Figura 6. Ilustrações *color-scale* mostrando os mapas derivados eU/eTh, eU/K, eTh/K e do fator F (ver texto). Para unidades geológicas, ver legenda da Figura 5.

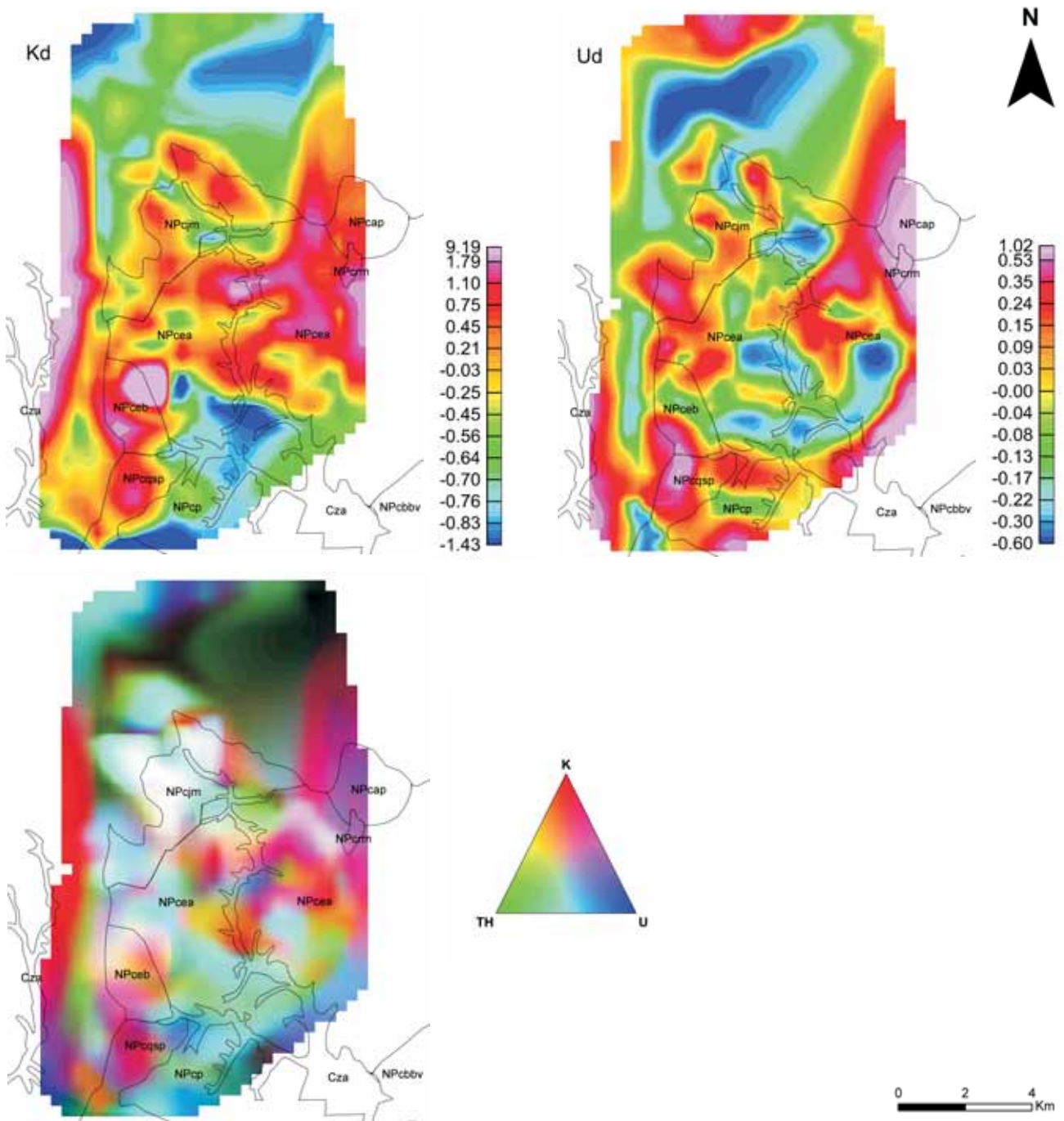


Figura 7. Ilustrações *color-scale* mostrando os mapas derivados dos fatores normalizados Ud e Kd, e o mapa ternário K-eTh-eU. Ver texto para comentários. Para unidades geológicas, ver legenda da Figura 5.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O GJM foi destacado, na literatura, como um granito “especializado”, mostrando alasquitos e claros sinais de enriquecimento em K, Th e U, razão pela qual foi objeto de estudos prévios para pesquisar a possibilidade de ser hospedeiro de jazidas, em especial de U e Th. Os três elementos indicados são radioativos, com complexas cadeias de decaimento, sendo que o ^{40}K , o ^{214}Bi (da cadeia de decaimento do ^{235}U) e o ^{208}Tl (decaimento do ^{232}Th) são os emissores de raios gama mais utilizados para as medições. Constitui o GJM, portanto, um alvo especial para testar as potencialidades dos levantamentos gamaespectrométricos para identificar e definir as anomalias positivas desses três elementos. Por outra parte, o marcado intemperismo presente na região (clima subtropical com fortes chuvas) introduz um “fator climático”, que deve afetar, em especial, as rochas granitoides, e apresentar o atributo de influenciar as respostas, ora pela possibilidade de lixiviação total ou parcial do K, via conversão dos minerais com K em caulinita, ora pela mobilização pelo menos parcial do Th e do U contido em minerais acessórios, por meio da formação de complexos nas águas intersticiais e absorção em gels, coloides, argilominerais e outras substâncias, e sua retirada por efeitos químicos (solubilidade em águas) e transporte por coloides etc. Os resultados obtidos, entretanto, mostram que mesmo nestas circunstâncias a gamaespectrometria mostrou ser ferramenta muito eficiente para isolar o GJM como uma área anômala para os três elementos; em particular, o mapa do potássio identifica o GJM como um maciço com pouca lixiviação do elemento, embora os afloramentos sejam bastante escassos, destacando-se também nesse sentido o mapa da contagem total e os de eTh e eU. Levantamentos gamaespectrométricos em rochas graníticas podem detectar variações faciológicas e, em particular, identificar os granitoides enriquecidos em K, Th e U, além de definir as áreas que foram afetadas por alteração hidrotermal (e.g., Fornazzari Neto e Ferreira, 2003, e bibliografia citada).

AGRADECIMENTOS

