

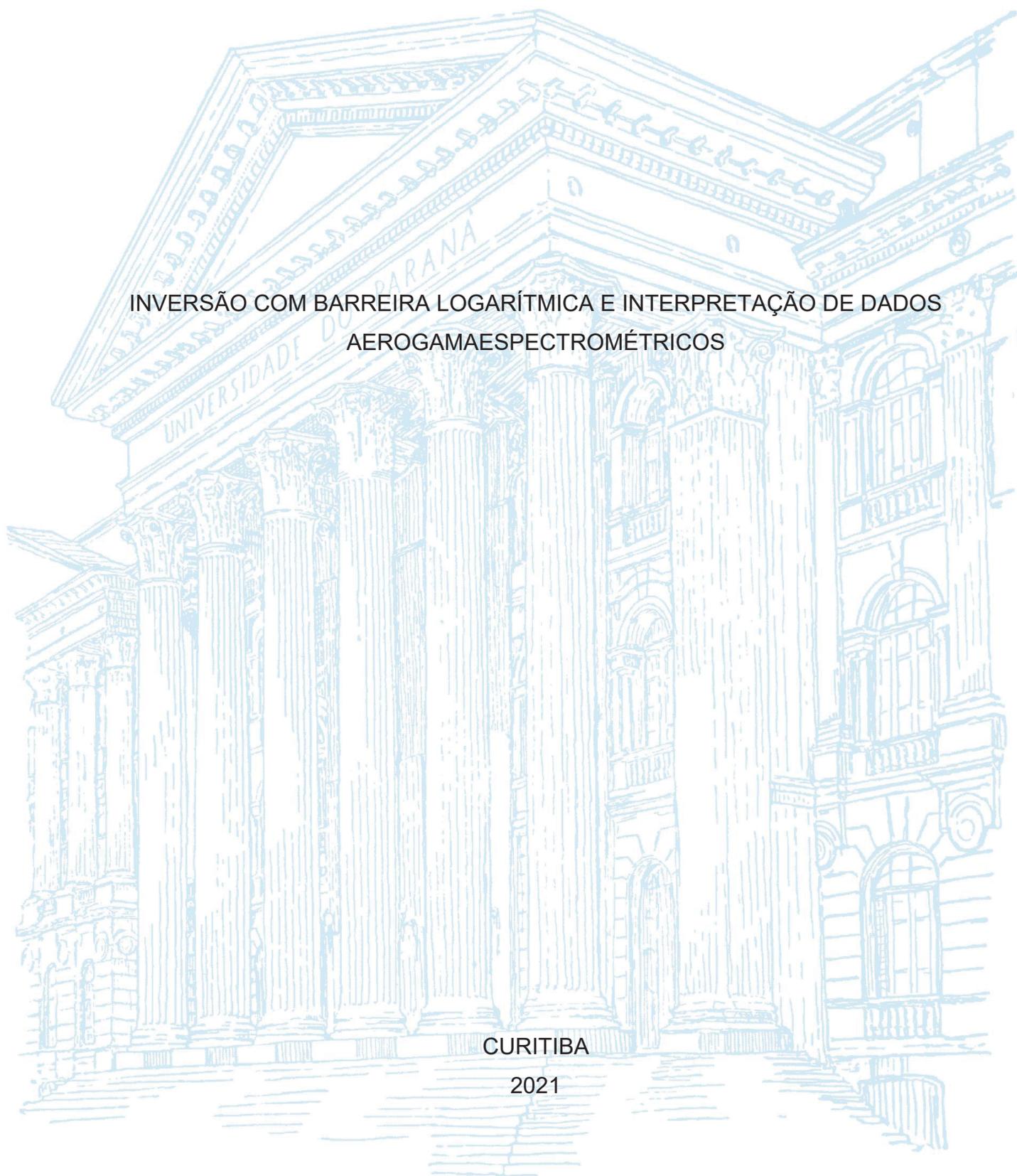
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JESSICA DERKACZ WEIHERMANN

INVERSÃO COM BARREIRA LOGARÍTMICA E INTERPRETAÇÃO DE DADOS
AEROGAMAESPECTROMÉTRICOS

CURITIBA

2021



JESSICA DERKACZ WEIHERMANN

INVERSÃO COM BARREIRA LOGARÍTMICA E INTERPRETAÇÃO DE DADOS
AEROGAMAESPECTROMÉTRICOS

CURITIBA

2021

JESSICA DERKACZ WEIHERMANN

INVERSÃO COM BARREIRA LOGARÍTMICA E INTERPRETAÇÃO DE DADOS
AEROGAMAESPECTROMÉTRICOS

Tese apresentada ao curso de Pós-Graduação em Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Francisco José Fonseca Ferreira (UFPR)

Coorientador: Prof. Dr. Saulo Pomponet Oliveira (UFPR)

Coorientadora: Prof^ª. Dra. Adalene Moreira Silva (UnB)

Coorientador no exterior: Prof. Dr. Yaoguo Li (Colorado School of Mines)

CURITIBA

2021

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

W419i

Weihermann, Jessica Derkacz
Inversão com barreira logaritmica e interpretação de dados
aerogamaespectrométricos [recurso eletrônico] / Jessica Derkacz
Weihermann. – Curitiba, 2021.

Tese - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra,
Programa de Pós-Graduação em Geologia, 2021.

Orientador: Francisco José Fonseca Ferreira – Coorientador: Saulo
Pomponet Oliveira - Coorientador: Adalena Moreira Silva – Coorientador:
Yaoguo Li

1. Espectrometria de raio gama. 2. Sistemas de informação geográfica. 3.
Aerogamaespectrometria. I. Universidade Federal do Paraná. II. Ferreira,
Francisco José Fonseca. III. Oliveira, Saulo Pomponet. IV. Silva, Adalena
Moreira. V. Li, Yaoguo. VI. Título.

CDD: 558.1621

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOLOGIA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **JESSICA DERKACZ WEIHERMANN** intitulada: **INVERSÃO COM BARREIRA LOGARÍTMICA E INTERPRETAÇÃO DE DADOS AEROGAMASPECTROMÉTRICOS**, sob orientação do Prof. Dr. FRANCISCO JOSÉ FONSECA FERREIRA, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 10 de Junho de 2021.

Assinatura Eletrônica

11/06/2021 08:21:12.0

FRANCISCO JOSÉ FONSECA FERREIRA
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

10/06/2021 18:11:22.0

ALESSANDRA DE BARROS E SILVA BONGIOLO
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

11/06/2021 17:37:45.0

JEFERSON DE SOUZA
Avaliador Externo (SECRETARIA DE ESTADO DA EDUCAÇÃO DO
PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

11/06/2021 05:34:35.0

DIONISIO UENDRO CARLOS
Avaliador Externo (VALE S. A.)

Assinatura Eletrônica

10/06/2021 21:10:30.0

LUIZ GUSTAVO RODRIGUES PINTO
Avaliador Externo (COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS
MINERAIS)

À Deus, aos meus pais e aos professores

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida, pela sabedoria e pelas oportunidades, sem Ele nada disso seria possível. Aos meus pais e familiares por todo apoio e dedicação. Agradeço aos meus orientadores: Francisco, Saulo, Adalene e Yaoguo pelas produtivas discussões, pela orientação, dedicação e pelos ensinamentos.

Agradeço à Universidade Federal do Paraná, ao Programa de Pós-Graduação e ao Departamento de Geologia. Agradeço também à Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo financiamento desta pesquisa no Brasil e no período de Sanduíche no exterior. Agradeço ao Serviço Geológico do Brasil (CPRM), CGG Veritas e o *Natural Resources Canada* por fornecerem os dados aerogeofísicos, principalmente os das pistas de calibração. Agradeço ao Alan de Souza Cunha pelo esforço em conseguir os dados da pista de calibração de Maricá. Agradeço ao apoio dos colegas do Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada (LPGA) pelas discussões e auxílio. Agradeço também a todos que de alguma forma colaboraram com esta pesquisa.

“Bem-aventurado o homem que acha sabedoria, e o homem que adquire conhecimento.” Provérbios 3:13.

RESUMO

O processamento gamaespectrométrico fornece informações sobre a composição de diferentes unidades geológicas através do mapeamento dos radioelementos potássio (K^{40}), urânio (U^{238}) e tório (Th^{232}). Antes de serem processados, os dados aerogamaespectrométricos (AGRS) devem ser submetidos a várias correções de rotina para calibrar o sistema (equipamentos, parâmetros de conversão), as quais, em geral, fornecem resultados satisfatórios. Na prática, mudanças abruptas da altura de voo (muitas vezes decorrentes de terrenos acidentados) não são raros e levam a problemas na interpretação das anomalias. A inversão dos dados AGRS não é frequentemente utilizada e melhora as respostas dos radionuclídeos (K, eU, e eTh), não sobrepondo leituras e suavizando os dados. Uma das consequências indesejáveis do processamento de dados gamaespectrométricos é o surgimento dos valores negativos de concentração, que são decorrentes do ruído e/ou do processamento, já que não existem valores negativos na natureza, e podem comprometer a interpretação quantitativa dos mapas de concentração de potássio, urânio e tório, sendo que a inversão por quadrados mínimos também podem fornecer modelos com valores negativos. Neste trabalho foi desenvolvido um algoritmo de inversão com barreira logarítmica (*log-barrier*) inédita para dados AGRS, e que permitiu suprimir os valores negativos sem interferir no sinal dos dados e contribuiu para o aumento da resolução da concentração dos radioelementos. Como a aquisição aerogamaespectrométrica envolve diversas variáveis (e.g, área de amostragem do detector (*field of view*), coeficientes de atenuação no ar e no solo e umidade do ar), foram escolhidas duas pistas de calibração dinâmica usadas para ajustar esses parâmetros: (i) Maricá, Rio de Janeiro, Brazil e (ii) Breckenridge, Ottawa, Canadá. Essas pistas são tipicamente usadas para calibrar os sistemas aéreos e constituem um ambiente controlado e com valores teóricos dos parâmetros bem documentados. Os resultados obtidos pela inversão com *log-barrier* suavizaram os dados em relação a rotina padrão, reduziram o ruído e eliminaram os valores negativos (correspondentes às sucessivas correções e/ou ao algoritmo de inversão). A inversão com *log-barrier* foi aplicada aos dados do Arco Magmático de Mara Rosa, localizada no Estado de Goiás, onde foi comparado dados AGRS processados pela rotina padrão e provenientes da inversão, sendo que os mapas invertidos apresentaram-se mais contínuos e mais interpretáveis para identificar feições de escala intermediária que coincidem com a geologia, e apresentaram valores positivos. Por fim, a análise de dados aerogamaespectrométricos pode ser complexa, e para facilitar a interpretação foi desenvolvida uma metodologia para identificar automaticamente unidades geológicas aplicando a classificação não supervisionada em imagens ternárias (R- K, G- eTh, B- eU).

Palavras-chave: 1. Aerogamaespectrometria 2. Inversão 3. Barreira Logarítmica 4. Área de amostragem do receptor. 5. Análise de dados AGRS

ABSTRACT

Gamma-ray spectrometry processing provides information about different geological units' composition by mapping potassium (K^{40}), uranium (U^{238}) and thorium (Th^{232}). Prior to processing, airborne gamma-ray spectrometric (AGRS) data undergo several routine corrections, which in general provide satisfactory results. In practice, abrupt changes in flight height (often arising from rugged terrain) are not uncommon and lead to problems in interpreting anomalies. On the other hand, AGRS data inversion is not widely used and improve the responses of the radionuclides (K, eU and eTh) without overlapping the readings and smoothing the data. One of the undesirable consequences of gamma-ray spectrometric data processing is the appearance of negative concentration values, which might arise from noise, from processing, or even from the least squares' inversion. These negative values, which are not present in nature, could compromise the quantitative interpretation from the potassium, uranium, and thorium maps. In this work it was developed an inversion algorithm with log-barrier (positivity constraint) to AGRS data, which suppresses the negative values without interfering in the data signal and contribute to the high resolution of the radioelement's concentration. Since the airborne gamma-ray spectrometry acquisition is complex and involves several parameters (e.g., field of view of the detector, air and ground attenuation coefficients, and air humidity), two dynamic calibration ranges have been chosen to adjust these parameters: (i) Maricá, Rio de Janeiro, Brazil, and (ii) Breckenridge, Ottawa, Canada. These sites are typically used to calibrate the airborne systems and constitute controlled environments with well-documented theoretical values for the parameters. The obtained results from inversion with log-barrier were smoothed in comparison with the standard processing routine, the noise was reduced, and the negative values suppressed (from the successive corrections and/or the least squares inversion). The log-barrier inversion was applied to the Mara Rosa Magmatic Arc data, located in the Goiás State, Brazil, and compared with the concentration data obtained by the standard processing. The inverted maps were more continuous, more interpretable to identify intermediate scale features that correspond to the geology and showed positive values. Finally, the analysis of AGRS data can be complex, and to facilitate the interpretation a method has been developed to automatically identify geological units by applying unsupervised classification in ternary images (R- K, G-eTh, B- eU).

Keywords: 1. *Airborne gamma-ray spectrometry* 2. *Inversion* 3. *Log-Barrier* 4. *Field of view*. 5. *Analysis of AGRS data*

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Mapa de localização da área estudo (área de Mara Rosa em vermelho), indicando a área do aerolevanteamento em cinza.	11
FIGURA 2 – Mapa geológico regional da porção norte da Província Tocantins no Brasil Central, com a área de estudo representada em vermelho.	12
FIGURA 3 – Mapa geológico do Arco Magmático de Mara Rosa. 1 – Granitos Sin-Pos tectônicos; 2- Gabro-dioritos; 3 - Ortognaisse-Biotita gnaisse; 4 – Sequência Metavulcano – sedimentar.	14
FIGURA 4 – Variação das concentrações de K, eU e eTh de rochas ígneas com o incremento de Si.	19
FIGURA 5 – Ilustração de uma aquisição aerogamaespectrométrica com representação do canal do potássio.	23
FIGURA 6 – Espectro típico de raios gama aéreos, com as janelas de energia de cada radioelemento indicadas.	24
FIGURA 7 – Espectro aerogamespectrométrico medido. (a) Potássio, (b) Urânio e (c) Tório. É possível notar a interferência nas janelas entre os três espectros.	26
FIGURA 8 – Fatores que influenciam nas leituras do detector gamaespectrométrico e as correções aplicadas aos dados.	28
FIGURA 9 – Representação esquemática da interação entre as janelas energéticas de K, U e Th, indicando as razões de <i>stripping</i> usadas para remover a interferência das janelas.	33
FIGURA 10 – Problema direto e inverso.	39
FIGURA 11 – Representação esquemática da radiação gama de um feixe. (a) As linhas pontilhadas representam as linhas de voo, $[0, L] \times [-w, w]$ é a seção transversal onde w é a meia-largura das fontes, baseado na largura de um feixe de um detector em movimento, ds é a área da seção transversal infinitesimal e $h = h_1$ é a altura de voo. (b) θ é o ângulo direcional de sensibilidade da radiação gama, h_2 é a profundidade que os raios penetraram na fonte, μ_1 and μ_2 são os coeficientes de atenuação no ar e no solo, e r = distância entre o detector e o solo.	40

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

AGRS – Aerogamaespectrométricos

Bi – Bismuto

BIC – *Bayesian information criterion*

cps – Contagem por segundo

CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – Serviço Geológico do Brasil

eU – equivalente em Urânio

eTh – equivalente em Tório

GMMs – *Gaussian mixture models*

IAEA – *International Atomic Energy Agency*

K – Potássio

m – Metros

MNF – *Maximum noise fraction*

NASVD - *Noise-adjusted singular value decomposition*

Na – Sódio

PCA – *Principal component analysis*

ppm – Partes por milhão

Rn – Radônio

SEG – *Society of Exploration Geophysicists*

Tl – Tálho

Th – Tório

U – Urânio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	11
1.2	CONTEXTO GEOLÓGICO	12
1.3	JUSTIFICATIVAS E OBJETIVOS	14
1.4	ESTRUTURA DA TESE	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	GAMAESPECTROMETRIA	16
2.1.1	Geoquímica dos radioelementos	17
2.1.2	Distribuição dos radioelementos em rochas e solos	19
2.1.3	Radioelementos associados com alterações hidrotermais	20
2.1.4	Aquisição de dados aerogamaespectrométricos	22
2.1.4.1	Calibração dos equipamentos	26
2.1.4.2	Pista de calibração dinâmica	27
2.1.5	Processamento de dados aerogamaespectrométricos	28
2.1.5.1	Redução de ruído	28
2.1.5.2	Correção do tempo morto	29
2.1.5.3	Correção da radiação de fundo da aeronave e cósmico	29
2.1.5.4	Remoção da radiação de fundo do radônio	30
2.1.5.5	Cálculo da altura efetiva de voo	32
2.1.5.6	Correção do efeito Compton ou <i>Stripping</i>	32
2.1.5.7	Correção altimétrica	34
2.1.5.8	Conversão para concentração de elementos	34
2.1.5.9	Interpolação	35
2.1.5.10	Mapas básicos e transformados	35
2.2	ANÁLISE DE DADOS	36
2.2.1	Classificação não supervisionada	37
2.2.2	Classificação supervisionada	38
2.3	INVERSÃO DE DADOS GAMAESPECTROMÉTRICOS	39
3	MATERIAL E MÉTODOS	43
3.1	GAMAESPECTROMETRIA	44
3.1.1	Processamento padrão	44
3.2	INVERSÃO	44

3.3	CLASSIFICAÇÃO NÃO SUPERVISIONADA	45
4	ARTIGOS	45
4.1	INTRODUÇÃO A TEMÁTICA DOS ARTIGOS	45
4.2	ARTIGO I - <i>A LOG –BARRIER APPROACH FOR AIRBORNE GAMMA-RAY SPECTROMETRY INVERSION</i>	46
4.3	ARTIGO II - <i>RETRIEVING GEOLOGICAL UNITS WITH UNSUPERVISED CLUSTERING OF GAMMA-RAY SPECTROMETRY DATA</i>	61
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	71
6	TRABALHOS FUTUROS.....	73
	REFERÊNCIAS.....	74
	ANEXO 1 – RESUMO EXPANDIDO SUBMETIDO EM CONGRESSO.....	80
	RESUMO I - <i>AIRBORNE GAMMA-RAY SPECTROMETRY INVERSION: CASE STUDY AT MARA ROSA MAGMATIC ARC, BRAZIL</i>	81

1 INTRODUÇÃO

A aquisição de dados aerogeofísicos é essencial para o mapeamento geológico e exploração mineral, já que auxilia no reconhecimento da assinatura de estruturas e litotipos em superfície e subsuperfície em grandes áreas, e em intervalos de tempo relativamente curtos, e que muitas vezes não são visíveis.

A gamaespectrometria fornece informações sobre a composição de diferentes unidades geológicas através do mapeamento dos radioelementos K^{40} , U^{238} e Th^{232} . Antes de serem processados, os dados aerogamaespectrométricos (AGRS) são submetidos a várias correções de rotina, as quais, em geral, fornecem bons resultados já consolidados na literatura (Grasty, 1979; Wilford et al., 1997; Wilford, 2002; Minty, 1997; Dickson & Scott, 1997; IAEA, 1991; IAEA, 2003). Na prática, desvios como mudanças abruptas da altura de voo (muitas vezes decorrentes de terrenos acidentados) não são raros e levam a problemas na interpretação das anomalias (Druker, 2017; IAEA, 2003).

A correção altimétrica ponto a ponto, praticada nos dados AGRS, não leva em consideração a área efetivamente amostrada durante um levantamento (*field of view*), ou seja, a base de um tronco de cone, cujo diâmetro varia com a altura de voo (o topo é constante e equivale ao diâmetro do sensor) (Grasty et al., 1979; Dentith & Mudge, 2014). Portanto, a rotina padrão de correção altimétrica implica em erros que se refletem nas contagens medidas, sobretudo por desprezar a sobreposição dos círculos amostrais ao longo das linhas de voo, e nas transformações subsequentes em concentrações. Técnicas clássicas de inversão que contemplam a atenuação do sinal como função da altura de voo (e.g. Tammenmaa et al., 1976; Gunn, 1978; Crosley & Reid, 1982; Schwarz et al., 1992) vêm sendo retomadas recentemente (Billings et al., 2003; Minty & Brodie, 2015; Druker, 2017). A modelagem de dados AGRS é fundamentada em trabalhos clássicos da física (Kogan et al., 1971) e em ensaios experimentais que permitiram determinar valores típicos dos parâmetros físicos envolvidos (Løvborg & Kirkegaard, 1975; Grasty, 1979; Grasty et al., 1979; Grasty et al., 1991), além de avaliar teoricamente os números de contagens por segundos no detector aerogamaespectrométrico. Neste trabalho calibramos o algoritmo de inversão usando duas pistas de calibração dinâmica, pista de Maricá localizada no Rio de Janeiro, Brasil, e pista de Breckenridge, localizada em Ottawa, Canadá.

Uma das consequências indesejáveis do processamento de dados gamaespectrométricos é o surgimento de valores negativos de concentração, que são decorrentes do ruído e/ou do processamento, já que não existem valores negativos na natureza, e podem comprometer a interpretação quantitativa dos mapas de concentração de potássio, urânio e tório. Geralmente em baixas contagens é difícil avaliar o ruído, e a medida que as correções vão sendo aplicadas nos dados, valores negativos podem ser produzidos (Killeen et al., 2015). Para estimar os erros do sistema aerogamaespectrométrico, esses valores negativos devem ser levados em conta, para uma análise estatística, que fornece informações sobre as sucessivas correções a que esses dados são submetidos (e.g., tempo morto, efeito compton, sensibilidade) (Grant, 1998). A inversão por quadrados mínimos também pode fornecer modelos com valores negativos.

Para suprimir os valores negativos na inversão sem interferir no sinal dos dados, existem diversas metodologias que podem ser aplicadas adicionando restrições no sistema de quadrados mínimos (Renner, 1993) e mapeando os parâmetros limitados para um domínio ilimitado (Commer & Newman, 2008; Wang et al., 2015). A barreira logarítmica já foi aplicada na inversão de dados de polarização induzida onde os autores obtiveram resultados satisfatórios (Li & Oldenburg, 2000). O método da barreira logarítmica permite encontrar uma solução através da resolução de uma sequência de problemas não lineares (Li & Oldenburg, 2000; Necedal & Wright, 2006). A aplicação da barreira logarítmica em dados aerogamaespectrométricos é inédita, e foi objeto desta pesquisa.