O presente projeto foi em parte financiado com auxílio da FAPESP (processo 01/07293-6, coordenador H. Ulrich). L. S. Alves e V. M. O. Martin agradecem o apoio do CNPq (bolsas Pibic-USP). F. J. F. Ferreira e G. B. Guimarães são gratos ao apoio e auxílios recebidos da UFPR, Mineropar, CNPq e UEPG. Discussões sobre temas do intemperismo com S. B. Oliveira e M. C. Toledo ajudaram em muito na compreensão dos processos. Os comentários de dois revisores foram especialmente relevantes para melhorar o texto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARMP. *Brazil Airborne Radiometric Mapping Project*. Rio de Janeiro: PWG – Paterson, Grant & Watson, Limited, CPRM- Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais, and Geological Survey of Canada, 1997. 18 p.
- BARRETTO, P. M. C.; AUSTERLITZ, C.; MALHEIROS, T.; LOVBORG, L. *Radioactive concrete sources at IRD/CNEN, Brazil, for the calibration of uranium exploration and environmental field instruments*. Rio de Janeiro: Instituto de Radioproteção e Dosimetria, 1986. 66 p. (IRD/DEX-3/CNEN, Relatório inédito).
- BECEGATO, V. A.; FERREIRA, F. J. F. Gamaespectrometria, resistividade elétrica e susceptibilidade magnética de solos agrícolas no noroeste do estrado de Paraná. *Revisita Brasileira de Geofísica*, v. 23, p. 371-406, 2005.
- CCGP (COMISSÃO DA CARTA GEOLÓGICA DO PARANÁ). *Folha geológica de Joaquim Murtinho*. Curitiba: CCGP, 1970a. Escala 1:70.000.
- CCGP (COMISSÃO DA CARTA GEOLÓGICA DO PARANÁ). *Folha geológica de Varzeão*. Curitiba: CCGP, 1970b. Escala 1:70.000.
- CLARKE, D. B. *Granitoid rocks*. London: Chapman & Hall, London, 1882. 283 p.
- CLEMENS, J. D.; HOLLOWAY, J. R.; WHITE, A. J. R. Origin of an A-type granite: experimental constraints. *American Mineralogist* v. 71, p. 317-324, 1986.
- COLLINS, W. J.; BEAMS, S. D.; WHITE, A. J. R.; CHAPPELL, B. W. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. v. 80, p. 189-200, 1982.
- CPRM (Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais). *Projeto aerogeofísico Serra do Mar Sul*. Rio de Janeiro: CPRM, 1978.
- EBY, G. N. Chemical subdivision of the A-type granitoids: petrogenetic and tectonic implications. *Geology* v. 20, p. 641-644, 1992.
- DICKSON, B. L.; SCOTT, K. M. Interpretation of aerial gamma-ray surveys - adding the geochemical factors. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, v. 17, n. 2, p. 187-200, 1997.

- FERREIRA, F. J. F. *Aerogamaespectrometria e aeromagnetometria de um trato ocidental do pré-Cambriano paulista*. 1991. 150 f. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, SP, 1991.