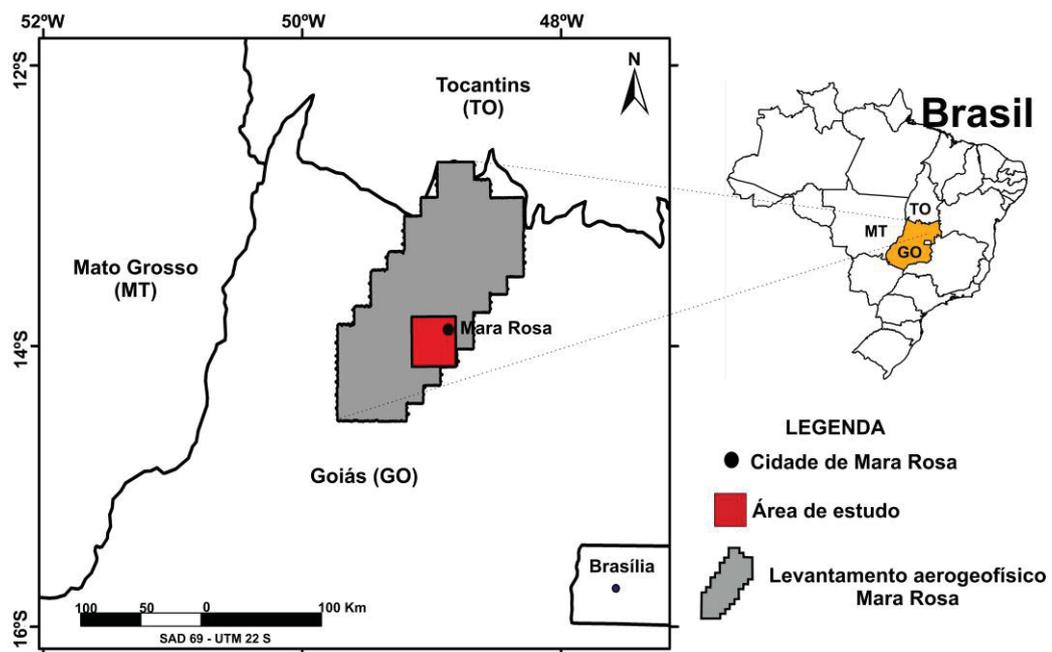
A interpretação de dados aerogamaespectrométricos é geralmente realizada por intérpretes especializados, requer habilidade e treinamento visual, e pode consumir muito tempo. A análise estatística multivariada têm sido aplicada em gamaespectrometria e permite agrupar dados semelhantes, facilitando assim a interpretação (Harris, 1989; Pires & Harthill, 1989; Pires, 1990; IAEA, 2003; Eberle & Paasche, 2012). Nesse estudo foi utilizada a classificação não supervisionada e a classificação orientada a objeto, que foi pouco usada em dados AGRS, nas variáveis de potássio, urânio e tório para obter automaticamente unidades geológicas do Arco Magmático de Mara Rosa. A aplicação da classificação não supervisionada aos dados AGRS permitiu a diferenciação das unidades geológicas distintas dentro de um mesmo Complexo ou Grupo geológico.

A proposta da presente pesquisa foi aplicar técnicas que foram pouco exploradas em dados aerogamaespectrométricos, principalmente a inversão. Ressalta-se que a aplicação da inversão com restrição de positividade em dados aerogamaespectrométricos é inovadora. Para aplicar a metodologia proposta na pesquisa, foi selecionada uma área de estudo, localizada no Estado de Goiás (FIGURA 1), no Arco Magmático de Mara Rosa, que é conhecida por importantes jazimentos minerais associados ao hidrotermalismo. A gamaespectrometria desempenha um papel relevante na pesquisa de depósitos minerais associados a alterações hidrotermais e possibilita a identificação de áreas alteradas hidrotermalmente e a exploração de suas relações com processos de mineralização de ouro e prata, além de metais base (Cu-Pb-Zn), em vários ambientes geológicos (Fornazzari & Ferreira, 2003). Shives et al. (2000) documentaram o uso da gamaespectrometria para detectar e mapear alterações potássicas.

1.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está situada no Estado de Goiás (FIGURA 1), no Arco Magmático de Mara Rosa, e possui uma cobertura aerogeofísica de alta resolução espacial.

FIGURA 1 – Mapa de localização da área estudo (área de Mara Rosa em vermelho), indicando a área do aerolevantamento em cinza.



FONTE: A autora (2021).

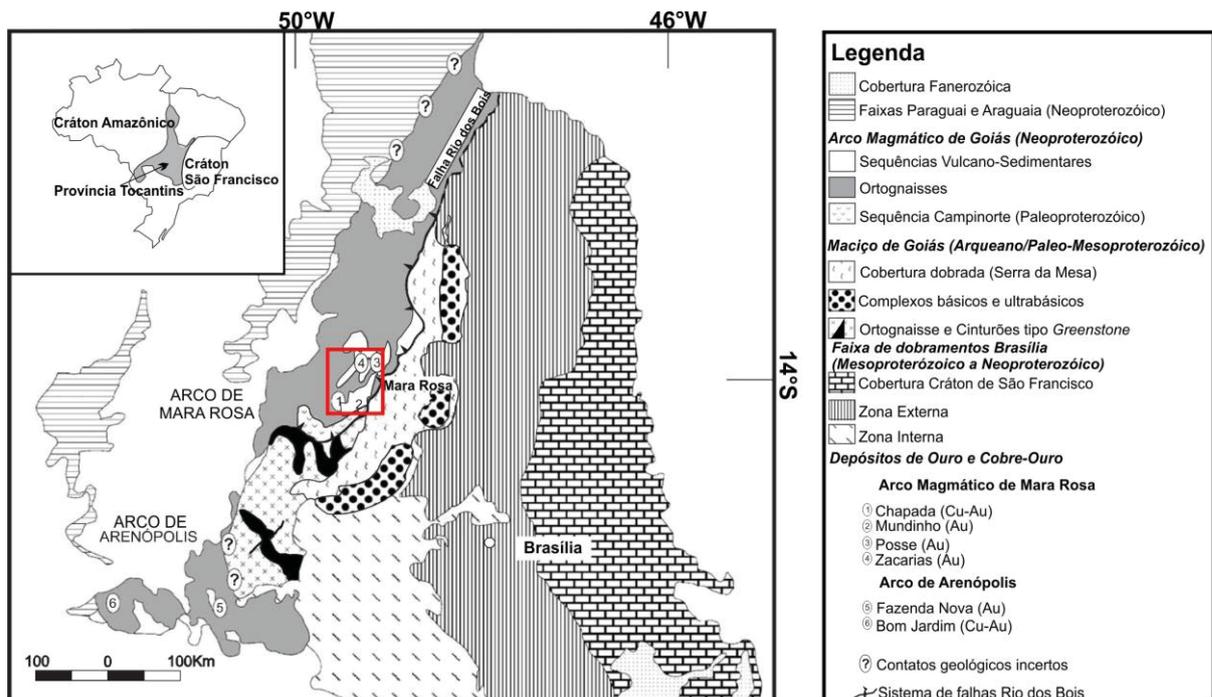
1.2 CONTEXTO GEOLÓGICO

A Província Estrutural do Tocantins corresponde a uma grande zona orogênica neoproterozoica (Brasiliano/Pan-Africano) desenvolvida entre dois grandes blocos continentais: Cráton Amazônico a oeste e Cráton São Francisco, a leste. A porção oriental da província é ocupada pela Faixa Brasília (FIGURA 2). A Faixa Brasília compreende diferentes unidades geológicas e compartimentos tectônicos, e pode ser dividida em duas sub-regiões, Zona Externa e Zona Interna (Fuck et al., 1993; Fuck, 1994; Valeriano et al., 2008; Pimentel, 2016).

A Zona Externa compreende o embasamento Paleoproterozoico e sequências de margem continental passiva adjacentes ao Cráton São Francisco. A Zona Interna é composta pelo Maciço de Goiás e o Arco Magmático de Goiás.

O Maciço de Goiás é composto pelo Terreno Arqueano-Paleoproterozoico, rochas metassedimentares do Grupo Serra da Mesa, complexos máfico-ultramáficos acamadados de Barro Alto, Niquelândia e Cana Brava e sequências metavulcano-sedimentares associadas (FIGURA 2). O Arco Magmático de Goiás é uma faixa de acreção crustal Neoproterozoica, sendo subdividido em Arco de Arenópolis e Arco de Mara Rosa, nas porções meridional e setentrional, respectivamente (FIGURA 2) (Pimentel et al., 1991; Pimentel & Fuck, 1992; Pimentel, 2016).

FIGURA 2 – Mapa geológico regional da porção norte da Província Tocantins no Brasil Central, com a área de estudo representada em vermelho.



Fonte: Adaptado de Oliveira et al. (2004).

O Terreno Arqueano-Paleoproterozoico de Goiás se estende por aproximadamente 50.000 km², limitado ao norte pelo Arco Magmático de Mara Rosa e ao sul está sotoposto, por falha de empurrão, a rochas metassedimentares da Sequência Serra Dourada e por rochas metavulcanossedimentares do Arco Magmático de Arenópolis (Jost et al., 2014). É constituído aproximadamente por 30% de seqüências vulcano-sedimentares do tipo *greenstone belt* e em torno de 70% por rochas granito-gnáissicas, formando assim um terreno típico de granito-*greenstone* (Almeida et al., 1977; Danni et al., 1981; Jost & Oliveira, 1991; Kuyumjian & Jost, 2006).

O Arco Magmático de Goiás se estende por mais de 1.000 km nas porções oeste e norte do Estado de Goiás, e no Estado de Tocantins, desaparecendo sob a Bacia do Parnaíba. Duas áreas maiores são identificadas em maior detalhe, os arcos de Arenópolis e Mara Rosa, nas porções meridional e setentrional, respectivamente (FIGURA 2) (Pimentel & Fuck, 1992; Pimentel et al., 1997).

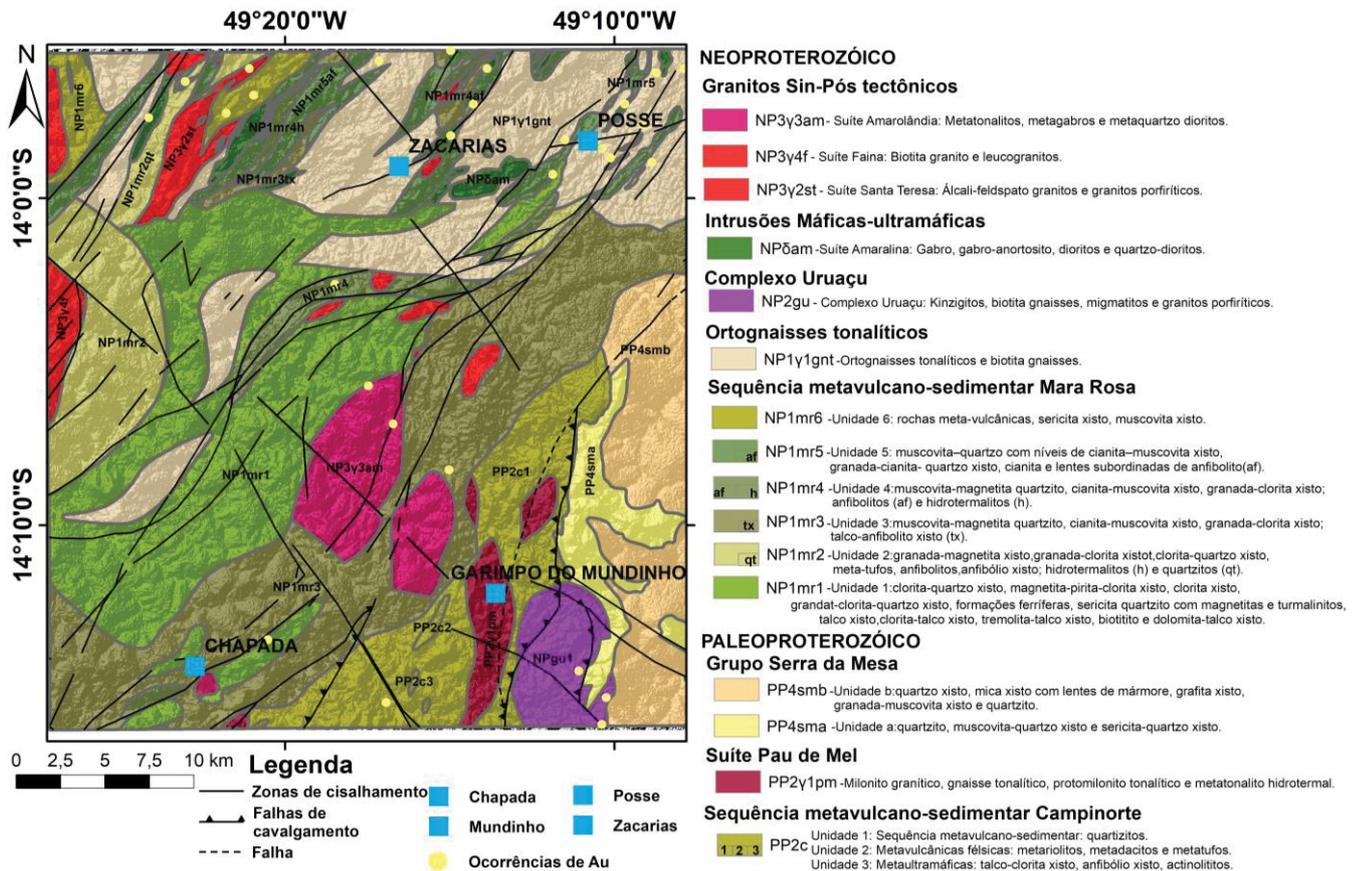
A região do Arco de Mara Rosa, localizada na porção NW do Estado de Goiás é dominada por extensos platôs, com altitudes em torno de 400 m, desenvolvidos durante o ciclo geomorfológico Velhas. Ainda no estágio de maturidade desse ciclo, perfis lateríticos completos e espessos teriam dominado a paisagem da região (Porto & Hale, 1996).

O Arco de Mara Rosa (FIGURA 3) consiste de faixas vulcano-sedimentares alongadas, com direção NNE, individualizadas por ortognaisses de composição predominantemente tonalítica (Arantes et al., 1991; Pimentel et al., 1997; Palermo et al., 2000). As seqüências supracrustais incluem volume expressivo de rochas metavulcânicas máficas, além de representantes intermediários a félsicos, intercalados a rochas metassedimentares de natureza detrítica e química. As paragêneses minerais com granada, estaurolita e cianita indicam condições de metamorfismo de fácies xisto verde alto a anfibolito (Della Giustina, 2007).

O Arco de Mara Rosa contém importantes depósitos de Au (Posse, Zacarias, Mundinho) e Cu-Au (Chapada) (FIGURA 3). Os depósitos de ouro e ouro-cobre ocorrem em quatro principais associações: i) Au-Ag-Ba (e.g. Depósito Zacarias), sendo interpretado como do tipo vulcanogênico estratiforme (Poll, 1994); ii) Cu-Au (e.g. Depósito Chapada), interpretado como depósito do tipo vulcanogênico (Kuyumjian, 1989), ou pórfiro (Richardson et al., 1986); iii) Au (e.g. Depósito Posse), interpretado como epigenético disseminado controlado por uma zona de cisalhamento (Palermo et

al., 2000); e iv) Au-Cu-Bi (e.g. Ocorrência Mundinho), considerado como depósito venular controlado por dioritos ricos em magnetita (Silva et al., 2007).

FIGURA 3 – Mapa geológico do Arco Magmático de Mara Rosa. 1 – Granitos Sin-Pos tectônicos; 2- Gabro-dioritos; 3 - Ortognaisse-Biotita gnaisse; 4 – Sequência Metavulcano – sedimentar.



Fonte: Adaptado de Alvarenga et al. (2007) e Moreira et al. (2008).

1.3 JUSTIFICATIVAS E OBJETIVOS

A inversão de dados geofísicos é muito utilizada (e.g., magnetométricos, gravimétricos, resistivimétricos, de polarização induzida, etc.), e permite a criação de modelos, onde os parâmetros são estimados automaticamente com base nos dados observados.

A inversão de dados aerogamaespectrométricos não é amplamente utilizada, e pode melhorar as respostas dos radionuclídeos (K, eU, e eTh), não sobrepondo leituras e suavizando os dados. As correções aplicadas aos dados gamaespectrométricos não contabilizam a área efetiva de amostragem de um levantamento, principalmente as sobreposições dos *field of views* (áreas de amostragem) do detector. Um detector não tem um *field of view* fixo, já que depende

do diâmetro do sensor e da altura de voo e pode receber radiação de qualquer ângulo, o que pode resultar na sobreposição das áreas de amostragem (Grasty et al., 1979). A inversão suprime essas sobreposições e considera todo o *field of view*, ao contrário da correção de sensibilidade ponto a ponto.

A correção de sensibilidade é aplicada ponto a ponto, apesar do *field of view* de um detector aéreo ser um círculo com até 700 m de diâmetro no solo, dependendo da altura do detector (Minty & Brodie, 2015). A inversão de dados aerogamespectrométricos considera a atenuação do sinal gamaespectrométrico com a diminuição da distância fonte-detector (altura de voo), a distribuição das fontes radiométricas no solo e a resposta do detector. Para cada ponto de observação acima do feixe, as contagens gamaespectrométricas são dadas pelo somatório dos pontos de contribuição das fontes, dentro do *field of view* do detector.

Métodos de barreira, como o *Log-Barrier* nunca haviam sido aplicados em inversão aerogamaespectrométrica, sendo um avanço importante, já que não são considerados valores negativos decorrentes do ruído, das sucessivas correções que os dados são submetidos, assim como da própria inversão. A aplicação do *Log-Barrier* em dados AGRS se mostrou eficiente e foi realizada em dados de pistas de calibração, que são ambientes controlados teoricamente (Weihermann et al., 2021a).

A interpretação de dados AGRS depende da precisão visual e da qualificação do geólogo ou geofísico. A classificação não supervisionada permite agrupar variáveis similares nos dados AGRS, porém os métodos usados para o agrupamento, geralmente *k-means*, requer a definição do número de classes de entrada pelo usuário, o que muitas vezes pode levar a erros. Para definir o número de classes ideal foi utilizada o critério de seleção bayesiano (*Bayesian information criterion - BIC*) em conjunto com o modelo de mistura gaussiana (*Gaussian Mixture Models - GMMs*), que foi pouco explorado em dados AGRS (Weihermann et al., 2021b).

O principal objetivo da presente pesquisa consistiu em aplicar técnicas pouco exploradas no método gamaespectrométrico, como a inversão e o mapeamento automático de unidades geológicas através da classificação não supervisionada. Essas técnicas foram aplicadas no Arco Magmático de Mara Rosa.

1.4 ESTRUTURA DA TESE

A tese é dividida em seis capítulos. O Capítulo 1 é composto pela introdução a temática da pesquisa, contexto geológico, caracterização do problema e objetivos

da pesquisa. O Capítulo 2 traz uma revisão teórica do método gamaespectrométrico. O Capítulo 3 apresenta os materiais e os métodos usados na pesquisa.

O Capítulo 4 apresenta os resultados das técnicas aplicadas, e são apresentados no formato de artigos científicos. O Artigo I apresenta a inversão de dados aerogamaespectrométricos, com destaque para a aplicação da barreira logarítmica (*Log-Barrier*), inédito em dados AGRS. O Artigo II apresenta a aplicação da classificação não supervisionada baseada na classificação orientada a objeto para obter automaticamente unidades geológicas do Arco Magmático de Mara Rosa. No Capítulo 5 são apresentados de maneira sumarizada os resultados da pesquisa. Ao final, no Capítulo 6, é discutido o trabalho que está em andamento, sendo que no Anexo I está disposto um resumo expandido resultante desta etapa da pesquisa aceito no encontro anual (2021) da SEG (*Society of Exploration Geophysicists*) que mostra a metodologia de inversão apresentada nesta tese aplicada a dados em planta, no Arco Magmático de Mara Rosa, e será estruturado como um artigo a ser submetido a revista *Geophysics*.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 GAMAESPECTROMETRIA

O método gamaespectrométrico mede a abundância relativa ou a concentração de potássio (K), urânio (U) e tório (Th) em rochas e materiais intemperizados de até 30-45 cm de profundidade, através da detecção da radiação gama emitida pelo decaimento radioativo natural destes isótopos (Dickson & Scott, 1997; Gunn, 1997; Minty, 1997; Wilford et al., 1997; Wilford, 2002). Como os elementos ^{238}U e ^{232}Th não emitem radiação gama, são utilizados, respectivamente, os isótopos ^{214}Bi e ^{208}Tl , respectivamente, para a quantificação da radiação gama, pelo que são referidos como equivalente de urânio equivalente (eU) e equivalente de tório (eTh).

A desintegração de elementos radioativos pode liberar energia através da emissão de partículas alfa (α), beta (β) e radiação gama (γ). Essa desintegração é gerada pela instabilidade dos núcleos dos átomos desses isótopos sob as condições naturais.

As principais fontes de radiação gama provêm da desintegração radioativa do potássio 40 (^{40}K), urânio 238 (^{238}U) e tório 232 (^{232}Th). A radioatividade total é obtida

através da medida de todos os raios gama detectados pelo gamaespectrômetro dentro da janela energética estabelecida para a contagem total (Grasty et al., 1985).

Potássio, urânio e tório são os únicos elementos de ocorrência natural com radioisótopos que produzem raios gama (direta ou indiretamente) com energia e intensidade suficiente para serem medidos por levantamentos aerogamespectrométricos (Minty, 1997).

A aerogamespectrometria é uma técnica que requer considerações de muitas variáveis, entre elas, os contrastes das propriedades físicas e geométricas das fontes radioativas; a radiação gama medida (função do tamanho e eficiência dos detetores); efeitos do meio ambiente como umidade do solo, vegetação e regime de chuvas; movimento das fontes aéreas de radiação na atmosfera baixa, dentre outras. A interpretação de dados gamaespectrométricos requer uma compreensão de princípios físicos básicos e um controle eficiente na aquisição dos dados, nos sistemas de calibração, no processamento e nos procedimentos de apresentação dos resultados. Também é necessário considerar as condições de desequilíbrio radioativo que ocorrem nas séries de decaimento do urânio, bem como os comportamentos geoquímicos do potássio, do urânio e do tório no meio ambiente (Minty, 1997).

2.1.1 Geoquímica dos radioelementos

Potássio

Segundo Dickson & Scott (1997), o potássio (K) é um dos principais componentes da crosta terrestre (2,35%), estando presente principalmente em minerais como feldspatos potássicos (ortoclásio e microclínio com aproximadamente 13% de K) e micas (biotita e muscovita com aproximadamente 8% de K). O potássio 40 é o principal contribuinte e responsável por aproximadamente 98% da radiação gama dos radioisótopos primários presentes na crosta terrestre. A janela do potássio monitora os raios gama emitidos com energias centradas em 1,46 MeV pelo decaimento do ^{40}K . O isótopo ^{40}K constitui 0,012 % do potássio natural. Como o ^{40}K ocorre como uma razão fixa de K no ambiente, ele é usado para estimar a quantidade total de K presente (IAEA, 2003).

Urânio

O urânio é um metal reativo com uma abundância média de aproximadamente 3 ppm, uma das menores da crosta terrestre. Possui dois estados principais de valência, U^{+4} e U^{+6} , sendo sua forma mais reduzida, o U^{+4} , geralmente contido em minerais insolúveis (Dickson & Scott, 1997). Quando nas rochas ígneas é encontrado com valência U^{+4} , suas propriedades cristaloquímicas são parecidas com o Th^{+4} e elementos terras raras leves (LREE), o que explica a geoquímica coerente de U, Th e LREE em rochas ígneas (Bea, 1999).

A mobilidade do U^{+6} é modificada pela adsorção a óxidos hidratados de ferro, minerais de argila e colóides, como também pela redução de minerais de U^{+4} quando encontra ambientes redutores (Dickson & Scott, 1997).

A série de decaimento do urânio (^{238}U) termina no isótopo estável ^{206}Pb . O urânio não emite radiação gama e durante seu decaimento a maior parte da energia gama transmitida de seus isótopos filhos provém do ^{214}Bi medido. Entretanto são exigidos longos tempos de integração das medidas para se obter concentrações seguras (Dickson & Scott, 1997). As estimativas de U são comumente chamadas na literatura de equivalente de urânio, pois não emite radiação gama.

Em rochas ocorre como óxidos e silicatos, uraninita e uranotorita; principalmente em minerais como a monazita, o xenotímeo e o zircão; como quantidades traço em outros minerais formadores de rocha; ou ainda ao longo dos limites de grãos, possivelmente como óxidos ou silicatos de urânio. Dos principais minerais que “carregam” o urânio, somente a monazita e o zircão são estáveis durante o intemperismo (Dickson & Scott, 1997).

Tório

O tório é um elemento actínídeo com valência Th^{+4} e sua concentração média na crosta terrestre é baixa, aproximadamente 12 ppm (Dickson & Scott, 1997). A solubilidade dos complexos de tório é geralmente baixa, exceto em soluções ácidas (Langmuir & Herman, 1980).

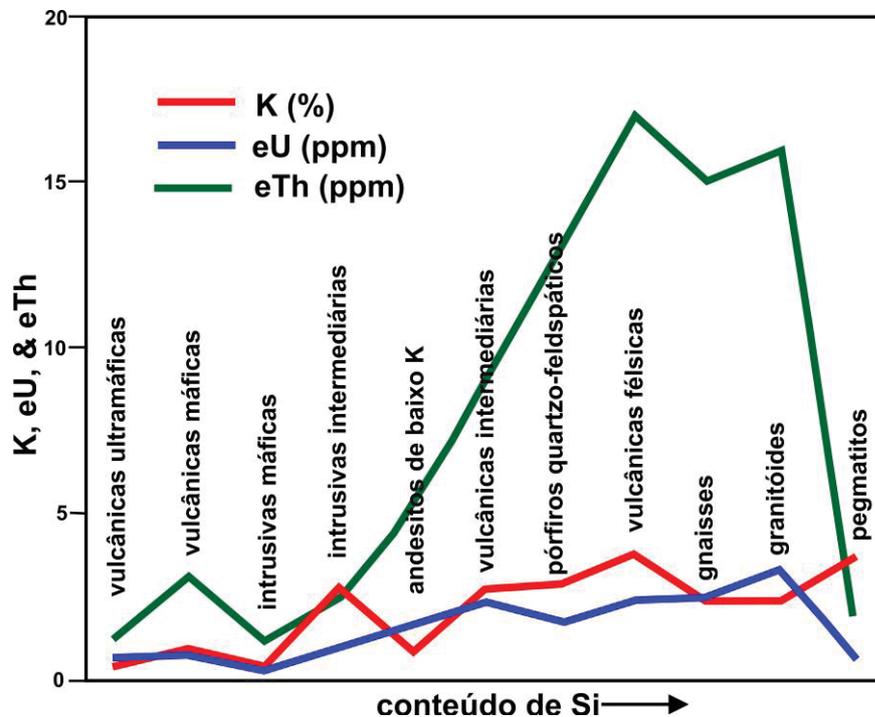
Como o urânio, o tório não emite raios gama durante o seu decaimento, mas é o elemento pai numa série de decaimento a qual termina num elemento estável, o ^{208}Pb . Os raios gama mais energéticos são emitidos pelo ^{208}Tl (2.62 Mev), utilizados para quantificar as contagens/concentrações do equivalente de tório.

O tório é constituinte de minerais acessórios como alanita, monazita, xenotímeo, zircão e esfeno, e em níveis maiores que 1.000 ppm ou em quantidades-traço em outros minerais constituintes das rochas (Krishnaswami, 1999). Os principais minerais que contém Th (monazita e zircão) são estáveis durante o intemperismo e podem acumular-se em depósitos de minerais pesados. O tório liberado durante o intemperismo pode ser retido em óxidos e hidróxidos de Ferro (Fe) ou Titânio (Ti) e em argilas (Dickson & Scott, 1997).

2.1.2 Distribuição dos radioelementos em rochas e solos

A aplicação da aerogamespectrometria se baseia no teor dos radioelementos dispostos nas rochas e solos. A concentração dos radioelementos em rochas ígneas aumenta com o incremento de Si, portanto rochas félsicas encerram maior concentração de radioelementos que as rochas máficas e ultrabásicas (FIGURA 4). Como o tório é mais abundante que o urânio, as razões eTh/eU podem ser usadas como indicativas do grau de diferenciação de suítes ígneas (Dickson & Scott, 1997).

FIGURA 4 – Variação das concentrações de K, eU e eTh de rochas ígneas com o incremento de Si.



Fonte: Adaptado de Dickson & Scott (1997).

Estudos em rochas metamórficas (rochas gnáissicas derivadas de granitos e anfibolitos derivados de doleritos) sugerem que o metamorfismo não afeta a concentração de radioelementos. Já nas rochas sedimentares o teor dos

radioelementos geralmente reflete as rochas fontes originais. Assim, pode-se esperar que sedimentos imaturos de fontes graníticas conttenham teores elevados de radionuclídeos, enquanto sedimentos mais maduros, constituídos principalmente de quartzo, devem revelar índices radioativos mais baixos (Dickson & Scott, 1997).

As respostas gamaespectrométricas em granitos dependem fortemente de fatores climáticos, devido à mobilidade do potássio (K) durante o intemperismo em ambientes de climas tropical e subtropical com fortes chuvas, fatores que também controlam a migração do urânio (U) (Ulbrich et al., 2009).

Os solos cobrem grande parte da superfície da Terra, por isso a relação entre os radioelementos na cobertura superficial e a rocha subjacente é de grande importância no estudo do mapeamento geológico através da aerogamespectrometria. Os raios gama emitidos na superfície irão refletir a mineralogia e a geoquímica das rochas e de materiais superficiais (solos, saprólitos, sedimentos aluvionares e coluvionares) (Wilford et al., 1997). Segundo Dickson & Scott (1997) solos derivados de rochas graníticas perdem cerca de 20% do teor de radioelementos durante a pedogênese.

No regolito, o comportamento dos elementos K, eU e eTh é diferente do substrato, em função do intemperismo e da pedogênese. Como regra geral, a concentração de K decresce com o aumento do intemperismo, em função de sua maior solubilidade, sendo rapidamente lixiviado do perfil regolítico. Uma exceção é quando o potássio é incorporado a argilas potássicas como a illita. Em contraste, o urânio e tório são associados com minerais resistentes e são eliminados por óxidos de ferro no perfil de intemperismo. Entretanto, a concentração de eU e eTh tende a permanecer a mesma ou preferencialmente aumentar em material regolítico assim como em minerais solúveis em solução (Wilford et al., 1997).

2.1.3 Radioelementos associados com alterações hidrotermais

Alguns minerais associados com K, eU e eTh permitem o mapeamento de alteração hidrotermal em diversas situações geológicas. Por exemplo, a alteração potássica na forma de K-feldspato e sericita é comumente associada com muitos tipos de depósitos, como os vulcanogênicos com metais base em sulfetos e ouro maciço (Franklin, 1996; Poulsen & Hannington, 1996).

A alteração hidrotermal potássica tem sido relacionada a depósitos vulcanogênicos com metais base no distrito de Bergelagen, Suécia (Lagerblad &

Gorbatshev, 1985), nas rochas vulcânicas Mount Ler, Tasmania (Crawford et al., 1992), entre outros. A alteração potássica é comum em depósitos de ouro associados a zonas de cisalhamento, como os de Hemlo, Ontário (Kuhns et al., 1986) e outros tipos de depósito (Hoover & Pierce, 1990).

Dentro de um único depósito uma sequência de zoneamento potássico pode evidenciar uma mineralização, ocorrendo desde um núcleo central, ortoclásio e/ou biotita (+/- sericita), até sua porção mais externa através de zonas fílicas sucessivas (sericítica), argílicas e zonas propilitizadas. Embora a zona fílica contenha um ganho menor de potássio do que nos núcleos potássicos, a sua distribuição periférica comumente oferece alvos muito maiores para a detecção através da gamaespectrometria (Shives et al., 2000).

O potássio (K) é constituinte importante das soluções hidrotermais, sendo o seu isótopo ^{40}K o principal contribuinte e responsável por 98% da emissão de radiação gama dos radioisótopos primários presentes na crosta terrestre. Sua contribuição ao espectro natural de radiação gama pode ser facilmente observada através dos aerolevantamentos (Adams & Gasparini, 1970; Gnojek & Prichsthal, 1985; Pires, 1995; Shives et al., 2000). O enriquecimento hidrotermal do potássio é caracterizado por anomalias baixas da razão $e\text{Th}/\text{K}$ em assinaturas litológicas relativamente normais, o que pode ser usado como um indicador de exploração. Urânio e tório, outros dois importantes radioelementos presentes na crosta terrestre, devido a pequena abundância, número atômico elevado, alta valência e eletronegatividade, tendem a ser concentrados no líquido residual durante o processo de cristalização e, assim, são frequentemente incorporados aos últimos estágios da diferenciação magmática (Adams & Gasparini, 1970; Gnojek & Prichsthal, 1985; Pires, 1995; Dickson & Scott, 1997).

Como o enriquecimento do tório geralmente não acompanha o de potássio durante os processos de alteração hidrotermal, a razão $e\text{Th}/\text{K}$ permite discernir o potássio associado com alteração daquele relacionado com variações litológicas normais (Galbraith & Saunders, 1983). Esta importante correlação, de baixa razão $e\text{Th}/\text{K}$ com alteração hidrotermal, é bem documentada em inúmeros estudos em todo o mundo.

O urânio pode acompanhar o potássio no processo hidrotermal, enquanto o tório, devido à sua baixa mobilidade geoquímica apresenta comportamento oposto. Portanto, normalmente, altas razões de $e\text{U}/e\text{Th}$ estão associadas aos processos

hidrotermais (Ostrovsky, 1975; Gnojek & Prichstal, 1985). Assim, é possível propor várias relações entre estes radioisótopos, tais como o parâmetro F (Efimov 1978 apud Gnojek & Prichystal, 1985), que reflete o enriquecimento simultâneo de potássio e urânio em relação tório sendo eficaz na identificação de áreas com alteração hidrotermal:

$$F = K * eU/eTh \quad (1)$$

Saunders et al. (1987, 1993) propuseram uma normalização do potássio e do urânio pelo tório, para a prospecção de hidrocarbonetos, representada pelos parâmetros KD e UD , respectivamente, calculados da seguinte forma:

$$KD = (Ks - Ki) / Ks \quad (2)$$

$$UD = (Us - Ui) / Us \quad (3)$$

KD (%) e UD (%) são os desvios-padrão relativos expressos como fração dos valores da estação de medida. Ks e Us são os valores medidos na estação.

Ki é o valor de potássio definido pelo tório "ideal" da estação com um valor de tório real (Ths) e Ui é o valor de urânio definido pelo tório "ideal" para essa estação. Elas são representadas pelas seguintes equações:

$$Ki = (\overline{Ks} / \overline{Ths}) * Ths \quad (4)$$

$$Ui = (\overline{Us} / \overline{Ths}) * Ths \quad (5)$$

sendo que \overline{Ks} , \overline{Us} , \overline{Ths} representam as médias de Ks , Us , e Ths respectivamente.

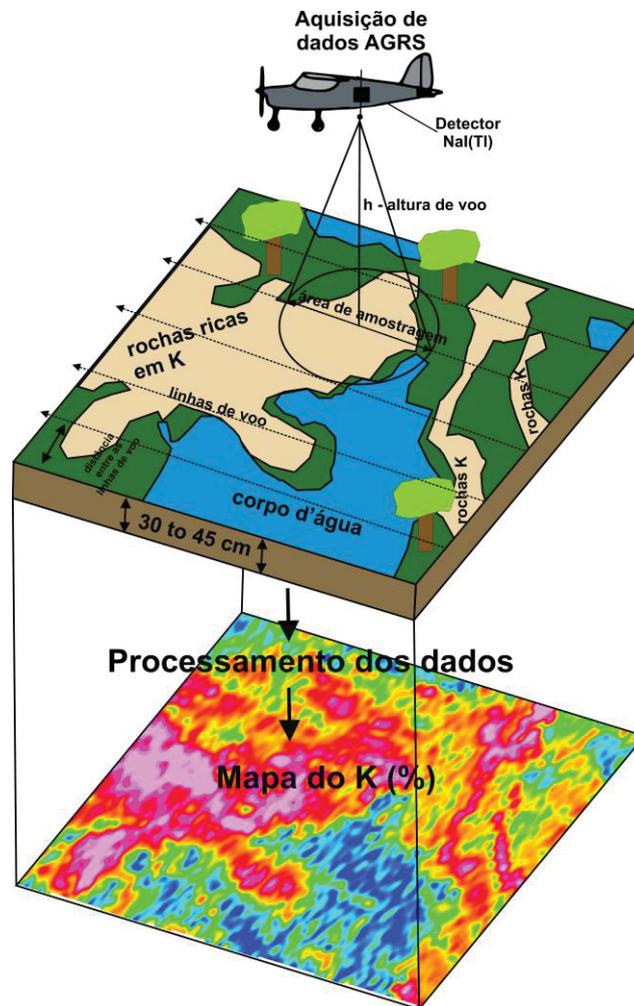
Pires (1995) aplicou pela primeira vez as expressões (1) e (2) para identificar áreas de alteração hidrotermal relacionadas com a mineralização de ouro nos *greenstone belts* de Crixás e Guarinos, Goiás.

2.1.4 Aquisição de dados aerogamaespectrométricos

Os dados aerogamaespectrométricos são adquiridos por aeronaves usualmente a uma altura de voo entre 60 a 100 m. Modernamente são utilizados detectores com cristais de iodeto de sódio ativado com tálio (NaI (Tl)) nas aeronaves que registram os raios gama da superfície, sendo que os fotomultiplicadores que

compõem o sistema do detector gravam e amplificam o sinal induzido dos raios gama (Minty, 1997). A FIGURA 5 ilustra a aquisição aerogamaespectrométrica.

FIGURA 5 – Ilustração de uma aquisição aerogamaespectrométrica com representação do canal do potássio.



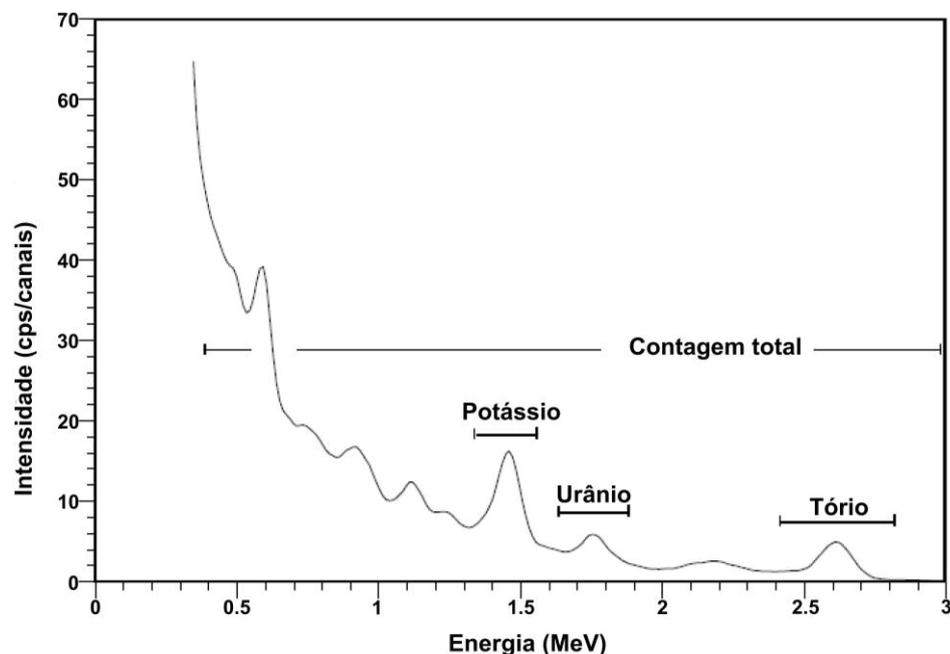
Fonte: A autora (2021).

Os levantamentos aerogeofísicos são normalmente amostrados perpendicularmente às feições geológicas de interesse e o espaçamento entre linhas depende dos objetivos da pesquisa: em pesquisas de reconhecimento, pode variar entre 2.000 e 5.000 m; em pesquisas regionais, pode variar entre 500 e 2.000 m; e em levantamentos detalhados (exploração mineral) o espaçamento entre linhas de voo varia entre 100 ou 200 m (Killeen et al., 2015). A resolução espacial dos dados depende do espaçamento entre as linhas de voo, que, por sua vez, está relacionado com os custos (quanto menor o espaçamento mais caro o levantamento) (Wilford et al., 1997).

Os detectores gamaespectrométricos típicos possuem 256 ou 512 canais espectrais e captam uma faixa de energia de 0 a 3.0 MeV, medindo o número de raios gama em faixas de energia pré-definidas, conhecidas como janelas ou canais. Uma janela adicional (cósmica) monitora toda a radiação acima de 3 MeV. As medições são feitas pelo menos uma vez a cada segundo, e o tempo de ativação do sistema é registrado automaticamente e enviado com o fluxo de dados (IAEA, 2003). Os gamaespectrômetros fornecem informações sobre a natureza geoquímica da fonte radioativa, e são usualmente sintonizados com as energias dos radioelementos de interesse geológico (K, eU, eTh) (Dentith & Mudge, 2014).

A janela do potássio (K) possui um pico energético de 1.46 MeV emitidos pelo ^{40}K . Considerando que o ^{238}U e ^{232}Th não emitem raios gama, o decaimento de seus elementos filhos ^{214}Bi e ^{208}Tl , respectivamente, são representados nas janelas energéticas de urânio (1.76 MeV) e tório (2.62 MeV). A intensidade da radiação na janela do urânio é significativamente menor do que nas outras janelas, resultando em maiores níveis de ruído. A janela da contagem total mede a radioatividade total do sistema (Dentith & Mudge, 2014). Na FIGURA 6 estão dispostos os espectros típicos para o potássio, o urânio e o tório.

FIGURA 6 – Espectro típico de raios gama aéreos, com as janelas de energia de cada radioelemento indicadas.



Fonte: Adaptado de IAEA (2003).

A medida das concentrações de K, eU e eTh é realizada através da interação da radiação gama com a matéria, em particular através do efeito fotoelétrico, produção

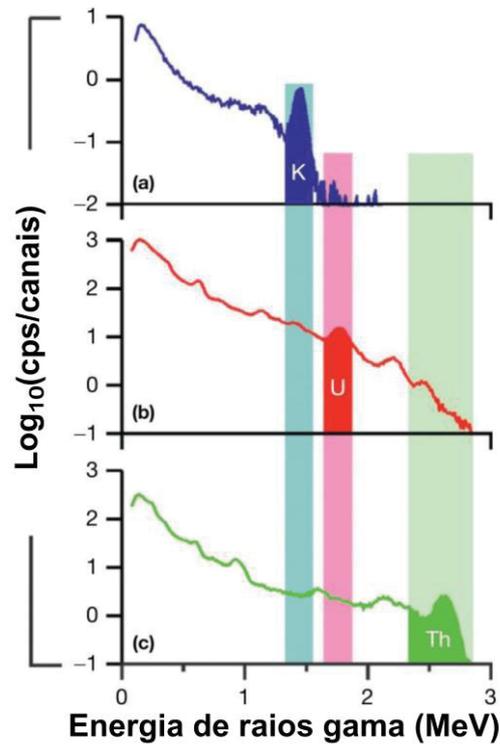
de pares e espalhamento Compton (Minty, 1997). No efeito fotoelétrico há interação entre o fóton e o átomo, e toda a energia do fóton é absorvida pelo elétron de um átomo através de energia cinética, esse processo ocorre, predominantemente, em baixos níveis de energia (Minty, 1997).

O espalhamento Compton é o processo através do qual um fóton incidente perde parte de sua energia para um elétron, e é espalhado com um certo ângulo em relação sua direção original, e devido a esta transferência o fóton espalhado tem uma energia (frequência) menor que a original. A energia perdida pelo raio gama é transferida como energia cinética para o elétron. O espalhamento Compton consiste de um processo em níveis moderados de energia, predominante no intervalo de energia que interessa aos levantamentos aerogamaespectrométricos (Minty, 1997; Killeen et al., 2015).

A produção de pares (elétron-pósitron) é o processo pelo qual um fóton incidente é completamente absorvido. Isso resulta na criação de um par elétron-pósitron no campo eletrostático de um núcleo e com uma energia total igual à do fóton original. Ocorre geralmente em níveis energéticos superiores a 1,02 MeV em que predominam altas energias, particularmente com elementos de elevado número atômico (Minty, 1997; Killeen et al., 2015).

O espectro de energia dos raios gama medido é espalhado, e os picos de energia discretos e separados aparecem como picos arredondados, que se sobrepõem (FIGURA 7). A quantidade de ampliação dos picos e o preenchimento dos vales entre eles depende parcialmente da resolução de energia do detector e das interações dos raios gama com os materiais geológicos com os quais eles interagem antes de atingir o detector (Killeen et al., 2015).

FIGURA 7 – Espectro aerogamespectrométrico medido. (a) Potássio, (b) Urânio e (c) Tório. É possível notar a interferência nas janelas entre os três espectros.



Fonte: Adaptado de Killeen et al. (2015).

2.1.4.1 Calibração dos equipamentos

Num levantamento aerogamaespectrométrico é necessário calibrar o sistema a fim de prevenir erros de medição. Considerando que os espectros de K, U e Th se sobrepõem, são usados fatores de correção (*stripping ratios*) para corrigir a influência das radiações de mais alta energia nas janelas de mais baixa energia.

Usualmente são usados quatro *pads* transportáveis de concreto com dimensões de 1 m × 1 m × 0,3 m e com concentrações conhecidas de K, U e Th para determinar as constantes de calibração. Três desses *pads* devem conter, individualmente, apenas potássio, urânio e tório. Já o quarto *pad*, denominado de *background*, é usado para remover os efeitos da radiação de fundo (solo, equipamentos, radiação cósmica e do radônio) e deve possuir radiação “nula” ou baixa (Grasty et al., 1991; IAEA, 2003).

Carlos (2006) construiu oito *pads* transportáveis (1m x 1m x 30cm) seguindo as definições propostas por Grasty et al. (1991), sendo 2 blocos de background de baixa, 3 blocos com concentrações misturadas de potássio, urânio e tório e 3 blocos

com altas concentrações de potássio, urânio e tório, que são usados para calibrar os sistemas aerogamaespectrométricos.

2.1.4.2 Pista de calibração dinâmica

Uma pista de calibração dinâmica é uma faixa facilmente navegável que é usada para medir as respostas de um aerogamaespectrômetro a diferentes alturas (visando calcular os coeficientes de atenuação de altura), e medir as fontes com concentrações conhecidas (visando calcular os coeficientes de sensibilidade). A pista é voada a diferentes alturas, usualmente são feitos 6 voos a diferentes altitudes (330 a 800 pés) e duas passagens adicionais a altura que será feita o aerolevanteamento. Na seqüência são realizadas passagens sobre um corpo de água (lago, oceano, etc) na mesma altura de voo observada sobre a pista de calibração dinâmica, com vistas à determinação do *background*. Os dados corrigidos do *background* e as contagens corrigidas do efeito Compton são usadas para estimar os coeficientes de atenuação elementares. Na pista são feitas medidas em pontos conhecidos (estacas) com um gamaespectrômetro portátil em solo no mesmo momento dos voos, permitindo o cálculo dos coeficientes de sensibilidade, que são usados para converter as contagens em concentrações no solo (IAEA, 2003).