- FERREIRA, J. F. F.; FORNAZZARI NETO, L.; GUIMARÃES, G. B.; ALVES, L. S.; ULBRICH, H. H. G. J. A gamaespectrometria como ferramenta para identificar domínios petrográficos em granitóides: o exemplo dos complexos graníticos Cunhaporanga e Três Córregos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 43., 2006a, Aracaju. *Anais...* Aracaju: SBG, 2006a. p. 249.
- FERREIRA, J. F. F.; RIFFEL, S. B.; FRUCHTING, A.; GUIMARÃES, G. B.; ALVES, L. S.; ULBRICH, H. H. G. J. Os granitóides Joaquim Murtinho e Serra do Carambei, Complexo Granítico Cunhaporanga, Paraná: gamaespectrometria e a assinatura geoquímica do U e Th em granitóides evoluídos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 43., 2006b, Aracaju. *Anais...* Aracaju: SBG, 2006b. p. 258.
- FORNAZZARI NETO, L.; FERREIRA, F. J. F. Gamaespectrometria integrada a dados exploratórios multifonte em ambiente SIG aplicada à prospecção de ouro na Folha Botuverá, SC. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 33, p. 197-208, 2003.
- GEOFOTO S. A. *Fotogrametria, cartografia e aerogeofísica "Projeto Serra do Mar Sul – fase de aquisição de dados (Levantamento aeromagnetométrico e aerogamaespectrométrico Serra do Mar entre Santa Catarina e Paraná)"*. [Brasília]: MME/DNPM/CPRM, 1978a. (Relatório preliminar).
- GEOFOTO S. A. *Fotogrametria, cartografia e aerogeofísica "Projeto Serra do Mar Sul – fase de processamento de dados"*. [Brasília]: MME/DNPM/CPRM, 1978b. (Relatório final, texto e anexos).
- GNOJEK, I.; PRICHYSTAL, A. A new zinc mineralization detected by airborne gamma-ray spectrometry in northern Moravia (Czechoslovakia). *Geoexploration*, v. 23, p. 491-502, 1985.
- GRASTY, R. L. *A calibration procedure for an airborne gamma-ray spectrometer*. Ottawa: Geological Survey of Canada, 1976. p. 1-9. (*Canada Geological Survey Professional Paper*, 76-16).
- GRASTY, R. L.; SMITH, B. S.; MINTY, B. R. S. Developments in the standardization and analysis of airborne gamma ray data. In: EXPLORATION 97; DECENNIAL INTERNATIONAL CONFERENCE ON MINERAL EXPLORATION, 4., 1997, Toronto. *Proceedings...* Toronto, 1997. 15 p.
- GUIMARÃES, G. B. *O complexo granítico Cunhaporanga na região de Joaquim Murtinho, Pirai do Sul (PR): caracterização faciológica das rochas granitóides*. 1995. 144 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 1995.
- GUIMARÃES, G. B. *As rochas granitóides do complexo granítico Cunhaporanga, Paraná: aspectos geológicos, geofísicos, geoquímicos e mineralógicos*. 2000. 230 f. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 2000.
- GUIMARÃES, G. B.; ULBRICH, H. H. G. J. Redefinição e tipologia do Granito Joaquim Murtinho, Pirai do Sul (PR). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 39., 1996, Salvador. *Anais...* Salvador, SBG, 1996, p. 367-369. v. 6.
- GUIMARÃES, G. B.; FERREIRA, F. J. F.; ULBRICH, H. H. G. J.; FORLIN, M. The aerogeophysical project Serra do Mar Sul in the region of the Cunhaporanga granitic complex, Paraná, southern Brazil: analysis of the gamma-ray spectrometric survey. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 19, p. 3-16. 2001.
- IAEA (International Atomic Energy Agency). *Airborne gamma-ray spectrometer surveying*. Vienna: IAEA, 1991. 97 p. (*Technical Report Series*, 323).
- KEMP, A. I. S.; HAWKESWORTH, C. J. Granitic perspective on the generation and secular evolution of the continental crust. In: HOLLAND, H. D.; TUREKIAN, K. K. (Ed.). *Treatise on geochemistry*, Amsterdam: Elsevier, 2004. p. 349-410.
- LE MAITRE, R. W. (Ed.). *A classification of igneous rocks and glossary of terms*. Oxford: Blackwell, 1989. 193 p.
- MARQUES, L. S.; ERNESTO, M. 2004. O magmatismo toleítico da Bacia do Paraná. In: MANTESSO NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C. D. R.; BRITO NEVES, B. B. (Ed.). *Geologia do continente sul-americano*. São Paulo: Beca, 2004, p.265-279.
- MINTY, B. R. S. The fundamentals of airborne gamma-ray spectrometry. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, v. 17, n. 2, p. 39-50, 1997.