A calibração dinâmica tem por finalidade determinar a correlação entre as medições feitas em terra (ao longo da linha de calibração, com emprego de gamaespectrômetro portátil em solo), com as leituras registradas pelo sistema detector da aeronave na altura de voo, permitindo a conversão das contagens obtidas a bordo (em cps) para concentrações de potássio, urânio, tório e contagem total no solo. A sensibilidade (S) do sistema gamaespectrométrico é definida como a razão entre a média dos valores aéreos (N), medidos na altura nominal do levantamento, em cps, para os canais de contagem total, K, U e Th, e a média dos valores das estações terrestres (C), em concentração, para os canais de contagem total, K, eU e eTh (CPRM, 2011), sendo determinada pela equação:

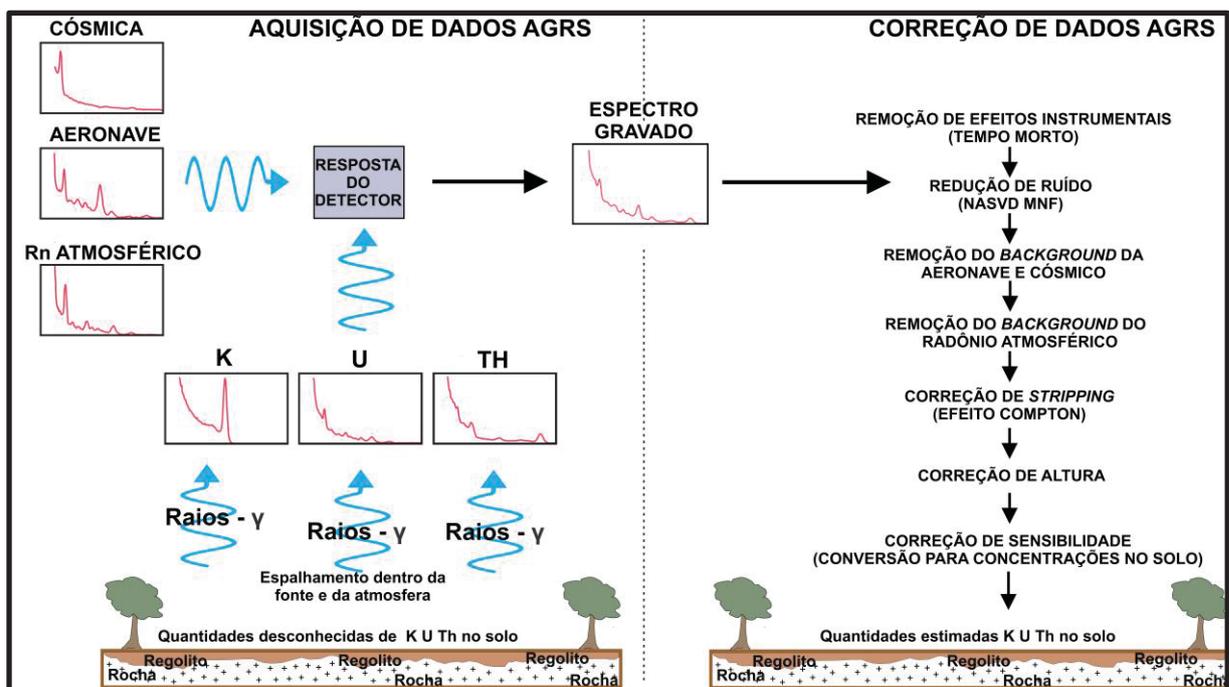
$$S = N/C \quad (6)$$

É recomendado que os gamaespectrômetros aéreos sejam calibrados a cada doze meses, sendo que calibrações frequentes são necessárias caso haja modificações que afetem a sensibilidade do sistema (Grasty & Minty, 1995; IAEA, 2003).

2.1.5 Processamento de dados aerogamaespectrométricos

Os raios gama observados nos levantamentos aerogeofísicos são provenientes de diferentes fontes e em variadas proporções, dentre os quais estão também os isótopos dos elementos de interesse (K, eU e eTh). Para remover as fontes de ruído (ambientais e instrumentais) e revelar uma resposta com significado geológico é necessário corrigir os dados (Dentith & Mudge, 2014). Essas correções, especificadas nos relatórios técnicos da IAEA (1991, 2003), são importantes para evitar falsas anomalias e, por conseguinte, uma interpretação errônea dos dados. As principais correções realizadas nos dados gamaespectrométricos podem ser vistas na FIGURA 8.

FIGURA 8 – Fatores que influenciam nas leituras do detector gamaespectrométrico e as correções aplicadas aos dados.



Fonte: Adaptado de Dentith & Mudge (2014).

2.1.5.1 Redução de ruído

Uma parte significativa do ruído de uma medida gamaespectrométrica é causada pela natureza aleatória dos dados durante o processo do decaimento radioativo. Os ruídos podem ser suprimidos usando técnicas de suavização conhecidas como suavização spectral (Dentith & Mudge, 2014). Outras técnicas de redução de ruídos como o " *Noise Adjusted Singular Value Decomposition*" (NASVD) ou " *Maximum Noise Fraction*" (MNF) podem ser usadas. O NASVD e o MNF são

técnicas que utilizam a análise de componentes principais (PCA), sendo necessário o pré-condicionamento dos dados da pesquisa, de modo que suas propriedades estatísticas atendam aos requisitos fundamentais do PCA. A diferença entre os dois é baseada na forma como os resultados são alcançados, já que ambos se baseiam no fato do sinal se concentrar em componentes de baixa ordem, enquanto o ruído (aleatório) se concentra em componentes de ordem mais alta. Assim, o espectro suavizado é reconstruído usando apenas os componentes de ordem mais baixa (Dentith & Mudge, 2014; Killeen et al., 2015; IAEA, 2003). Ambos os métodos podem reduzir os ruídos em comparação com o processamento convencional.

2.1.5.2 Correção do tempo morto

O tempo morto (t) de um gamaespectrômetro é o tempo gasto pelo equipamento para analisar um único raio-gama detectado. Durante este período, o equipamento está ocupado e não pode analisar nenhum outro raio gama. Este tempo morto (às vezes chamado de tempo de resolução) é de apenas alguns microssegundos por contagem registrada, mas torna-se uma porcentagem considerável em altas taxas de contagem e deve ser levado em consideração (Killeen et al., 2015). A correção é feita pela divisão das contagens registradas nos canais pelo tempo total de medida ("live time") registrado pelo equipamento, através da fórmula (IAEA, 2003):

$$N = \frac{n}{1-ct}, \quad (7)$$

N é o valor corrigido de contagens em cada segundo, n é o valor das contagens brutas em cada segundo, C é a contagem total em todos os canais e t é o tempo morto por pulso. Para os equipamentos mais modernos essa correção é desconsiderada (Killeen et al., 2015).

2.1.5.3 Correção da radiação de fundo da aeronave e cósmico

A radiação de fundo ou *background* da aeronave e cósmica influencia a leitura do detector. O *background* cósmico admite que qualquer radiação acima de 3.0 Mev deve ter origem cósmica, já que os raios gama de origem terrestre possuem baixas energias. Os parâmetros de correção para o *background* cósmico são determinados através dos dados de aquisição levantados a uma certa altura (3.000 a 4.000m) sobre

um grande corpo de água (lago ou oceano), onde a radiação é desprezível. Para todas as janelas energéticas existe uma relação linear entre a radiação e a altura de voo, com a contribuição do *background* da aeronave sendo constante (Dentith & Mudge, 2014). O *background* é calculado a partir da soma das contribuições da influência da aeronave e da radiação cósmica em cada uma das janelas energéticas (IAEA, 1991; IAEA, 2003):

$$N = a + b.C, \quad (8)$$

onde N é a somatória das contribuições da aeronave e da radiação cósmica em cada janela espectral (cps), a é o *background* da aeronave em cada janela (cps), C são as contagens observadas no canal da radiação cósmica e b é a razão entre a contagem de uma janela e a contagem no canal cósmico. A expressão deve ser aplicada para cada janela e a cada ponto usando o canal cósmico filtrado, e os resultados são subtraídos dos dados de determinada janela (Killeen et al., 2015).

2.1.5.4 Remoção da radiação de fundo do radônio

A compensação dos efeitos do radônio (^{222}Rn) e seus elementos filhos na atmosfera é uma das questões mais complicadas no levantamento aerogamaespectrométrico, já que um de seus produtos de decaimento é o ^{214}Bi , usado para medir o urânio (^{238}U). O ^{222}Rn está constantemente presente na atmosfera, uma vez que seus elementos filhos ligam-se quimicamente a aerossóis (partículas finas, sólidas ou líquidas, dispersas no ar) e partículas de poeira, além do fato de suas medidas serem afetadas por fatores externos (vento, umidade e temperatura) (Dentith & Mudge, 2014).

Na aeronave os pacotes de detectores estão dispostos com cristais voltados para baixo (*downward looking*) e com cristais voltados para cima (*upward looking*). Para medir o *background* associado ao radônio atmosférico são feitas medições na janela do urânio através do detector “*upward looking*”, que o protege da radiação do solo (IAEA, 1991; IAEA, 2003). Os aerolevantamentos de calibração são adquiridos sobre corpos de água em diferentes dias, com diferentes quantidades de radônio no ar. As razões entre as contagens medidas pelos detectores “*upward looking*” e “*downward looking*” em cada janela de energia fornecem os fatores de correção que serão aplicados as medidas dos detectores “*downward looking*” (Dentith & Mudge,

2014). A expressão que define a contribuição do radônio na janela do urânio é dada por (IAEA, 1991):

$$U_r = \frac{u - a_1 U - a_2 Th + a_2 b_t - b_u}{a_u - a_1 - a_2 a_t}, \quad (9)$$

onde U_r é o *background* do radônio observado no canal do urânio pelo detector *downward*, u é a contagem medida no canal do urânio pelo detector *upward*, U é a contagem medida no canal do urânio pelo detector *downward*, Th é a contagem medida no canal do tório pelo detector *downward*, e a_1 , a_2 , a_u , b_u , e b_t são os coeficientes de proporcionalidade derivados da calibração adequada.

A relação entre as contagens associadas ao radônio observadas nas janelas do urânio, como na do potássio e do tório, podem ser determinadas através de regressão linear, sendo elas (IAEA, 1991): $u_r = a_u U_r + b_u$; $K_r = a_k U_r + b_k$; $T_r = a_t U_r + b_t$; $TC_r = a_{tc} U_r + b_{tc}$, onde u_r é a componente no radônio *upward* e U_r , K_r , T_r e TC_r são as contribuições de radônio nas janelas associadas aos detectores *downward*. Essas relações são determinadas pela subtração dos *backgrounds* da aeronave e cósmico dos voos sobre a água (lago ou outro copro de água), mostrando uma série de concentrações de radônio. As regressões lineares fornecem os coeficientes de calibração a_u , a_k , a_t , a_{tc} , b_u , b_k , b_t e b_{tc} .

O segundo estágio da calibração relaciona as taxas de contagem medidas na janela de urânio *upward* às observadas na janela de urânio *downward* associado a presença do urânio no solo. Esses componentes estão relacionados pela equação (IAEA, 2003):

$$u_g = a_1 U_g + a_2 T_g, \quad (10)$$

Onde u_g , U_g e T_g são as componentes associadas ao solo, e a_1 e a_2 são os coeficientes de calibração. Segundo IAEA (2003) os coeficientes a_1 e a_2 são calculados a partir do dado corrigido do *background* através de aquisições sobre grandes corpos de água. Os perfis adquiridos são usados para remover o *background* total e obter uma estimativa de u_g , U_g e T_g . Os coeficientes a_1 e a_2 são calculados por (IAEA, 1991):

$$a_1 \sum (U_g)^2 + a_2 \sum U_g T_g = \sum u_g U_g, \quad (11)$$

$$a_1 \sum U_g T_g + a_2 \sum (T_g^2) = \sum u_g T_g. \quad (12)$$

2.1.5.5 Cálculo da altura efetiva de voo

A intensidade da radiação medida no detector diminui com o aumento da altura acima da fonte radioativa. A taxa de atenuação com o aumento da altura depende da energia da radiação e da geometria da fonte, com uma maior atenuação das fontes mais estreitas do que das mais largas. No geral, a atenuação da altura é uma diminuição aproximadamente exponencial nas contagens medidas com o aumento da altura. Costuma-se supor que as fontes de radiação são amplas e planas (Dentith & Mudge, 2014).

Em levantamentos aerogamaespectrométricos a altura de voo não é constante em função da topografia do terreno, e muda continuamente à medida que a aeronave avança ao longo de uma linha de voo. Sendo assim, os dados devem ser corrigidos para uma altura nominal de levantamento. As taxas de contagem de janelas variam aproximadamente de forma exponencial com a altura para a faixa de alturas normalmente encontradas em levantamentos aéreos. Uma estimativa da taxa de contagem na altura nominal da pesquisa é dada por (IAEA, 1991; IAEA, 2003):

$$h_e = \frac{273.15 \times P \times h_{obs}}{(T+273.15) \times (101.325)}, \quad (13)$$

onde, h_{obs} é a altura observada (medida pelo radar altímetro, em metros), T é a temperatura do ar (em °C) e P é pressão atmosférica (em kPa). Note que a temperatura padrão é $T = 273,15$ °K, e a pressão $P = 101,325$ kPa.

2.1.5.6 Correção do efeito Compton ou *Stripping*

Esta correção é aplicada para eliminar a influência de energias mais altas em canais de energias mais baixas, ou seja, das contribuições do tório nos espectros do potássio e do urânio, do urânio nos espectros do potássio e do tório e do potássio nos espectros do urânio e tório (FIGURA 7). As equações das correções estão representadas abaixo (IAEA, 2003):

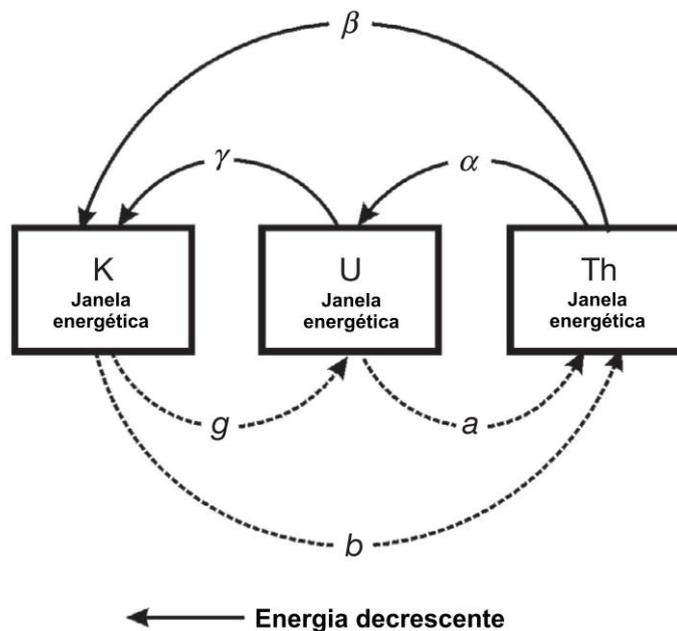
$$n_{th(corr)} = \frac{n_{th} - \alpha n_u}{1 - \alpha}, \quad (14)$$

$$n_{u(corr)} = \frac{n_u - \alpha n_{th}}{1 - \alpha}, \quad (15)$$

$$n_{k(corr)} = n_k - \beta n_{th(corr)} - \gamma n_{u(corr)}, \quad (16)$$

α , β , γ são os coeficientes de *stripping*. Sendo que α são as contagens da janela de U por unidade de contagem na janela do Th para uma fonte de Th puro, β são as contagens da janela de K por unidades de contagem para uma fonte de Th puro, γ são as contagens da janela de K por unidade de contagem na janela do U para uma fonte de U puro, a são as contagens na janela de Th por unidade de contagem na janela do U para uma fonte de U puro, e $n_{k(corr)}$, $n_{u(corr)}$, $n_{th(corr)}$ são taxas de contagens das janelas de cada radioelemento. A derivação dos coeficientes de *stripping* é complexa, sendo necessária uma análise de regressão linear levando em consideração as pequenas concentrações dos outros dois radioelementos em cada uma das três fontes puras (Grasty, 1979), chegando em seis razões de *stripping* (FIGURA 9).

FIGURA 9 – Representação esquemática da interação entre as janelas energéticas de K, U e Th, indicando as razões de *stripping* usadas para remover a interferência das janelas.



Fonte: Adaptado de Killeen et al. (2015).

Os coeficientes de correção α , β , γ , a , b e g são determinados nos *pads* de calibração seguindo as recomendações da IAEA (1991, 2003). Sendo que α é usado para corrigir os raios gama do Th na janela do U, β é usado para corrigir os raios gama do Th na janela do K, γ é usado para corrigir os raios gama do U na janela do K, a é

usado para corrigir os raios gama do U na janela do Th (geralmente baixa), b é usado para corrigir os raios gama do K na janela do Th (aproximadamente zero) e g é usado para corrigir os raios gama do K na janela do U (aproximadamente zero) (Killeen et al., 2015).

2.1.5.7 Correção altimétrica

Para eliminar falsas anomalias geradas por elevações na topografia, as contagens são referidas à altura nominal do levantamento. Os coeficientes de atenuação são usados para corrigir as variações de altitude a partir da altitude planejada do levantamento. As contagens variam exponencialmente com a altitude da aeronave, e a essa atenuação das contagens em relação ao afastamento da fonte pode ser expressa por (IAEA, 1991):

$$N = n_0 \cdot e^{-\mu(H-h)}, \quad (17)$$

onde, μ é o coeficiente de atenuação atmosférica, n_0 são as contagens observadas na superfície na altura h (ou seja, $h = 0$), e n é a radiação à distância H da fonte.

2.1.5.8 Conversão para concentração de elementos

A conversão dos dados gamaespectrométricos em cps para concentrações elementares no solo possibilita a interpretação dos dados. As contagens corrigidas são usadas para estimar as concentrações no solo de cada um dos três radioelementos (K, U, Th). Como as janelas de urânio e tório são medidas pelo decaimento dos seus elementos filhos ^{214}Bi e ^{208}Tl , respectivamente, o cálculo assume implicitamente que essas séries radioativas estão em equilíbrio, e por isso são chamados de equivalente em urânio (eU) e equivalente em tório (eTh) (Killeen et al., 2015).

As contagens gamaespectrométricas não dependem apenas das concentrações no solo, mas também dos equipamentos utilizados (detectores) e da altura nominal do levantamento, o que não é desejável, pois as unidades de medida devem ter um significado geológico direto e independentes dos parâmetros de instrumentação e levantamento. Por isso as contagens devem ser convertidas para concentrações no solo dividindo cada uma das taxas de contagem das janelas corrigidas por um coeficiente de sensibilidade. Os coeficientes para cada janela são estimados a partir dos dados adquiridos pela aeronave na pista de calibração

dinâmica. As concentrações dos radioelementos sobre a pista são medidas usando um gamaespectrômetro calibrado portátil ao mesmo tempo que os dados aéreos são adquiridos. Isso permite “alterar” a radiação de saída do solo através da umidade do solo e outros fatores ambientais. Os coeficientes são estimados dividindo a média do *background* corrigido e das janelas corrigidas do efeito Compton na altura nominal do levantamento pela concentração média do solo apropriada para na pista de calibração (IAEA, 2003):

$$S = \frac{N}{C}, \quad (18)$$

onde S é o coeficiente de sensibilidade para cada janela, N é a média das contagens corrigidas (cps) e C é a média das concentrações para cada canal no solo (na pista de calibração).

2.1.5.9 Interpolação

Para representar os dados na forma de imagens é necessário interpolar os dados. Geralmente, os valores são coletados em pontos aleatórios ou em linhas com determinada direção e espaçadas de certa distância. Nesses casos, é necessária a definição de um método de interpolação adequado para transformar os dados em malha regular (Blum, 1999).

Para os dados gamaespectrométricos é utilizado o método da curvatura mínima por sua rapidez de processamento e por gerar uma superfície suavizada com os valores o mais próximo possível dos dados originais (Geosoft, 2014). O método é adequado para dados uniformemente espaçados, dados orientados em linha e dados aleatoriamente espaçados.

2.1.5.10 Mapas básicos e transformados

Os mapas básicos referem-se àqueles derivados das concentrações de K, eU e eTh a partir de fatores primários (variações litológicas, geomorfologia, geoquímica e pedogênese) e mostram as concentrações absolutas dos radionuclídeos. Já os mapas secundários são gerados a partir de operações entre os radionuclídeos como razões (eTh/K, eU/K, eU/eTh, entre outras), parâmetro F, potássio anômalo (KD) e urânio anômalo (UD) que evidenciam fatores secundários como mineralizações (alterações hidrotermais), a influência de um radioelemento sobre outro, concentrações relativas,

entre outros. A acumulação destes radioelementos causada por variações secundárias pode indicar a localização de ocorrências auríferas. Antes da análise dos efeitos originados por processos secundários é necessário reduzir os efeitos causados pelas variações primárias (Pires, 1995).

As razões e os mapas secundários são importantes porque visam a reduzir os efeitos da exposição, conteúdo-água-solo, entre outros. Por exemplo, o nível absoluto de radiação de um afloramento será reduzido em áreas onde o intemperismo é profundo ou sujeito à umidade superficial, mas as razões tendem a permanecer (relativamente) não afetadas, indicando o mesmo litotipo. As razões também são úteis para destacar zonas enriquecidas ou alteradas em um determinado radioelemento (Dentith & Mudge, 2014).

Os mapas ternários são imagens geradas associando um determinado elemento a uma determinada cor, dependendo do padrão de coloração utilizado (RGB ou CMY). O padrão RGB associa as cores R- *red* (vermelho), G – *green* (verde) e B – *blue* (azul) ao potássio (K), tório (eTh) e urânio (eU), respectivamente. Já o CMY associa as cores C – ciano (eU), M – magenta (K) e Y – *yellow* (eTh). Essas cores são associadas aos vértices de um triângulo equilátero, com as gradações de cores variando de acordo com o teor de K, eU e eTh, a cor branca representa altas contagens nos três radioelementos e a cor preta a ausência dos três radionuclídeos (IAEA, 2003).

As composições ternárias podem ser usadas para representar tanto os mapas básicos (K-eTh-eU) quanto os mapas transformados/secundários (razões, F, KD, UD), e são muito usados para facilitar a interpretação, já que mostram três variáveis em um mesmo mapa.

Geralmente a interpretação é baseada na experiência e na acuidade visual do intérprete, e deve ser baseada em aplicar os conhecimentos sobre os processos que controlam a distribuição de radioelementos em rochas e solos para a valorização e processamento dos dados.

2.2 ANÁLISE DE DADOS

A análise de dados gamaespectrométricos depende da aplicação desejada e dos dados disponíveis, não somente AGRS, como também outros dados geofísicos (e.g magnetométricos), geológicos, e de sensoriamento remoto (Killeen et al., 2015). Tal análise permite a integração desses dados e auxilia na interpretação, já que é baseada

na experiência do intérprete e, em sua grande parte, é visual. As técnicas de processamento digital são importantes para auxiliar na análise dos dados AGRS, principalmente os métodos estatísticos. IAEA (2003) detalha métodos como distribuição amostral da média, regressão linear, e análise de componentes principais, que são usados para realçar variações sutis nos dados.

As técnicas de estatística multivariada como as classificações não supervisionadas e supervisionadas têm sido usadas na aerogamaespectrometria (Harris, 1989; Ranjbar et al., 2001; IAEA, 2003; Cainzos et al., 2002; Martelet et al., 2006; Teixeira et al., 2006; Eberle & Paasche, 2012) para automatizar a identificação de unidades radiométricas e anomalias complementando a interpretação visual.

A análise de dados pode ser usada para classificar os dados aerogamespectrométricos em domínios com respostas similares de radioelementos (K, eU, eTh), e pode ser feita manualmente (interpretação visual), semi-automática, ou automática (Killeen et al., 2015).

2.2.1 Classificação não supervisionada

A classificação não supervisionada é um método de estatística multivariada que classifica objetos com base no reconhecimento de similaridade de um conjunto de variáveis de grupos distintos (e.g. classes ou *clusters*). A classificação não supervisionada é usada quando as informações sobre as classes de um determinado conjunto de dados não estiverem disponíveis, e tem o potencial de identificar todos os *clusters*. As classes são identificadas com base na assinatura dos raios gama, e devem ser interpretadas à luz dos dados geológicos (IAEA, 2003; Pires & Harthill, 1989; Pires, 1990).

A classificação não-supervisionada pode detectar diversos grupos pré-definidos num banco de dados de naturezas distintas (Eberle & Pasche, 2012), sendo uma alternativa para fornecer informações sobre a geologia de forma sistemática e imparcial, embora a interpretação visual é comumente considerada como tendo um desempenho superior do que os métodos automatizados (Schetselaar et al., 2000). No entanto, os métodos numéricos permitem manipular e interpretar simultaneamente vários conjuntos de dados com diversas variáveis de imagem, e geralmente requerem apenas o número de classes desejada.

A análise de agrupamento (*Migrating Means*, *K-mean*) é muito utilizada na classificação não supervisionada em geociências (Harris, 1989; Pires & Harthill, 1989;

Pires, 1990; Teixeira et al., 2006) para integração de dados geofísicos e sua correlação com os dados geológicos, gerando, assim, mapas que revelam padrões que podem ser correlacionados com as variações litológicas. No caso da gamaespectrometria, as combinações dos canais de K, eU e eTh através da análise de agrupamento permite produzir um mapa de domínios ou classes que podem ser associados as variações litológicas de interesse.

Na classificação não supervisionada, o algoritmo de *K-means* (MacQueen et al., 1967) é um dos mais utilizados (Davis & Sampson, 1986; Jain, 2010) para classificar dados aerogamaespectrométricos (Teixeira et al., 2006; De Lima & Marfurt, 2018). O algoritmo de *K-means* agrupa amostras com base em características comuns, onde a classificação é fundamentada na análise e comparação entre os valores numéricos dos dados. O algoritmo permite uma classificação sem a necessidade de nenhuma pré-classificação existente, dividindo o conjunto de amostras em *k*-grupos, onde se calcula a média de cada grupo, e, em seguida, calcula-se a diferença euclidiana entre o valor de cada amostra e a média calculada. Cada amostra, então, é deslocada para o grupo correspondente ao vetor médio do qual ele está mais próximo. Por fim, este novo rearranjo dos pontos de *k*-grupos, permite que novas médias sejam calculadas. O processo é repetido para um número determinado de interações ou até que o critério de convergência seja atingido, onde todas as amostras não possam mais ser agrupadas, atingindo, assim, o mínimo erro possível (Davis & Sampson, 1986; IAEA, 2003).

2.2.2 Classificação supervisionada

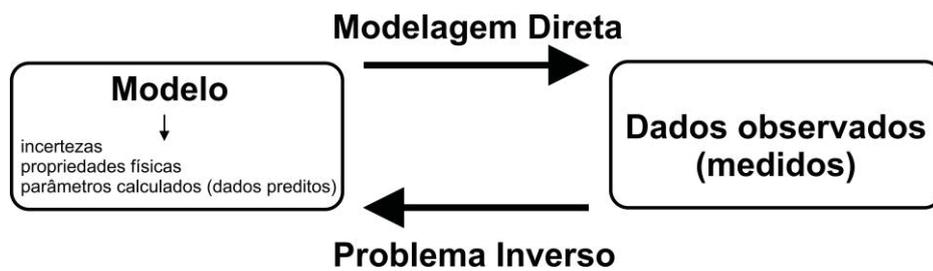
A classificação supervisionada é baseada em classes que foram pré-definidas fundamentadas em observações de campo, por exemplo. Tal classificação possibilita a definição de padrões e objetos homogêneos em imagens, representativos da área de treinamento, a partir da seleção de amostras (e.g., tipo de rocha ou unidade litológica) que serão classificadas (Killeen et al., 2015, IAEA 2003). As decisões para a alocação de classes são baseadas nessas amostras representativas para essas classes, onde o procedimento de amostragem (etapa de treinamento), se diferencia das rotinas de classificação não supervisionada. Essas decisões são então usadas para alocar as amostras para determinadas classes na etapa de classificação (IAEA, 2003).

A classificação supervisionada tem sido aplicada na separação de unidades litológicas usando dados AGRS combinados com dados de satélite e aerogeofísicos (e.g., aeromagnetométricos e eletromagnéticos) (Schetselaar et al., 2000; Ford et al., 2008; Teles et al., 2019).

2.3 INVERSÃO DE DADOS GAMAESPECTROMÉTRICOS

A modelagem direta consiste em formular um modelo físico-geométrico, calcular sua resposta e compará-la aos dados observados (FIGURA 10). Já na inversão, o modelo físico-geométrico é calculado a partir dos dados observados, incluindo os erros dos ajustes (e.g. Barbosa & Pereira, 2013), e pode ser usada para estimar e avaliar a qualidade de parâmetros de um modelo, além de aferir os efeitos de ruídos e a estabilidade dos dados.

FIGURA 10 – Problema direto e inverso.



Fonte: A autora (2021).

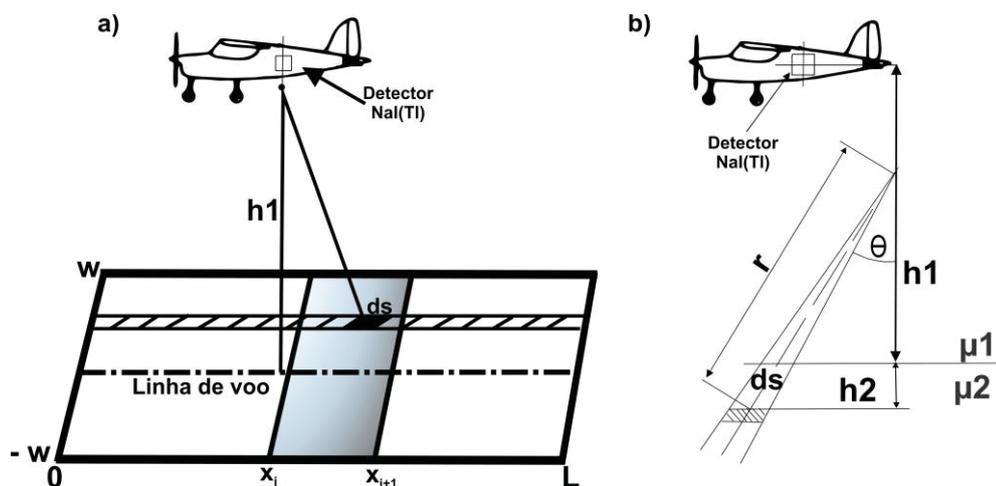
A modelagem direta compreende a tarefa de prever a medição de parâmetros já conhecidos, entre eles geofísicos. A modelagem geofísica direta é uma ferramenta utilizada para validar ou descartar modelos geológicos com base em dados geofísicos observados, e permite reduzir as incertezas e as diferenças entre as respostas calculadas e observadas, sendo que a resposta calculada é baseada em dados geológicos e geofísicos combinados (Lindsay et al., 2013). No contexto da aerogamaespectrometria, a modelagem direta consiste no cálculo das contagens por unidade de tempo a partir das concentrações dos radionuclídeos, de acordo com a teoria apresentada por Kogan et al. (1971).

A inversão consiste em estimar parâmetros de um modelo, e também pode ser usada para estimar a qualidade dos parâmetros de um modelo proposto, bem como determinar quais dados são mais importantes, dentre os parâmetros pré-estabelecidos, além dos efeitos de ruídos e da estabilidade dos dados. Em contraste com a modelagem direta, o procedimento de inversão é essencialmente o mesmo

para todos os métodos geofísicos, embora cada método possa impor desafios diferentes à implementação.

Kogan et al. (1971) estão entre os pioneiros no estudo da inversão gamaespectrométrica, além de estudar a estrutura, comportamento e absorção dos raios gama. Estes autores estudaram fontes em várias formas (circulares, disco fino, feixe, faixa estreita, retângulo, faixa com espessura maior). No caso dos dados aéreos a energia captada pelos detectores é considerada um feixe (FIGURA 11) com uma radioatividade constante, com as fontes distribuídas em um semi-espço, sendo que a concentração das fontes não depende da profundidade, a qual é considerada infinita (Kogan et al., 1971).

FIGURA 11 – Representação esquemática da radiação gama de um feixe. (a) As linhas pontilhadas representam as linhas de voo, $[0, L] \times [-w, w]$ é a seção transversal onde w é a meia-largura das fontes, baseado na largura de um feixe de um detector em movimento, ds é a área da seção transversal infinitesimal e $h = h_1$ é a altura de voo. (b) θ é o ângulo direcional de sensibilidade da radiação gama, h_2 é a profundidade que os raios penetraram na fonte, μ_1 and μ_2 são os coeficientes de atenuação no ar e no solo, e r = distância entre o detector e o solo.



Fonte: Adaptado de Kogan et al. (1971) e Løvborg & Kirkegaard (1975).

Embora um modelo de fonte infinita possa parecer irrealístico, não podendo se estender aos dados reais, Gunn (1978) demonstrou o contrário. As aproximações computacionais indicaram que há um decréscimo de 95% na intensidade dos raios gama para cada 25 cm de rocha atravessada, ou seja, a atenuação do meio é um fator importante. Assim, uma concentração de radioelemento que aflore na superfície terrestre e que tenha uma espessura da ordem 1 m produziria praticamente a mesma anomalia radiométrica que uma fonte de radioelementos aflorantes da mesma concentração, mas com uma espessura infinita. Qualquer mergulho do corpo não

influenciaria de maneira marcante os resultados, nem a profundidade finita dos corpos seria importante (Gunn, 1978).

Os dados aerogamaespectrométricos podem ser filtrados e seus perfis podem ser convertidos em mapas que delineiam acuradamente os corpos radioativos, indicando a concentração dos radioelementos (Gunn, 1978; Tammenmaa et al., 1976).

Gunn (1978) usou modelagem no domínio da frequência para representar a resposta de um modelo de prisma vertical com uma largura infinita, e aplicou os filtros de Wiener para deconvolver os perfis 2D das contagens radiométricas para concentrações elementares no solo. Entretanto, para dados reais deve ser admitido que a extensão do método requer maiores contagens e uma amostragem mais frequente e homogênea.

Segundo Kogan et al. (1971) e Gunn (1978), o número de contagens por segundo dos raios gama produzido por uma fonte prismática com uma seção transversal $[a, b] \times [-w, w]$ (FIGURA 11) é encontrado pela integração da intensidade devido a um feixe elementar da seguinte forma:

$$J = \varepsilon c J_0 \int_a^b \int_{-w}^w \frac{h \exp(-\mu_1 r) ds}{2\pi r^3} \quad (19)$$

onde ε é a eficiência do fotopico, c é a concentração da fonte, $J_0 = q/2\mu_2$ é a intensidade na superfície, q é a atividade da fonte, μ_1 e μ_2 são os coeficientes de atenuação linear no ar e no solo, respectivamente, h é a altura de voo, r é a distância entre o detector e o solo, e ds é a área. Considere-se a área de uma faixa que é discretizada como fonte prismática de espessura infinita e seção transversal com área $\Delta x \times \Delta y$. Para cada ponto de observação acima da faixa, as contagens gamaespectrométricas são dadas pelo somatório das contribuições da fonte pontual dentro do *field of view* do detector (Minty & Brodie, 2015). Na implementação computacional apresentada por Weihermann et al. (2021a), a integral na equação (19) é avaliada através da quadratura gaussiana.

Schwarz et al. (1992) modelaram os efeitos da topografia num levantamento aerogamaespectrométrico usando a teoria apresentada por Kogan et al. (1971), já que em terrenos acidentados a altura de voo não se mantém constante. Schwarz et al. (1992) também modelaram as integrais das contribuições dos pontos radioativos e

modelou as respostas em duas e três dimensões, sendo que as respostas foram similares. O procedimento de correção da topografia assume que os efeitos relativos da geometria do solo são conhecidos, então as contagens podem ser reduzidas para uma geometria plana e uma altitude constante.

Craig et al. (1999) aplicou um filtro de continuação para baixo nos dados radiométricos interpolados, continuando os estudos de Gunn (1978). Um pré-requisito para aplicar esse filtro é a redução de ruído espectral através do *Maximum noise fraction* (MNF), sendo que o ruído de alta frequência amplificado pelo passo da deconvolução é controlado pelo filtro de Wiener. Assim, os dados seriam representados de forma quantitativa e mais nítidos.

Billings & Hovgaard (1999) criaram um modelo geométrico de prisma de radiação primária que pode simular levantamentos aerogamaespectrométricos. O modelo calcula a contagem total considerando as características do detector (a angulação, espessura, e coeficiente de atenuação) que influenciam o número de interações considerando o volume.

Billings et al. (2003) apresentaram um modelo de deconvolução de um dado gamaespectrométrico interpolado usando um filtro de Wiener. Um dado gamaespectrométrico é coletado a uma determinada altura, e o detector não pode focar como uma câmera, perdendo resolução a medida que a altura do levantamento aumenta. A qualidade dos dados implementada pelo processamento multicanal (Craig et al., 1999) permitiu desenvolver um método para melhorar a resolução das imagens gamaespectrométricas. O melhoramento proposto pela deconvolução dos dados é limitado pelos níveis de ruído e o pelo grau de suavização imposto pela altura do detector. Assim, eles aperfeiçoaram o modelo proposto por Craig et al. (1999) e incorporaram a sensibilidade direcional nos detectores retangulares (mais comuns) e o movimento do detector no ar, dessa forma a deconvolução corrige a altura nominal do levantamento e a sensibilidade direcional do detector.

Como já mencionado, a correção altimétrica é realizada ponto a ponto e não leva em conta a sobreposição dos círculos amostrais. Para contornar tais problemas a alternativa mais aceita é inverter os dados gamaespectrométricos para concentrações elementares no solo de forma rigorosa, levando em consideração a atenuação do sinal gamaespectrométrico com o aumento da distância fonte-detector (altura de voo), a distribuição das fontes dos radioelementos no solo e a resposta do detector (Minty & Brodie, 2015). A inversão de dados AGRS admite mais de uma

solução, podendo ser usado de acordo com o problema geológico para reduzir a ambiguidade, uma vez que várias formulações e soluções de problemas inversos podem satisfazer os dados geológicos (Druker, 2017).

Atualmente existem duas abordagens principais de inversão gamaespectrométrica: uma desenvolvida por Minty & Brodie (2015), onde os dados são usados antes da aplicação da correção altimétrica, ou seja, sem a correção da altura de voo e a correção de sensibilidade (conversão para concentrações elementares no solo), e a outra proposta por Druker (2017), na qual apenas os fóticos (picos de energia) são retirados dos dados. A proposta de Minty & Brodie (2015) incorpora a sensibilidade dos detectores, os erros dos dados aéreos e um modelo direto da fonte que integra a variação topográfica da área de amostragem (*field of view*) ao longo de todo o levantamento, eliminando assim os efeitos de terreno que normalmente permaneceriam nos dados com o uso dos métodos tradicionais de processamento. O método proposto por Druker (2017) engloba a altura da aeronave, a topografia 3D da área amostral, a sensibilidade direcional dos detectores e um modelo de fonte que compreende prismas verticais retangulares com as mesmas dimensões horizontais da célula da malha requerida. Na presente pesquisa foi estudada a abordagem proposta por Minty & Brodie (2015).

O processamento padrão gamaespectrométrico recomendado pela IAEA (2003), geralmente produz bons resultados quando a geologia é uniforme e as condições de medida são aproximadamente constantes dentro de uma área de interesse e com uma pequena variação na altura de voo (Druker, 2016), o que não é usual na maioria dos aerolevantamentos. Por isso surgiu o interesse em abordar o tema na pesquisa, e propor uma metodologia que superasse essas questões.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Para a aplicação das técnicas propostas na presente pesquisa, foram analisados e preliminarmente interpretados (vide Anexo I) dados aerogamaespectrométricos do projeto aerogeofísico Arco Magmático de Mara Rosa (Estado de Goiás 1ª Etapa - Arco Magmático de Mara Rosa – CPRM/Lasa Prospecções-2004), o qual foi executado com 500 m de espaçamento entre as linhas de voo, e uma altura nominal de 100 m. As áreas do aerolevantamento e do estudo de Mara Rosa estão discretizadas na FIGURA 1. Os procedimentos de aquisição e

correção dos dados são detalhadamente apresentados no Relatório Final do projeto (CPRM, 2004).

Para a calibração do algoritmo de inversão foram utilizados dados da pista de calibração de Maricá – Rio de Janeiro, Brasil, do Projeto Paraná – Santa Catarina (CPRM, 2011) e da pista de calibração de Breckenridge – Ottawa, Canadá (Artigo I).

3.1 GAMAESPECTROMETRIA

3.1.1 Processamento padrão

Os dados do aerolevantamento aerogeofísico do Estado de Goiás - 1ª etapa Arco Magmático de Mara Rosa (CPRM, 2004), foram processados pelo processamento padrão (IAEA, 1991; IAEA, 2003) após passarem pelas correções de tempo morto, redução de ruído, *background* cósmico e da aeronave, correção do efeito *Compton*, correção altimétrica e conversão para concentrações de elementos (sensibilidade) (IAEA, 2003) ilustradas na FIGURA 8. Foram gerados mapas básicos (K, eU, e eTh) e ternários. Os mapas estão dispostos no Capítulo 4, no Artigo II, e no Anexo I no Resumo Expandido I.

Usualmente, os dados são representados na forma de mapas coloridos representando os três canais, potássio, urânio e tório. Os dados foram interpolados em malhas quadradas regulares, correspondentes a $\frac{1}{4}$ (125 m) do espaçamento das linhas de voo, pelo método da mínima curvatura (Briggs, 1974), recomendado pela IAEA (2003) para dados radiométricos.

3.2 INVERSÃO

Primeiramente a inversão gamaespectrométrica foi aplicada aos dados das pistas de calibração dinâmica de Maricá, localizada no Rio de Janeiro, Brasil e de Breckenridge, localizada em Ottawa, Canadá, apresentadas no Artigo I. Foram escolhidas pistas de calibração para testar a metodologia proposta a fim de calibrar o modelo e o algoritmo para ser aplicado em dados 2D posteriormente. Toda a metodologia está descrita no Capítulo 4, no Artigo I “*A log-barrier approach for airborne gamma-ray spectrometry inversion*”.

Após a implementação da metodologia em 1D, e em um ambiente conhecido, a inversão foi aplicada também aos dados do Arco Magmático de Mara Rosa, que está descrita no Anexo I, no Resumo Expandido I “*Airborne Gamma-ray Spectrometry*”.

Inversion: Case Study at Mara Rosa Magmatic Arc, Brazil". Os algoritmos foram implementados em MATLAB.

3.3 CLASSIFICAÇÃO NÃO SUPERVISIONADA

A classificação não supervisionada foi aplicada aos dados do Arco Magmático de Mara Rosa. Para determinar o número de *clusters* de forma automática, foi utilizado um algoritmo com valores de *k* distintos, e o melhor *k* foi escolhido através de um critério pré-definido. Para selecionar o melhor *k* foi aplicado o *Gaussian Mixture Models* (GMMs) em conjunto com o *Bayesian Information Criterion* (BIC). Por fim, foi analisado o número e a separabilidade dos *clusters* para identificar os grupos similares estatisticamente, e aplicada a classificação orientada a objeto para identificar as unidades geológicas da área de estudo. Toda a metodologia está descrita no Capítulo 4, no Artigo II "*Retrieving geological units with unsupervised clustering of gamma-ray spectrometry data*" e foi implementado em MATLAB.

4 ARTIGOS

4.1 INTRODUÇÃO A TEMÁTICA DOS ARTIGOS

O Artigo I, intitulado *A log-barrier approach for airborne gamma-ray spectrometry inversion* apresenta a temática principal da pesquisa que foi desenvolver uma metodologia de inversão com aplicação da barreira logarítmica (*log-barrier*) a dados AGRS.

O Artigo II, intitulado *Retrieving geological units with unsupervised clustering of gamma-ray spectrometry data* apresenta a aplicação da classificação não supervisionada baseada na seleção orientada a objeto para obter automaticamente unidades geológicas do Arco Magmático de Mara Rosa. Esta metodologia foi aplicada aos mapas de concentração obtidos pelo processamento padrão e futuramente poderá ser utilizada nos mapas de concentração obtidos pela inversão de dados em planta, podendo se tornar uma ferramenta útil na interpretação de dados aerogamaespectrométricos.

4.2 ARTIGO I - A LOG –BARRIER APPROACH FOR AIRBORNE GAMMA-RAY SPECTROMETRY INVERSION

Computers & Geosciences 147 (2021) 104682



Contents lists available at ScienceDirect

Computers and Geosciences

journal homepage: www.elsevier.com/locate/cageo



A log –barrier approach for airborne gamma-ray spectrometry inversion

Jessica Derkacz Weihermann^{a,*}, Saulo Pomponet Oliveira^b, Yaoguo Li^c,
Francisco José Fonseca Ferreira^d, Adalene Moreira Silva^e, Richard Fortin^f

^a Universidade Federal do Paraná, Laboratory for Research in Applied Geophysics, Department of Geology, Av. Cel. Francisco H. dos Santos, 100 — Jardim das Américas, P.O. Box 19045, Curitiba, PR, 81531-980, Brazil

^b Universidade Federal do Paraná, Department of Mathematics, Brazil

^c Colorado School of Mines, Department of Geophysics, Center for Gravity, Electrical, and Magnetic Studies, USA

^d Universidade Federal do Paraná, Laboratory for Research in Applied Geophysics, Department of Geology, Brazil

^e Universidade de Brasília, Institute of Geosciences, Brazil

^f Geological Survey of Canada, Natural Resources Canada, Canada

ARTICLE INFO

Keywords:
Geophysics
Inverse problems
Data processing

ABSTRACT

The standard processing of airborne gamma-ray spectrometry (AGRS) data provides useful preliminary information to interpretation in several contexts, such as environmental studies, geological mapping, and analysis of mineral deposits. For optimal results, the acquisition conditions should be nearly constant, and the flight height should be uniform. However, abrupt changes in flight height (often originated from mountainous terrain) are common and lead to spurious variations and incorrect anomaly interpretation. Moreover, the commonly used corrections applied to radiometric data do not consider the effective sampling area of a survey, especially the overlap between successive fields of view. As a consequence, the concentrations estimates of potassium (K), uranium (eU), and thorium (eTh) are not sharp. A solution to deal with this problem is to compute the concentration from the AGRS data through an inversion algorithm. Inversion of AGRS data has shown to be an effective approach to suppress the significant overlap between successive fields of view. We introduce a logarithmic barrier approach for the radiometric inversion to avoid spurious negative values in the radioelement concentration models. We choose calibration ranges from Brazil and Canada to test the proposed methodology. We produced concentration models for K, eU and eTh and compared the standard approach model with the recovered model from both ranges. The predicted data from inversion of both calibration ranges are mostly consistent with the survey data, not over smoothing the data or fitting noise. The predicted data from inversion showed more consistency with the observed data than the one predicted from the standard procedure.

1. Introduction

Airborne gamma-ray spectrometry (AGRS) is an auxiliary method for geological mapping that helps to identify lithological information through the detection of potassium (K), uranium (eU) and thorium (eTh) in rocks (e.g., Gnojek and Prichystal, 1985; Wilford et al., 1997; Wilford, 2002; Gnojek et al., 2018). AGRS data are acquired in a relatively short time and can be cost-effectively included with other surveys such as an aeromagnetic survey. For these reasons, AGRS has been applied in several fields of geosciences with distinct applications (e.g. Leite and Souza Filho, 2009; McCay et al., 2014; Harris and Grusky, 2015; Weihermann et al., 2016; Elkhadragey et al., 2017).

The gamma-ray spectrometry method estimates the concentration of potassium, uranium, and thorium in the first thirty to 45 cm of soil, rocks and weathered materials (Minty, 1997; Wilford, 2002; IAEA, 2003). The gamma radiation emanates from the disintegration of potassium 40 (⁴⁰K), uranium 238 (²³⁸U) and thorium 232 (²³²Th). As uranium and thorium do not emit gamma radiation, the measurements are made by their daughter elements bismuth (²¹⁴Bi) and thallium (²⁰⁸Tl), due to this reason they are referred as equivalent in uranium (eU) and equivalent in thorium (eTh).