- MINTY, B. R. S.; LUYENDY, A. P. J.; BRODIE, R. C.

- Calibration and data processing for airborne gamma-ray spectrometry. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, v. 17, n. 2, p. 51-62, 1997.
- MISENER, D. J.; SINCLAIR, R.; MOURÃO, L. M. F. A new Brazil radiometric database generation and application. In: CONGRESSO INTERNACIONAL SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA, 5., 1997, São Paulo. *Expanded Abstracts...* São Paulo: SBGf, 1997. p. 564. v. 1.
- MORO, R. de P. X. M. *A Bacia ordoviciana do Grupo Castro – PR*. 157 f. 1993. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Unesp, Rio Claro, 1993.
- OSTROVSKIY, E. Ya. Antagonism of radioactive elements in wallrock alteration fields and its use in aerogamma spectrometric prospecting. *International Geological Review*, v. 17, p. 461-468, 1975.
- PICKUP, G.; MARKS, A. Identifying large-scale erosion and deposits processes from airborne gamma radiometrics and digital elevation models in a weathered landscape. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 25, p. 535-557, 2000.
- PIRES, A. C. B. Identificação geofísica de áreas de alteração hidrotermal, Crixás-Guarinos, Goiás. *Revista Brasileira de Geociências* 25, 61-68, 1995.
- PITCHER, W. S. *The nature and origin of granite*. London: Blackie Academic & Professional, 1993. 321 p.
- PRAZERES FILHO, H. J. *Litogeoquímica, geocronologia (U-Pb) e geologia isotópica dos complexos graníticos Cunhaporanga e Três Córregos, estado do Paraná*. 2000. 189 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- PRAZERES FILHO, H. J. *Caracterização geológica e petrogenética do Batólito Granítico Três Córregos (PR-SP): geoquímica isotópica (Nd-Sr-Pb), idades (ID-Tims/Shrimp) e δ^{18} em zircão*. 2005. 207 f. Tese (Doutoramento) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- RUDNICK, R.; GAO, S. Composition of the continental crust. In: HOLLAND H. D.; TUREKIAN, K. K. (Ed.): *Treatise on Geochemistry*. Amsterdam: Elsevier, 2004. p.1-64.
- SAUNDERS, D. F.; TERRY, S. A.; THOMPSON, C. K. Test of national uranium resource evaluation gamma-ray spectral data in petroleum reconnaissance. *Geophysics*, v. 52, p. 2001-2011, 1987.
- SAUNDERS, D. F.; BURSON, K. R.; BRANCH, J. F.; THOMPSON, C. K. Relation of thorium-normalized surface and aerial radiometric data to subsurface petroleum accumulations. *Geophysics*, v. 58, p. 1417-1427, 1993.
- SAUNDERS, D. F.; BRANCH, J. F.; THOMPSON, C. K. Tests of Australian aerial radiometric data for use in petroleum reconnaissance. *Geophysics*, v. 59, p. 411-419, 1994.
- SHIVES, R. B. K.; CHARBONNEAU, B. W.; FORD, K. L. The detection of potassic alteration by gamma-ray spectrometry – recognition of alteration related to mineralization. *Geophysics*, v. 65, p. 2001-2011, 2000.
- SOUZA, J. L.; FERREIRA, F. J. F. Anomalias aerogamaespectrométricas (K, eU, eTh) da quadrícula Araras (SP) e suas relações com processos pedogenéticos e fertilizantes fosfatados. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 23, n. 3, p. 251-274, 2005.
- SZABÓ, G. A. J.; ANDRADE, F. R. D.; GUIMARÃES, G. B.; CARVALHO, F. M. S.; MOYA, F. A. As jazidas de talco no contexto da história metamórfica dos metadolomitos do Grupo Itaiacoca, PR. *Geologia USP. Série Científica*, v. 5, p. 13-31, 2006.
- TREIN, E.; FUCK, R. A. O Grupo Castro. In: BIGARELLA, J. J.; SALAMUNI, R.; PINTO, V. M. (Ed.). *Geologia do pré-devoniano e intrusivas subseqüentes da porção oriental do estado do Paraná. Boletim Paranaense de Geociências*, v. 23/25, p. 257-305, 1967.
- ULBRICH, H. H. G. J.; VLACH, S. R. F.; JANASI, V. A. O mapeamento faciológico em rochas ígneas plutônicas. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 31, p. 163-172, 2001.
- ULBRICH, H. H. G. J.; ULBRICH, M. N. C.; FERREIRA, F. J. F.; ALVES, L. S.; GUIMARÃES, G. B.; FRUCHTING, A. Levantamentos gamaespectrométricos em granitos diferenciados. I: revisão da metodologia e do comportamento geoquímico dos elementos K, Th e U. *Geologia USP. Série Científica*, v. 9, n. 1, p. 33-53, 2009.