As the spectral windows of K, U and Th overlap due to Compton scattering, the spectral window of a radioelement can be influenced by the other radioelements. The stripping correction suppresses this effect

* Corresponding author.

E-mail addresses: jessica.dweih@gmail.com (J.D. Weihermann), saulopo@ufpr.br (S.P. Oliveira), ygli@mines.edu (Y. Li), francisco.ferreira@ufpr.br (F.J. Fonseca Ferreira), adalene@unb.br (A.M. Silva), richard.fortin2@canada.ca (R. Fortin).

<https://doi.org/10.1016/j.cageo.2020.104682>

Received 10 April 2020; Received in revised form 8 December 2020; Accepted 22 December 2020

Available online 29 December 2020

0098-3004/© 2020 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Table 1
Pads concentration (CPRM, 2011).

Pads	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)
Background	0	0	0
K	8.71	0	0
U	0	52.90	0
Th	0	0	136

by applying the stripping ratios, which are the ratios of the counts detected in one window to those in another window from pure sources of the three radioelements (Grasty et al., 1991). The calibration process usually consists of four concrete pads with recommended concentrations of potassium, uranium, and thorium (Table 1) used to calculate the stripping ratios (IAEA, 2003).

Ideally, three of these pads should provide pure spectra of potassium, uranium, and thorium so that the interfering effects of these elements can be best determined. A fourth pad with negligible radioactivity is required to remove the background radiation effects that could be produced by the surrounding ground, the instruments, cosmic radiation, and radon decay products in the air (Grasty et al., 1991). They are

exposed one at a time to the aircraft, being positioned directly below the crystal pack being tested (Fig. 1).

The airborne measurements are made at an established height, and the elemental count rates should be estimated as elemental concentrations in the soil by a sensitivity factor that depends only on the essential radiation and the flight height (IAEA, 2003). The correction by the sensitivity factor is performed on a point-by-point basis.

A thallium-activated sodium iodide (NaI(Tl)) gamma-ray detector has a large field of view, receiving radiation from any direction (Grasty et al., 1979), which can result in significant overlap between successive data points. One way to suppress this overlap is inverting the AGRS data for elemental concentrations. The inversion would consider the attenuation of gamma-ray signal with the source-detector distance, that also depends on the flight height, the distribution of K, eU, and eTh in the ground, and the detector response (Kogan et al., 1971; Minty and Brodie, 2015). Classical AGRS inversion techniques (e.g. Tammenmaa et al., 1976; Gunn, 1978; Crossley and Reid, 1982; Schwarz, 1992) have been revisited to take into account the detector field of view and signal attenuation by previous authors (Billings et al., 2003; Minty and Brodie, 2015; Druker, 2017).

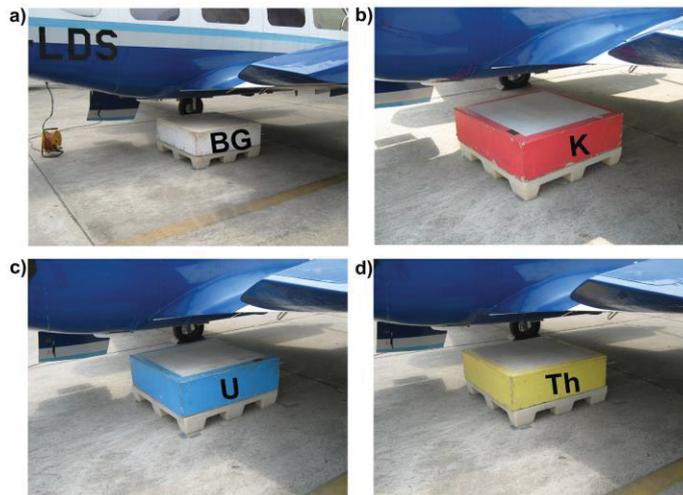


Fig. 1. – Calibration pads. a) Background; b) Potassium, c) Uranium and d) Thorium (Adapted from CPRM, 2011).

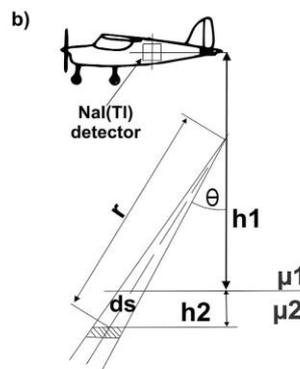
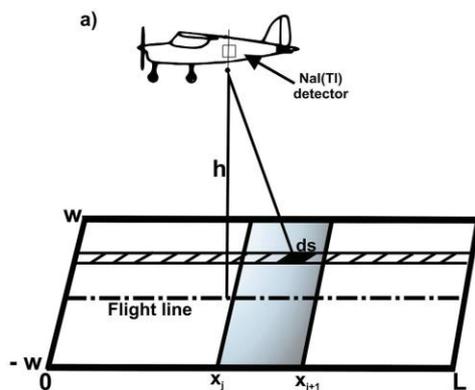


Fig. 2. – Schematic model of AGRS acquisition over a calibration range (Adapted from Kogan et al., 1971 and Løvborg and Kirkegaard, 1975). (a) dashed lines - flight line profile, cross-sectional area $[0, L] \times [-w, w]$ where w is the half-width of the sources, ds is the infinitesimal cross-sectional area and h is the flight height. (b) θ is the directional sensitivity angle of the gamma-ray radiation, $h1 = h$ is the flight height, $h2$ is the depth of the gamma-ray has penetrated the source, μ_1 and μ_2 are the attenuation parameters (air and earth), and r is the distance between the detector and ground. The w parameter was set based on the width of the strip-of-investigation of a moving detector (Dentith and Mudge, 2014), related to the field of view in the y-axis direction.

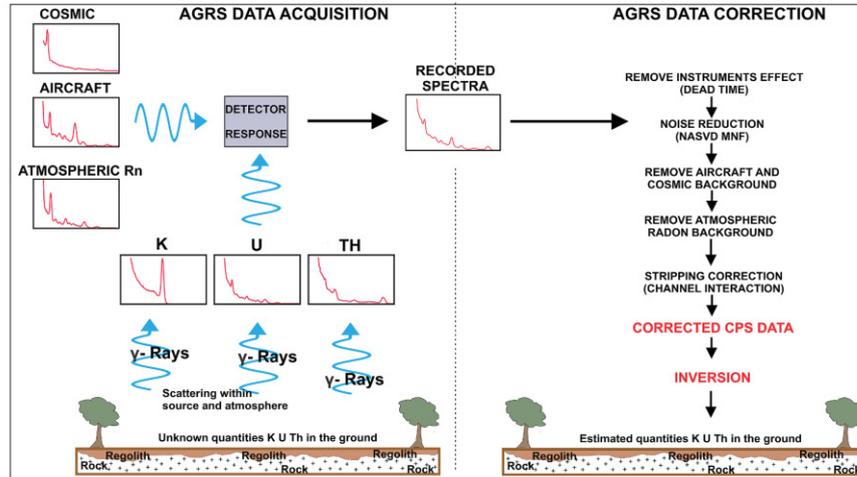


Fig. 3. Flowchart of AGRS acquisition and processing. The corrections in red were implemented in this work. Adapted from Dentith and Mudge (2014). (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the Web version of this article.)

Table 2
Parameters used in the inversion for K, U, and Th.

E (MeV)	μ_1 (m^{-1})	μ_2 (m^2/kg)	q (Bq/kg)	ϵ_p Maricá	ϵ_p Breckenridge	η_e Maricá	η_e Breckenridge
K (1.46)	68×10^{-4}	0.00528	370	0.11	0.17	0.82	1.09
U (1.76)	62×10^{-4}	0.00482	40	0.09	0.06	0.68	0.43
Th (2.62)	51×10^{-4}	0.00396	40	0.04	0.02	0.30	0.16

In order to obtain physically meaningful results in the inversion process, the forward modeling step, which theoretically evaluates the number of counts per second (cps) in the airborne detector array, must be correctly performed. In this work we address this issue by considering classical models complemented with physical parameters from the literature and from calibration ranges in Rio de Janeiro, Brazil and in Ottawa, Canada. The predicted data from standard approach are then compared with the observed data from the calibration flight at the same height as the survey (acquired during the airborne dynamic calibration range).

When a statistical analysis is required, negative values in an airborne gamma-ray spectrometry data should be taken in account, as they provide information of the successive corrections, such as dead time, background, and stripping (Grant, 1998), and are important to estimate the errors in the system.

Usually, in low count rates it is difficult to evaluate the noise level, and as the standard corrections are applied to the data, negative concentration values may be produced (Killeen, 2015). Likewise, standard least-squares inversion may produce models with negative concentrations. Such negative values are spurious and could compromise the quantitative interpretation of the concentration maps (IAEA, 2003). A workaround is to add some threshold to mask the negative values, without interfering in the data signal.

There exist several approaches to impose positivity in a more rigorous manner, such as adding constraints to the least-squares system (Renner, 1993) and mapping the bounded parameters to an unbounded domain (Commer and Newman, 2008; Wang et al., 2015). We have chosen to implement a logarithmic barrier method, where the solution is obtained by solving a sequence of non-linear minimization problems (Li and Oldenburg 2000; Nocedal and Wright, 2006).

2. Methodology

Following the classical literature on AGRS, we shall assume that the sources are distributed only in the lower half-space and are formed by elementary rods with constant radioactivity (Kogan et al., 1971), as illustrated in Fig. 2.

We inverted the data from a strip (Fig. 2a) of concentration $c(x)$ and represented the survey area of a calibration range as a set of prismatic sources. The horizontal limits of the calibration range are $[0, L]$ by $[-w, w]$, which is divided into M cells $[x_j, x_{j+1}]$ by $[-w, w]$ ($1 \leq j \leq M$). Within each cell, the radioactive source is represented as a homogeneous, vertically semi-infinite prism. Following Kogan et al. (1971) and Gunn (1978), the number of gamma-rays per seconds is found by integration of the intensity due to elementary rods within this prism as follows:

$$J = c A \epsilon_p J_0 \frac{h}{2\pi} \int_{x_j}^{x_{j+1}} \int_{-w}^w \frac{\exp(-\mu_1 r)}{r^3} ds, \quad (1)$$

where c is the source concentration in a rod, A is the detector area, ϵ_p is the photopeak efficiency, $J_0 = q/2\mu_2$ is the surface radiation intensity, q is the source activity, μ_1 (μ_2) is the attenuation parameter in the air (earth), h is the flight altitude, r is the distance between the detector and ground. The directional sensitivity of the detector was calculated based on Tewari and Raghuvanshi (1987) as follows:

$$A\epsilon_p = A_0\epsilon_0(a + b \cos\theta), \quad (2)$$

where $A_0\epsilon_0$ is the parallel radiation, θ is the angle given in Fig. 2b, and $a = 0.39$ and $b = 0.61$ (Tewari and Raghuvanshi, 1987). We have that $A\epsilon_p = A_0\epsilon_0$ for $\theta = 0$, i.e., A_0 is the horizontal cross section of the detector and ϵ_0 is the photopeak efficiency along the vertical direction.

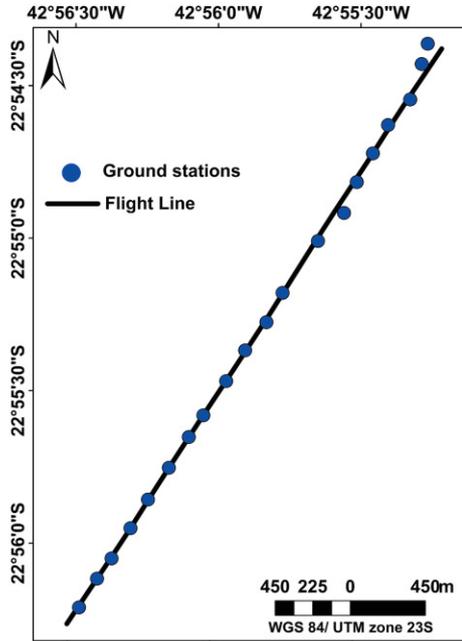


Fig. 4. – Simplified Maricá dynamic calibration range (Adapted from CPRM, 2011).

Following Billings and Hovgaard (1999), we have that

$$\varepsilon_0 = \eta_e \varepsilon_t, \quad (3)$$

where η_e is the detector photofraction and ε_t is the total efficiency along the vertical direction. The latter is given as follows (Kogan et al., 1971; Billings and Hovgaard, 1999):

$$\varepsilon_t = 1 - e^{-\mu d}, \quad (4)$$

where μ is the absorption coefficient for gamma-rays at a given energy level (E), and d is the thickness of the detector. The detector efficiency and photoefficiency are characteristics of the sensor sensitivity (Kogan et al., 1971). The total efficiency for potassium, uranium, and thorium are 85%, 83%, and 78% (Billings and Hovgaard, 1999).

To develop our inversion methodology for the AGRS data, we followed Minty and Brodie (2015) approach, where an inversion method is applied to the corrected and stripped background data (Fig. 3), replacing the height and sensitivity corrections as well as accounting for the overlapping.

The AGRS inversion consists in using counts per second (cps) data and finding the concentration model. The known parameters used in the inversion are the detector area A , the photopeak efficiency ε_p , the source activity q , attenuation coefficients μ_1 and μ_2 , and the nominal flight height h . The values of the attenuation coefficients and the source activity for each radioelement are presented in Table 2. It is also important mention that the choice of possible combinations of μ and q is unlimited and is therefore necessary to consider only the configurations of the sources and absorbing media which are typical for gamma-ray spectrometry problems (Kogan et al., 1971).

2.1. Forward modeling

We regard as model parameters the elemental concentration c_j in

each cell $[x_j, x_{j+1}] \times [-w, w]$. Using equation (1), we find the total contribution of all cells to the i th record of number of counts per second:

$$cps_i = \sum_{j=1}^M c_j A \varepsilon_p \int_{x_j}^{x_{j+1}} \int_{-w}^w \frac{e^{-\mu_1 |\vec{r}_i - \vec{r}|}}{|\vec{r}_i - \vec{r}|^3} ds = \sum_{j=1}^M c_j \tilde{G}_{ij}, \quad (5)$$

where \vec{r}_i is the position of i th observation point above the strip and \vec{r} denotes the position on the ground. In other words, the gamma count for each observation point is given by the sum of the prismatic-source contributions of the detector sampling area (Minty and Brodie, 2015). The integral in equation (1) is evaluated through Gaussian quadrature.

In matrix form, $\vec{d} = \tilde{G} \vec{m}$, where $\vec{m} = (c_1, c_2, \dots, c_M)^T$ is the model vector (elemental count rates), $\vec{d} = (cps_1, cps_2, \dots, cps_N)^T$ is the data vector (counts per second), and $\tilde{G} = [\tilde{G}_{ij}]$ is the sensitivity matrix.

To correct possible discrepancies between the parameters from equation (1) reported in the literature and the actual parameters of the survey area, we have included a correction factor (c_f) in the sensitivity matrix:

$$G = c_f \tilde{G}. \quad (6)$$

The correction factor (c_f) is chosen as the scaling factor that minimizes the dispersion in the L2 norm between the data vector \vec{d} and the predicted data $\vec{d}_{st} = \tilde{G} \vec{m}_{st}$ obtained from the concentration vector \vec{m}_{st} provided by standard processing:

$$c_f = \underset{\tau}{\operatorname{argmin}} \|\vec{d} - \tau \vec{d}_{st}\|, \quad (7)$$

which can be expressed in terms of \vec{d} and the predicted data \vec{d}_{st} as follows:

$$c_f = \frac{\vec{d}^T \vec{d}_{st}}{\vec{d}_{st}^T \vec{d}_{st}}. \quad (8)$$

2.2. Inversion method

The inverse problem corresponds to finding the vector of unknown parameters \vec{m} that solves the linear system $\vec{d} = G \vec{m}$. We numerically solve the inversion by seeking the minimum of the weighted sum of the data misfit and model objective function, subject to positivity constraints,

$$\min \phi = \phi_d + \lambda \phi_m, \quad (9)$$

subject to $0 \leq m_j \leq u$, $j = 1, \dots, M$

where ϕ_d represents the data misfit, ϕ_m accounts for the model roughness, u is an upper bound introduced for numerical stability when implementing the positivity constraints, and λ is the regularization parameter (Li and Oldenburg, 2000; Minty and Brodie, 2015). We define the model roughness as follows:

$$\phi_m = \alpha_s \int_0^L (m - m_0)^2 dx + \alpha_x \int_0^L \left\{ \frac{\partial(m - m_0)}{\partial x} \right\}^2 dx, \quad (10)$$

where m_0 is a reference model. We use the smallest and flattest model norm, where the coefficients α_s and α_x are constants and allow to weight between the two components (Oldenburg and Li, 2005). According to Li and Oldenburg (2000) α_s should be much smaller than α_x . We can discretize equation (10) into a matrix form:

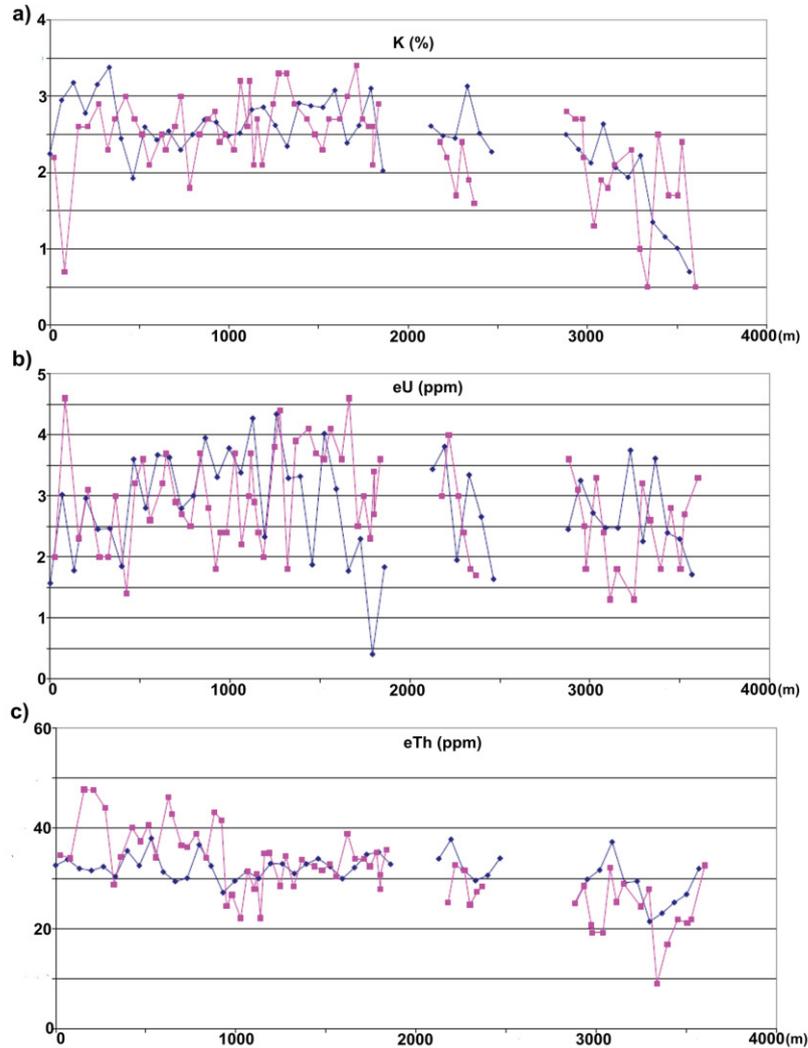


Fig. 5. – Dynamic calibration comparative profiles of a) potassium, b) uranium, and c) thorium. (Adapted from CPRM, 2011). The ground concentrations are represented in magenta, and the airborne concentrations are represented in blue. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the Web version of this article.)

$$\phi_m = \left(\vec{m} - \vec{m}_0 \right)^T \left(\alpha_s W_s^T W_s + \alpha_x W_x^T W_x \right) \left(\vec{m} - \vec{m}_0 \right) \equiv \left\| W_m \left(\vec{m} - \vec{m}_0 \right) \right\|^2. \quad (11)$$

Likewise, the matrix form of the misfit between the predicted data $G\vec{m}$ and the observed data d is:

$$\phi_d = \left\| W_d \left(G\vec{m} - \vec{d} \right) \right\|^2, \quad (12)$$

where W_d is the data weighting matrix, which in this work is the identity matrix ($W_d = I$), for we do not have a direct estimation of noise level.

To implement the bound constraints, we use the log barrier method (Nocedal and Wright, 2006). Li and Oldenburg (2000) use this method to impose similar bound constraints in induced polarization (IP) inversion. The upper bound (u) was defined by theoretical values of the

radionuclides (K, eU, eTh) concentrations provided from the data. The updated functional including the log barrier term in the objective function is given as:

$$L(\vec{m}, \eta) = \phi_d + \lambda \phi_m - 2\eta \left\{ \sum_{j=1}^M \ln \left(\frac{m_j}{u} \right) + \sum_{j=1}^M \ln \left(1 - \frac{m_j}{u} \right) \right\}, \quad (13)$$

where η is the barrier parameter. The regularization parameter (λ) was calculated using generalized cross validation (GCV) by Craven and Wahba (1979). To seek the minimum of (13) we start with a large u that fits for the three radioelements and an initial model that fits the lower and upper bounds. As interactions within the algorithm occur and tends to the iterate towards the final solution, η tends to zero (Li and Oldenburg, 2000).

In order to update the model, a Newton step is performed to compute

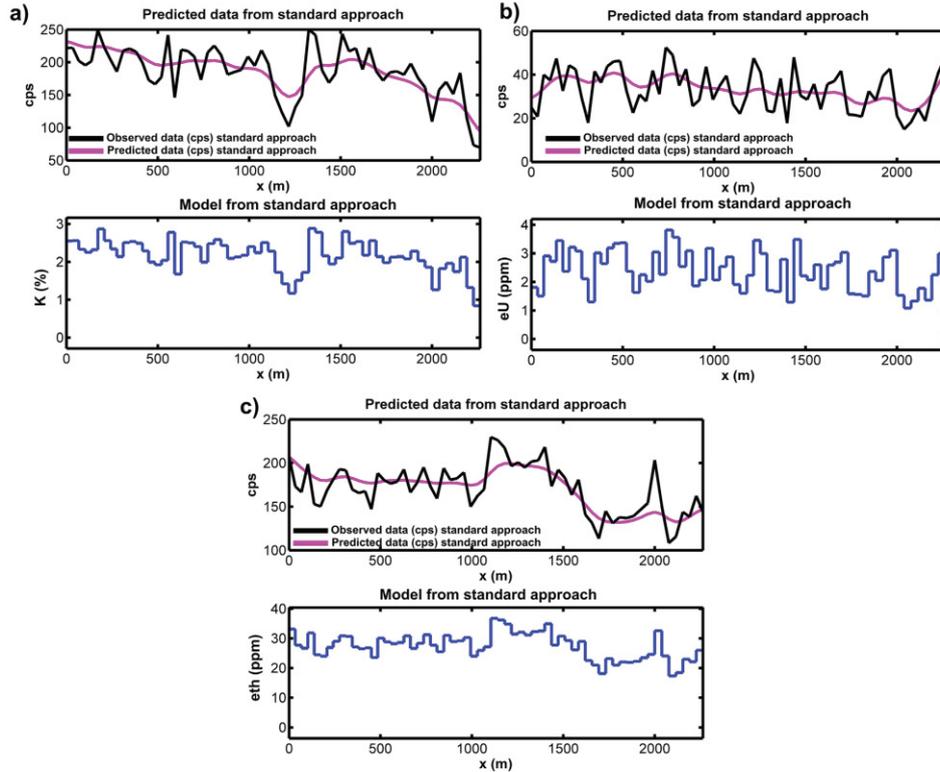


Fig. 6. Standard approach for the K (a), eU (b), eTh (c) in the Maricá Calibration Range. In blue is represented the standard approach model (concentration), in black the observed data (cps), and in magenta the predicted data (cps) from the standard approach. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the Web version of this article.)

the model perturbation ($\Delta \vec{m}$), and a limited step length is found to keep the model within the bound constraints:

$$\begin{aligned} (J^T W_d^T W_d J + \lambda W_m^T W_m + \eta X^{-2} + \eta Y^{-2}) \Delta \vec{m} = & -J^T W_d^T W_d (G \vec{m} - \vec{d}) \\ -\lambda W_m^T W_m (\vec{m} - \vec{m}_0) + \eta (X^{-1} - Y^{-1}) \vec{e}, \end{aligned} \quad (14)$$

where $X = \text{diag}\{m_1, m_2, \dots, m_M\}$, $Y = uI - X$, and $\vec{e} = (1, \dots, 1)^T$.

Afterwards, the model and barrier parameter are updated as follows:

$$\begin{aligned} \vec{m} & \leftarrow \vec{m} + \gamma \rho \Delta \vec{m}, \\ \eta & \leftarrow [1 - \min(\gamma, \rho)] \eta, \end{aligned} \quad (15)$$

where γ is a parameter that prevents the model elements from reaching the bounds, maintaining the values positive and enhancing the convergence, while ρ is given by maximum step length conditions (Nocedal and Wright, 2006; Li and Oldenburg, 2000; Baptista et al., 2005). We repeat the iterations until the absolute value of the relative difference of consecutive values of $\phi = \phi_d + \lambda \phi_m$ is below 10^{-4} , or until the number of iterations is 100.

3. Application to calibration range data

We applied the methodology presented in the preceding section to the data collected from the calibration ranges in the Maricá – Brazil and the Breckenridge – Canada. We choose a calibration range to apply our

methodology due to its known parameters, and their standard procedures following IAEA regulations (IAEA 1991, 2003). A dynamic calibration range, usually a planar surface, is used to determine the radiometric system sensitivities and altitude attenuation factors. In such a survey, an aircraft flights over the range at different altitudes and the ground measurements are made, concurrently, using a handheld spectrometer at predetermined stations.

The calibration of airborne systems is usually determined by repeatedly flying over calibration ranges (also known as test strips) to measure the variation in the detector response to changes in the flight height and to sources of known elemental concentrations. The directions and instructions of a calibration range are provided by IAEA (1991).

We used the concrete pads to calculate the photofraction for each radioelement. The dimensions of the pads are $1 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 0.30 \text{ cm}$, and their concentrations, given in Table 1, are similar to the one recommended by IAEA (1991) (K: 8%; U: 50 ppm; Th: 125 ppm). Considering the height $h = 0.75 \text{ m}$, we have used equation (1) to find the theoretical counts and estimate the detector efficiency.

We also multiplied the efficiency by a geometric factor (crystal thickness), as the detector efficiency can vary with distance within the crystal (Ahmadi et al., 2018). The detector packs employed in both acquisitions have crystal thickness $d = 0.102 \text{ m}$ and cross-sectional area $A = 0.17 \text{ m}^2$. In the following we describe the parameters employed in equation (1). The attenuation coefficients are reported in Grasty (1979) in the air (μ_1) and on the ground (μ_2), the source activity (q) is reported by UNSCEAR (2000) for concrete. The estimated values for our parameters are consistent with the values available in the literature

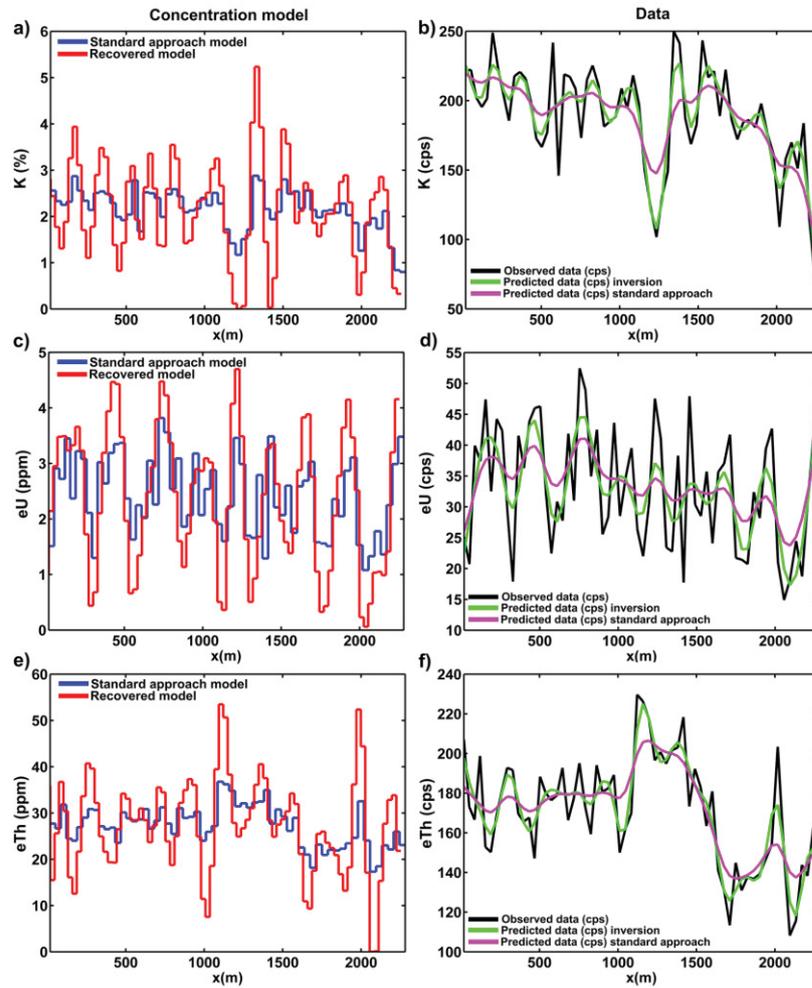


Fig. 7. (a, c, e) Recovered models from inversion (red) and standard approach model (blue); (b, d, f) predicted data from inversion (green), predicted data from standard approach (magenta) and observed data (black) of K (a, b), eU (c, d) and eTh (e, f), with log barrier approach of the Maricá Calibration Range. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the Web version of this article.)

(Grasty, 1979; Billings and Hovgaard, 1999; Minty and Brodie, 2015). The parameters used in the inversion are presented in Table 2, such as the values of the attenuation coefficients and the source activity for each radioelement.

3.1. Case study: Maricá calibration range, Rio de Janeiro, Brazil

The data were acquired on 10/17/2010, as a part of the airborne geophysical Project Paraná- Santa Catarina (CPRM, 2011). The test strip was flown at different heights over the Maricá calibration range (Fig. 4) and Maricá lagoon, where the survey height was $h = 100$ m. The ground concentrations were measured using a handheld spectrometer in approximately 70 ground stations, concurrent with the airborne calibrations. These measurements enable us to estimate the sensitivity coefficients of the AGRS system, which are used to convert numbers of counts per seconds to concentrations of the radioelements on the ground (CPRM, 2011). The reason why lines were flown at different altitudes is to calculate the attenuation coefficients, which are used for the height

correction in traditional AGRS processing. The attenuation parameters for each radioelement are obtained from the background-corrected and stripped window count rates.

Fig. 5 shows the dynamic calibration comparative curves, in which the ground concentrations are compared with the airborne concentrations. Potassium and Thorium show a light discrepancy between airborne and ground measurements, but the acquired data for uranium showed good correlation between them. It is always important to check the survey data before modeling them, because this will be reflected in the modeled results.

3.1.1. Standard approach

We used the observed data with noise reduction (NASVD or MNF), and all the recommended corrections made by the survey provider (CPRM, 2011). The standard approach is shown in Fig. 6, where the observed data are the numbers of counts per second (cps), and the model is the concentration. We note that the predicted data $G\vec{m}_{st}$ from the

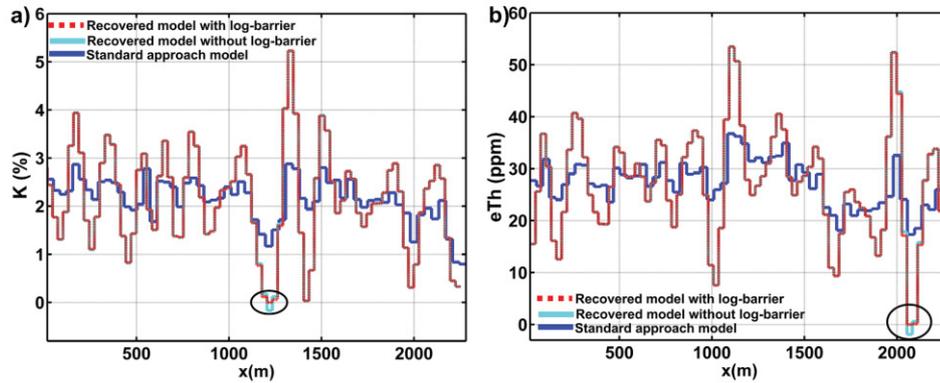


Fig. 8. Recovered models from inversion (red, dashed lines) with log barrier, inversion (ciano) without log barrier and standard approach model (dark blue). The negative values are circled in black. (a) K and (b) eTh. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the Web version of this article.)

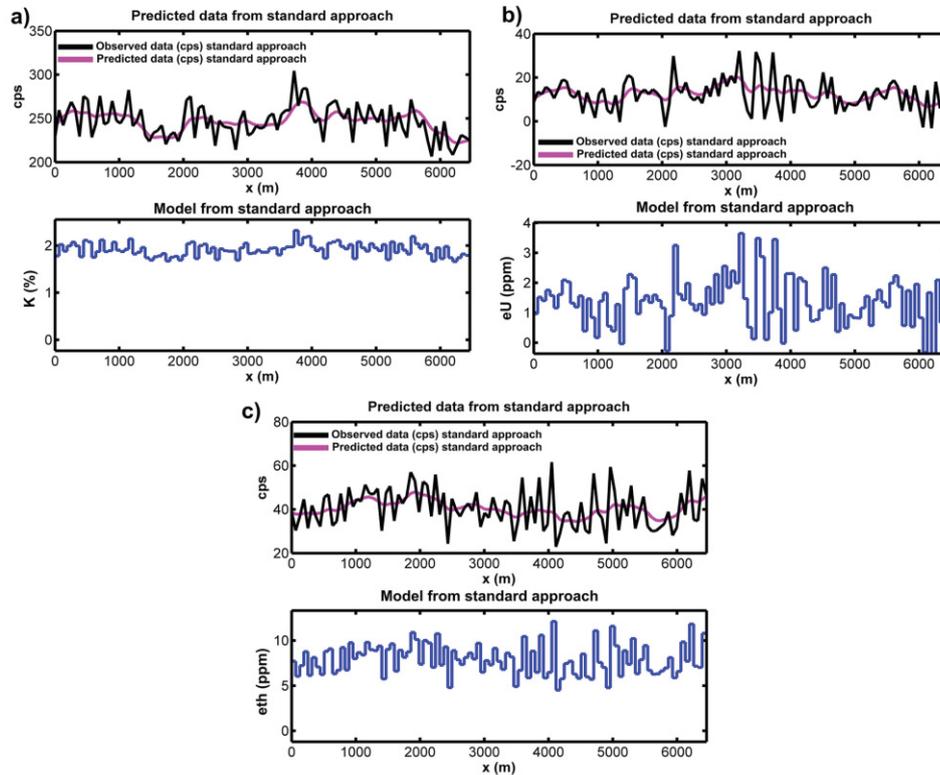


Fig. 9. Standard approach for the K (a), eU (b), eTh (c) in the Breckenridge Calibration Range. In blue is represented the standard approach model (concentration), in black the observed data (cps), and in magenta the predicted data (cps) from the standard approach. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the Web version of this article.)

standard approach (Fig. 6 magenta line) provides a smoothed version in the three radioelements when compared with the variations in observed data, especially in uranium (eU). The uranium curve (magenta line in Fig. 6b) is too smooth compared with potassium (Fig. 6a) and thorium (Fig. 6c) curves, which could be possibly explained by lower radiation

intensity with respect to K and Th and by its disequilibrium (Dentith and Mudge, 2014) which is reflected in a lower signal-to-noise ratio. The predicted data curves are smoother than the observed data and are clearly not significantly affected by the noise.

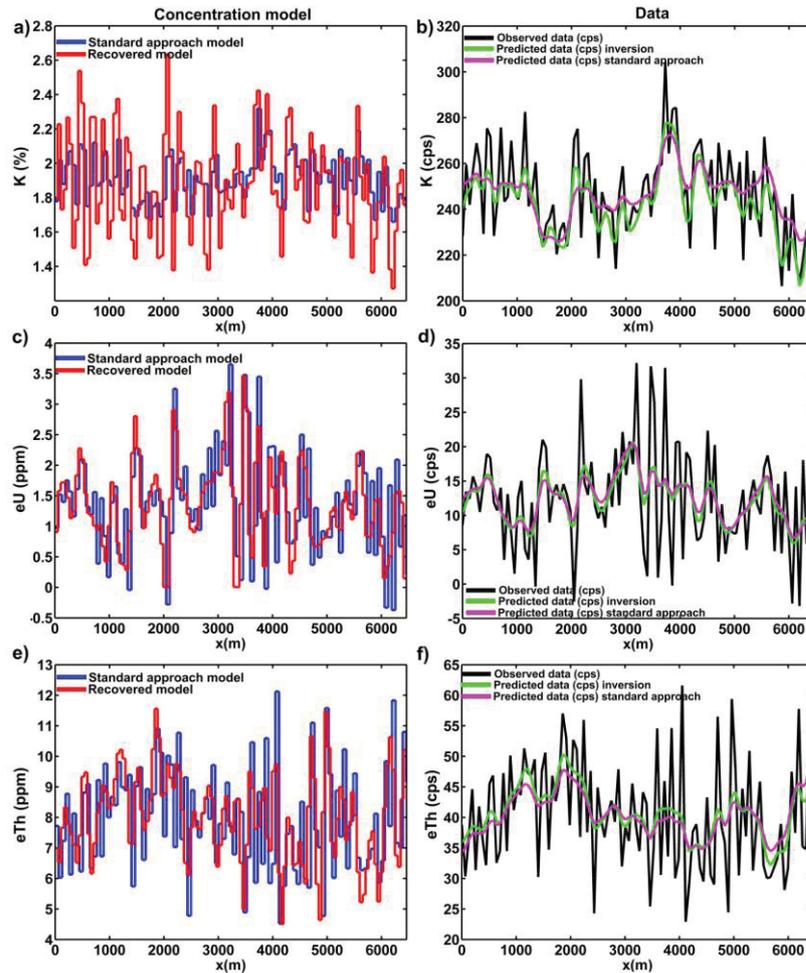


Fig. 10. (a, c, e) Recovered models from inversion (red) and standard approach model (blue); (b, d, f) predicted data from inversion (green), predicted data from standard approach (magenta) and observed data (black) of K (a, b), eU (c, d) and eTh (e, f), with log barrier approach of the Breckenridge Calibration Range. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the Web version of this article.)

3.1.2. Inversion results

Fig. 7 (a, c, and e) shows the comparison between the concentration models from standard processing and from inversion of potassium, uranium, and thorium, along with the comparison between observed data (cps), predicted data from inversion and predicted data from standard approach (Fig. 7 b, d, and f). The recovered models of K, eU, and eTh showed consistency with the standard approach model of airborne data. The K, eU and eTh curves (Fig. 7 a, c, and e) tend to follow the observed data (Fig. 7 b, d, and f), especially in the higher-amplitude locations.

The predicted data from inversion models suppress the noise in observed data for the three radioelements (K, eU, eTh), without smoothing too much. The predicted data from standard approach tends to over smoothed. Fig. 7 (b, d, and f) shows that the predicted data from the standard approach cut off the noise, while predicted data from inversion sometimes tends to model some noise in the higher amplitudes. Reducing the noise too much could also imply losing some important data. In the case of Maricá calibration range, the observed

data do not have negative values, and the inversion has provided good results, as tends to not over smooth the data.

Fig. 8 shows the K and eTh curves from the standard approach, the recovered model without log barrier and the recovered model with log barrier. Potassium and Thorium recovered models showed negative concentrations, despite their curves being correlated with the standard approach model.

The recovered models from the inversion with and without the log barrier are practically the same, with an exception for the negative values obtained by the inversion without log barrier. The log barrier recovered models suppress the negative model values from noisy data. Comparing recovered models from inversion without log barrier (Fig. 8 a, b ciano curve) and with log barrier (Fig. 8 a, b red curve) is possible to note that the curves from K and eTh remain almost the same, since the positivity bound is not need and, therefore, has no effect in this case.

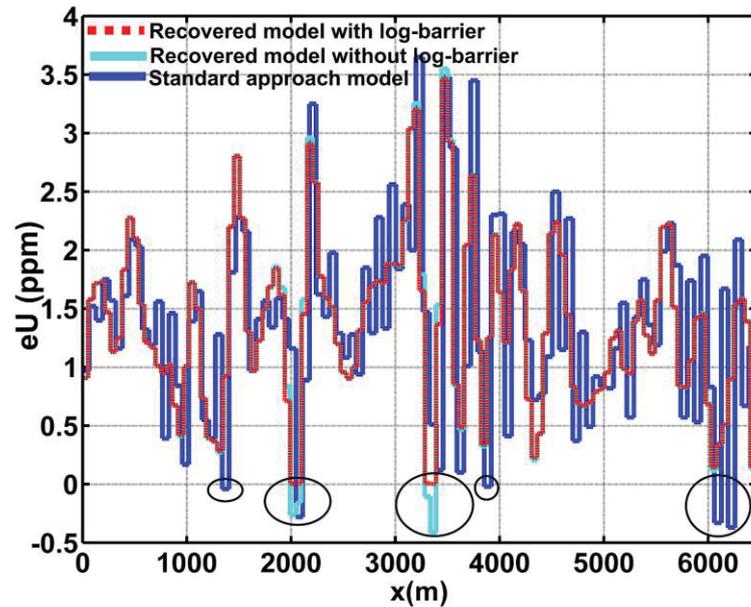


Fig. 11. eU recovered model from inversion (red, dashed lines) with log barrier, inversion (ciano) without log barrier and standard approach model (dark blue). The negative values are circled in black. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the Web version of this article.)

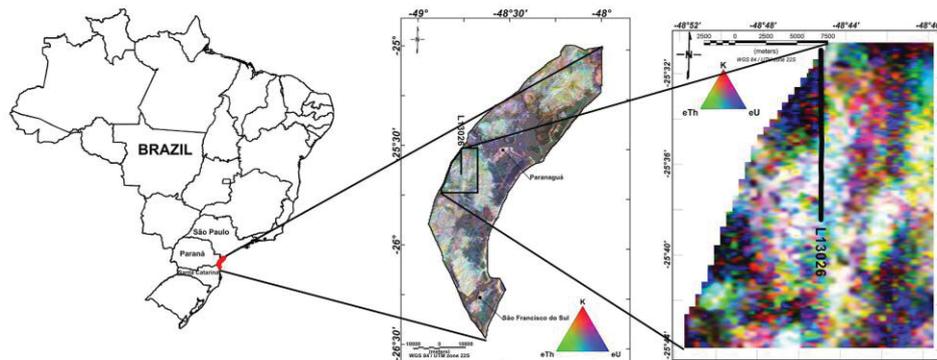


Fig. 12. Location of the data profile (line 13026) from the Paraná-Santa Catarina geophysical survey shown in the ternary image (R–K, G–eTh, B–eU) processed by standard approach.

3.2. Case study: Breckenridge calibration range, Ottawa, Canada

The Breckenridge dataset was collected from a survey from Natural Resource Canada and is located in Ottawa – Canada. The aircraft performed a calibration flight over the strip to calculate the sensitivity factor and height attenuation of the radiometric system. The aircraft repeated flights over the test line and an adjacent over-water line (for background corrections) at different altitudes between 60 and 240 m, and in the standard survey height of 150 m.

3.2.1. Standard approach

We used the observed data already processed to reduce noise (NASVD or MNF), and with all the recommended corrections made by the survey provider (Natural Resources Canada). The standard approach model is shown in Fig. 9, where the observed data are the number of

counts per second (cps), and the derived model is the concentration. The observed data in this case have a considerable noise, especially in uranium and thorium channels (Fig. 9b and c). This noise level is also reflected in the predicted data from standard approach (magenta line).

3.2.2. Inversion results

Fig. 10 (a, c, and e) shows the comparison between the concentration models from standard processing and from inversion of potassium, uranium, and thorium, along with the comparison between observed data (cps), predicted data from inversion and predicted data from standard approach (Fig. 10 b, d, and f). The observed data (cps) are noisy, and this is reflected in the higher-amplitude locations in the concentration models from the standard approach (blue curve) and in the recovered model (red curve). The predicted data from inversion suppress the noise in potassium, uranium and thorium, especially in eU

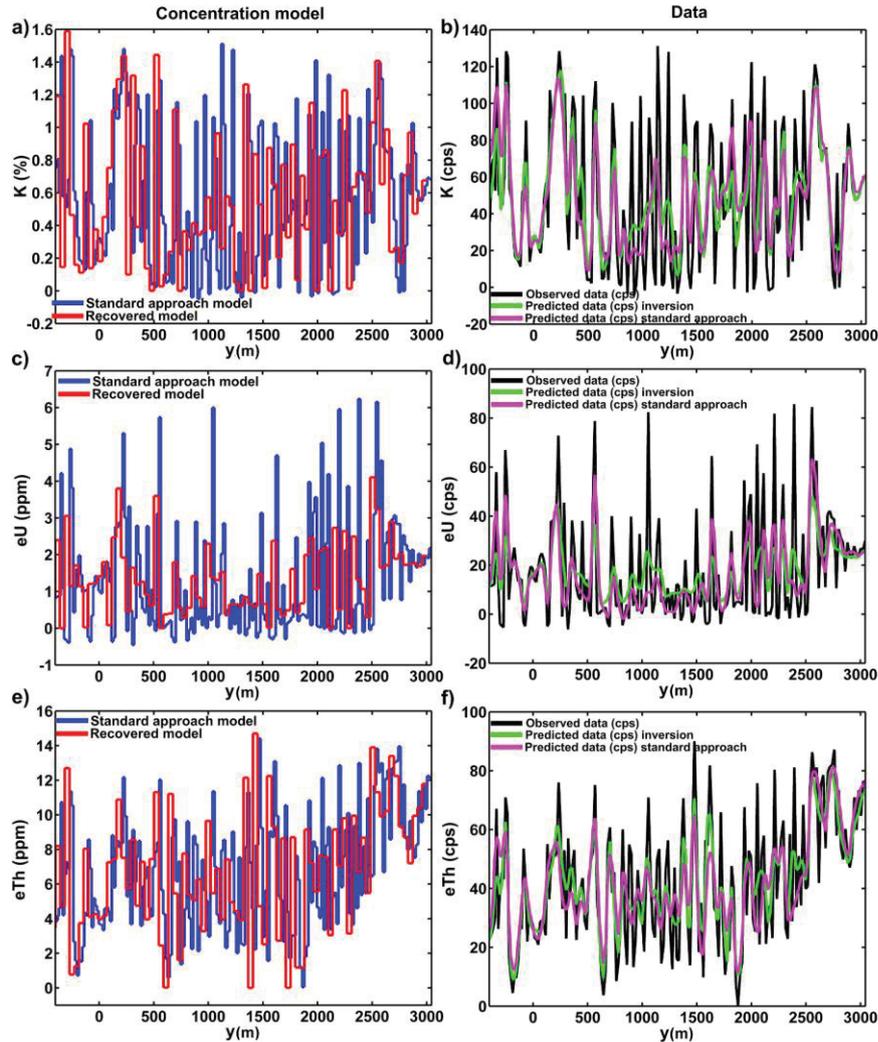


Fig. 13. (a, c, e) Recovered models from inversion (red) and standard approach model (blue); (b, d, f) predicted data from inversion (green), predicted data from standard approach (magenta) and observed data (black) of K (a, b), eU (c, d) and eTh (e, f), with log barrier approach of the Flight Line 13026 from PR-SC Survey. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the Web version of this article.)

and eTh. The potassium predicted data from inversion and from standard approach (Fig. 10b) are very similar, and both tend to outline the noise, reflecting directly in the concentration models from standard approach (Fig. 10a blue line) and from inversion (Fig. 10a red line). The uranium observed data show negative values, which are also present in the standard approach model (Fig. 10c and d), probably due to its characteristic disequilibrium, which can be increased by the range being covered by snow in a few months.

Fig. 11 shows the uranium (eU) standard approach model, recovered model without log barrier and the recovered model with log barrier. The recovered models from the inversion with and without the log barrier are practically the same, with an exception for the negative values caused by the data noise. While the inversion algorithm without log barrier avoids some of the negative concentrations observed at the standard approach model, the one with log barrier totally suppresses

these negative values.

4. Application to airborne gamma-ray spectrometry data from a field survey

To test the proposed methodology, we choose a flight line profile from an airborne geophysical survey in Paraná and Santa Catarina, southern Brazil. The aircraft and equipment for the survey were calibrated in the Maricá Calibration Range. The Paraná-Santa Catarina survey was flown with an altitude of 100 m, and the flight lines were spaced by 500 m. This survey was used in Weihermann et al. (2016) to study the AGRS response of different granitic bodies in the Paraná/Terrane. The Paraná/Terrane is characterized by an igneous complex with a variety of granitic rocks distributed from the northeast of the state of Santa Catarina to the southeast of the state of São Paulo (Weihermann

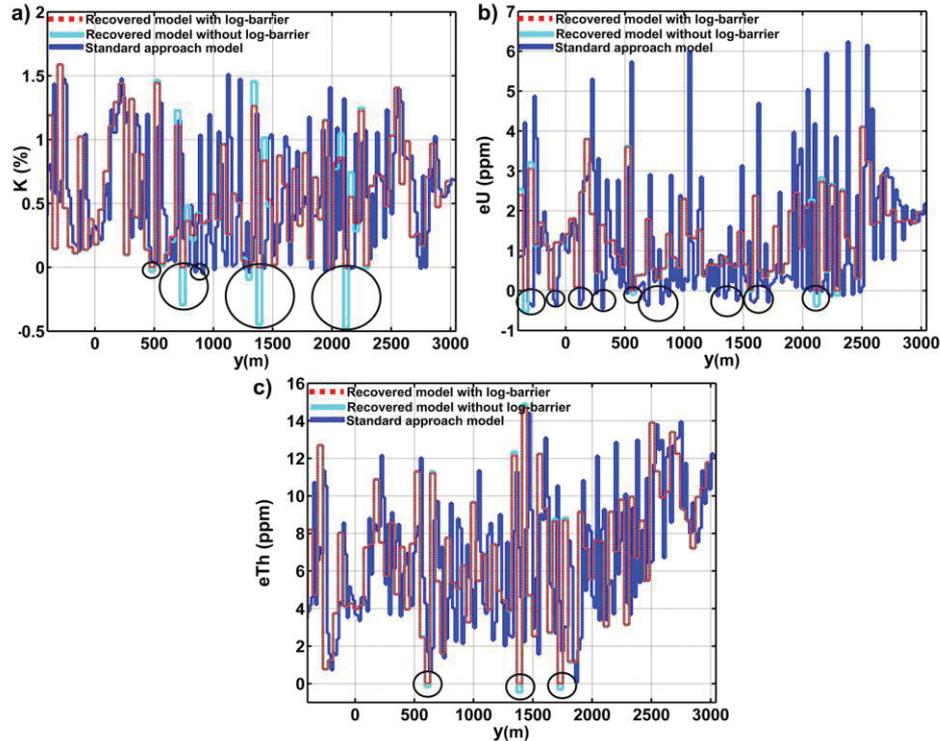


Fig. 14. Recovered models from inversion (red, dashed lines) with log barrier, inversion (ciano) without log barrier and standard approach model (dark blue). The negative values are circled in black. (a) K, (b) eU and (c) eTh. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the Web version of this article.)

et al., 2016). The profile flight line 13026 is shown in Fig. 12.

4.1. Inversion results

In Fig. 13 we applied the log-barrier approach to the data profile. Fig. 13 a, c, and e show the comparison between the concentration models from standard processing and from inversion of potassium, uranium, and thorium, along with the comparison between observed data (cps), predicted data from inversion and predicted data from standard approach in Fig. 13 b, d, and f. The observed data (cps) is noisier than the data from the calibration ranges (Figs. 7 and 10), possibly due to the topography. The predicted data from inversion suppress the noise in the K, eU and eTh, especially in potassium and uranium channels. The predicted data from standard approach is over smoothed, similarly to the results with calibration range data. Moreover, the standard approach is not able to avoid negative concentration values, which can be noted in all elements (Fig. 13 a, c, and e).

Fig. 14 shows the K, eU and eTh curves from the standard approach model, recovered model without log barrier and the recovered model with log barrier. In K, eU and eTh curves, the recovered models from the inversion with and without the log barrier are similar, except for the negative values caused by the data noise. In Potassium, the recovered model from inversion without log barrier shows significant negative values, and the inversion with log barrier follow the standard approach model but is not affected by the noise. While the inversion algorithm without log barrier avoids some of the negative concentrations observed at the standard approach model, the one with log barrier totally eliminates these negative values. In all radioelement curves, the log barrier

recovered models suppress the negative model values caused by noisy data.

Displayed in Fig. 15 are ϕ_d , ϕ_m and η as functions of interaction number. In the three radioelements, the ϕ_d , ϕ_m and η curves follow the same pattern. The thorium ϕ_d and ϕ_m curves are closer than in the other elements, and this relation can be seen in the models in Fig. 14c. The ϕ_d and ϕ_m curves remains practically proportional and do not fit the noise. The red dashed lines represent the ϕ_d from inversion without log barrier. The log barrier curves reach these values before the stopping criteria are met.

5. Discussion

Airborne gamma-ray spectrometry inversion has been shown as an efficient procedure to reduce the overlap of the successive fields of view. The log barrier approach for AGRS inversion evaluated in this paper showed predicted data that are smoother than the observed data and, as a consequence, recovered models are much less influenced by the noise and are positive. Overall, the log barrier approach for AGRS inversion presented in this paper demonstrates predicted data that are robust against the noise in the observed data, which are remarkably noisy in the field example (Figs. 13 and 14).

The data misfit of the log barrier inversion for potassium, uranium, and thorium is smaller than in the standard approach for all the examples given in this paper (see Table 3). The inversion result without log barrier has similar values for ϕ_d compared with the log barrier inversion. The data misfit from log barrier inversion ensures that the inversion recovers a model which can fit the field observations according to their

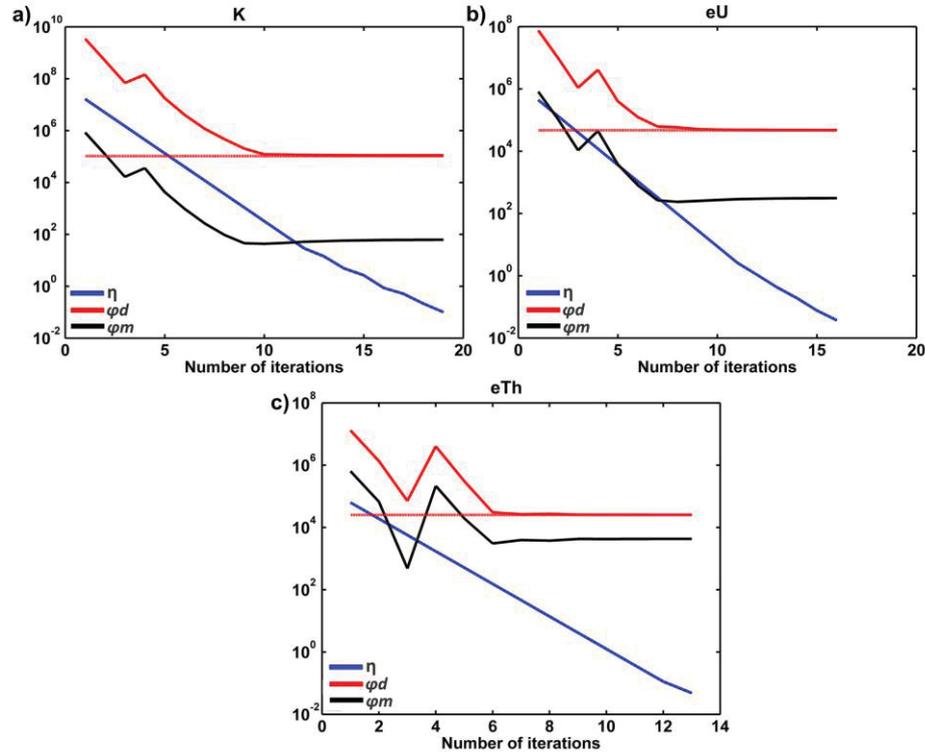


Fig. 15. Evolution of the curves ϕ_d , ϕ_m and η during the inversion. (a) K, (b) eU and (c) eTh. Dashed lines represent the ϕ_d without log barrier.

Table 3

Data misfit of the K, U, and Th in Maricá Calibration Range.

E (MeV)	ϕ_d		
	Standard Approach	Log Barrier	Without Log Barrier
K -Maricá	3.1769×10^4	1.4991×10^4	1.4979×10^4
K -Breckenridge	1.9371×10^4	1.4518×10^4	1.2452×10^4
K -Flight line 13026	1.3913×10^5	1.1093×10^5	1.0477×10^5
eU -Maricá	3.4995×10^3	2.4166×10^3	2.4499×10^3
eU -Breckenridge	3.4845×10^3	3.3114×10^3	3.2792×10^3
eU -Flight line 13026	5.1528×10^4	4.8005×10^4	4.7165×10^4
eTh -Maricá	1.4404×10^4	7.2527×10^3	7.2346×10^3
eTh -Breckenridge	5.6621×10^3	5.3777×10^3	5.3055×10^3
eTh -Flight line 13026	3.5043×10^4	2.5649×10^4	2.5509×10^4

noise levels.

The log barrier approach for AGRS inversion is an alternative to the standard procedure of AGRS processing, as it suppresses spurious negative values caused by the noise specially in standard least-squares inversion. We note that the negative values produced by the latter may be accompanied by spurious positive peaks, as seen in Fig. 14a. Thus, even when negative values are cut off or a threshold is added to mask them in the standard inversion results, artificially high concentrations may occur, and lead to misleading geological interpretations.

6. Conclusions

The AGRS data acquisition is complex, as it involves several

variables, including statistical noise caused by random radioactive decay, gamma-ray scattering, field of view of the detector, air and earth attenuation coefficients, and air humidity. Therefore, rigorous processing is required to estimate the concentration in the ground.

The standard corrections applied to the data are well established in the literature, even though some approximations can over-smooth the final data. In areas with a rugged terrain relief, it is unreasonable to maintain the same flight height, and assuming the final data were at a nominal constant flight height, could lead to significant errors. Furthermore, the data collected in an AGRS survey should be positive but can contain negative values from processing. The data should always be evaluated without cutting-off important data features.

We have developed an alternative method to suppress the noise and negative values from standard approach, and to increase the concentration resolution and avoid over-smoothing. We tested some of the most relevant parameters that affect the number of gamma-ray counts using calibration ranges, which are controlled environments. The photopeak efficiency has been estimated through the calibration pads and validated with the other parameters presented. The inversion methodology is an improvement upon the standard approach, as it deals with the overlapping problem and can preserve the high spatial frequency content of the data, optimally according to noise and maintain the observed data pattern. The correction factor applied in the sensitivity matrix is also an advancement as tends to correct the statistical character of the variables used in the gamma-ray detection. The inversion results with and without log barrier provided suitable results and are very similar, except where the regularization parameter was not enough to prevent higher oscillations in the inverted models; in these cases, the inversion without log barrier produced spurious negative concentrations. In general, we

expect that the log barrier approach will be more robust and less dependent on a manual selection of the regularization parameter. The inverted data oscillates and shows limited regularization, using the log barrier with the inversion provides a better result, especially when the regularization is automatic.

The inversion procedure developed in this work could be extended to AGRS survey data, and suppress the effect of flight height variations, especially in mountainous regions. The field of view overlap should also be suppressed, reflecting in smoother results. The application in two case studies demonstrates that our method is robust and could be useful for geological mapping, mineral resources, and groundwater purposes. Mostly we have achieved satisfactory results, with consistency between inverted and standard approach data.

Computer code availability

The present code has been developed to illustrate the methodology described herein. The algorithm was implemented in MATLAB R2014a, and has been successfully run in Octave 4.2.2 as well. No toolboxes were required in the implementation.

- Name of code: AGRS_Inv_LogBarrier
- Developers: Saulo Pomponet Oliveira, Jessica Derkacz Weihermann (LPGA-UFPR, Curitiba-PR, Brazil, Postal Code 81531-980, Phone number: +55 (41) 3361-3121. E-mail: saulopo@ufpr.br, jessica.dweih@gmail.com).
- Year first available: 2020.
- Hardware required: At least 1 GB RAM, and the processor should be an Intel or AMD x86 processor that supports Streaming SIMD Extensions 2.
- Software required: MATLAB 2014a, Octave 4.2.2 or later versions.
- Program language: MATLAB.
- Program size: 8.362 bytes.
- License: MIT
- Details on how to access the source code: The source files can be downloaded from the LPGA website at <http://www.lpga.ufpr.br/porta/agrs/>

Authorship statement

Jessica Derkacz Weihermann - Development of ideas, computer implementation, planning of numerical experiments, analysis and interpretation of data, and manuscript writing.

Saulo Pomponet Oliveira - Development of ideas, computer implementation, planning of numerical experiments, analysis and interpretation of data, and manuscript co-writing.

Yaoguo Li - Development of ideas, computer implementation, analysis and interpretation of data and manuscript co-writing.

Francisco José Fonseca Ferreira - Contributed to the analysis and interpretation of data, and critically reviewed the manuscript.

Adalene Moreira Silva - Contributed to the data analysis and critically reviewed the manuscript.

Richard Fortin - Contributed to the data analysis and critically reviewed the manuscript.

Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgments

The authors thank Geological Survey of Brazil (CPRM), CGG Veritas and Natural Resources Canada for providing the data. The authors thank Alan de Souza Cunha for the effort to obtain the Maricá strip data. J.

Weihermann was financed by a fellowship from Coordinating Agency for Advanced Training of Graduate Personnel (CAPES) – Ministry of Education, Brazil. S. Oliveira, F. Ferreira, and A. Silva were financed by (CNPq) - Ministry of Science, Technology, Innovations, and Communications, Brazil (contracts 313100/2017-9, 303826/2018-5 and 307177/2014-9, respectively).

References

- Ahmadi, S., Ashrafi, S., Yazdansetad, F., 2018. A method to calculate the gamma ray detection efficiency of a cylindrical NaI (TI) crystal. *J. Instrum.* 13, P05019. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/13/05/P05019>, 05.
- Baptista, E.C., Belati, E.A., da Costa, G.R., 2005. Logarithmic barrier-augmented Lagrangian function to the optimal power flow problem. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 27 (7), 528–532. <https://doi.org/10.1016/j.jepes.2005.06.004>.
- Billings, S., Hovgaard, J., 1999. Modeling detector response in airborne gamma-ray spectrometry. *Geophysics* 64, 1378–1392. <https://doi.org/10.1190/1.1444643>.
- Billings, S.D., Minty, B.R.S., Newsam, G.N., 2003. Deconvolution and spatial resolution of airborne gamma-ray surveys. *Geophysics* 68, 1257–1266. <https://doi.org/10.1190/1.1598118>.
- Commer, M., Newman, G.A., 2008. New advances in three-dimensional controlled-source electromagnetic inversion. *Geophys. J. Int.* 172 (2), 513–535. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2007.03663.x>.
- CPRM, 2011. Programa Geologia Do Brasil (PGB) - Aerogeophysical Project Paraná-Santa Catarina: Survey and Processing of Magnetometric and Gamma-Ray Spectrometric, vol. 1. Lasa Prospecções [in Portuguese].
- Craven, P., Wahba, G., 1979. Smoothing noisy data with spline functions: estimating the correct degree of smoothing by the method of generalized cross-validation. *Numer. Math.* 31, 377–403. <https://doi.org/10.1007/BF01404567>.
- Crossley, D.J., Reid, A.B., 1982. Inversion of gamma-ray data for element abundances. *Geophysics* 47 (1), 117–126. <https://doi.org/10.1190/1.1441273>.
- Dentith, M., Mudge, S.T., 2014. *Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist*. Cambridge University Press, New York, p. 516pp. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139024358>.
- Druker, E., 2017. Airborne gamma-ray spectrometry data processing using 1.5 D inversion. *J. Environ. Radioact.* 177, 13–23. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.05.006>.
- Elkhadragey, A.A., Ismail, A.A., Eltarras, M.M., Azzazy, A.A., 2017. Utilization of airborne gamma ray spectrometric data for radioactive mineral exploration of G. Abu Had-G. Umm Qaraf area, South Eastern Desert, Egypt. *NRIAG J. Astr. Geophys.* 6 (1), 148–161. <https://doi.org/10.1016/j.nrjag.2016.12.001>.
- Gunn, P.J., 1978. Inversion of airborne radiometric data. *Geophysics* 43, 133–143. <https://doi.org/10.1190/1.1440816>.
- Gnojek, I., Prichystal, A., 1985. A new zinc mineralization detected by airborne gamma-ray spectrometry in northern Moravia (Czechoslovakia). *Geoexploration* 23 (4), 491–502. [https://doi.org/10.1016/0016-7142\(85\)90076-6](https://doi.org/10.1016/0016-7142(85)90076-6).
- Gnojek, I., Sedlak, J., Rappich, V., Skacelova, Z., Mlcoch, B., Krentz, O., Casar-Garcia, R., 2018. Structure of the Carboniferous Alteneberg-Teplice Caldera (Eastern part of the Krusne hory/Erzgebirge Mts.) revealed by combined airborne and ground gamma-ray spectrometry. *J. Geosci.* 63 (1), 3–20. <https://doi.org/10.3190/jgeosci.251>.
- Grant, J.A., 1998. Ten Things the Textbooks Don't Tell You about Processing and Archiving Airborne Gamma-Ray Spectrometric Data. *Current Research Current Research 1998-D*. Geological Survey of Canada, pp. 83–87. <https://doi.org/10.4095/209538>.
- Grasty, R.L., 1979. Gamma-ray spectrometric methods in uranium exploration — theory and operational procedures. In: Hood, P.J. (Ed.), *In Geophysics and Geochemistry in the Search for Metallic Ores*. Geological Survey of Canada, Economic Geology Report 31, pp. 147–161. <https://doi.org/10.4095/106048>.
- Grasty, R.L., Kosanke, K.L., Foote, R.S., 1979. Fields of view of airborne gamma-ray detectors. *Geophysics* 44 (8), 1447–1457. <https://doi.org/10.1190/1.1441017>.
- Grasty, R.L., Holman, P.B., Blanchard, Y.B., 1991. Transportable calibration pads for ground and airborne gamma-ray spectrometers. *Geological Survey of Canada* 90 (23).
- Harris, J.R., Grunsky, E.C., 2015. Predictive lithological mapping of Canada's North using Random Forest classification applied to geophysical and geochemical data. *Comput. Geosci.* 80, 9–25. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2015.03.013>.
- IAEA, 1991. *Airborne Gamma Ray Spectrometer Surveying*, Technical Reports Series No. 323. International Atomic Energy Agency, Vienna, p. 116.
- IAEA, 2003. *Guidelines for Radioelement Mapping Using Gamma Ray Spectrometry Data*, Technical Report Serie, N° 1363. International Atomic Energy Agency, Vienna, p. 179.
- Killeen, P.G., Mwenifumbo, C.J., Ford, K.L., 2015. Tools and techniques: radiometric methods. In: Schubert, G. (Ed.), *Treatise on Geophysics*, second ed. Elsevier, Oxford, pp. 447–524. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53802-4.00209-8>.
- Kogan, R.M., Nazarov, L.M., Fridman, S.H.D., 1971. *Gamma Spectrometry of Natural Environments and Formations*. Translated 1971 by Israel Program for scientific Translations Ltd., Springfield, VA, p. 337, 22151.
- Leite, E.P., de Souza Filho, C.R., 2009. Probabilistic neural networks applied to mineral potential mapping for platinum group elements in the Serra Leste region, Carajás Mineral Province, Brazil. *Comput. Geosci.* 35 (3), 675–687. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2008.05.003>.

- Li, Y., Oldenburg, D.W., 2000. 3-D inversion of induced polarization data. *Geophysics* 65 (6), 1931–1945. <https://doi.org/10.1190/1.1444877>.
- Løvborg, L., Kirkegaard, P., 1975. Numerical evaluation of the natural gamma radiation field at aerial survey heights (Vol. 317). *Risø report R 317*, 52pp.
- Minty, B.R.S., 1997. Fundamentals of airborne gamma-ray spectrometry. *AGSO J. Aust. Geol. Geophys.* 17 (2), 39–50.
- Minty, B.R.S., Brodie, R., 2015. The 3D inversion of airborne gamma-ray spectrometric data. *Explor. Geophys.* 47, 150–157. <https://doi.org/10.1071/EG14110>.
- McCay, A.T., Harley, T.L., Younger, P.L., Sanderson, D.C., Cresswell, A.J., 2014. Gamma-ray spectrometry in geothermal exploration: state of the art techniques. *Energies* 7 (8), 4757–4780. <https://doi.org/10.3390/en7084757>.
- Noedal, J., Wright, S., 2006. *Numerical Optimization*, second ed. Springer, New York, p. 664pp. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-40065-5>.
- Oldenburg, D.W., Li, Y., 2005. Inversion for applied geophysics: a tutorial. *Investigations in geophysics* 13, 89–150. <https://doi.org/10.1190/1.9781560801719.ch5>, 2005.
- Renner, R.M., 1993. A constrained least-squares subroutine for adjusting negative estimated element concentrations to zero. *Comput. Geosci.* 19 (9), 1351–1360. [https://doi.org/10.1016/0098-3004\(93\)90034-3](https://doi.org/10.1016/0098-3004(93)90034-3).
- Schwarz, G.F., Klingele, E.E., Rybach, L., 1992. How to handle rugged topography in airborne gamma-ray spectrometry surveys. *First Break* 10, 11–17.
- Tammenmaa, J.K., Grasty, R.L., Peltaniemi, M., 1976. The reduction of statistical noise in airborne radiometric data. *Can. J. Earth Sci.* 13, 1351–1357. <https://doi.org/10.1139/e76-140>.
- Tewari, S.G., Raghuvanshi, S.S., 1987. Some problems on the range of investigation of airborne gamma-ray spectrometry. *Uranium* 4, 67–82.
- UNSCEAR, 2000. *Sources and Effects of Ionizing Radiation*. United Nations, New York, pp. 453–487.
- Wang, J., Meng, X., Li, F., 2015. A computationally efficient scheme for the inversion of large-scale potential field data: application to synthetic and real data. *Comput. Geosci.* 85, 102–111. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2015.09.005>.
- Weiermann, J.D., Ferreira, F.J.F., Cury, L.F., da Silveira, C.T., 2016. Gamma-ray spectrometry of granitic suites of the Paranaguá Terrane, southern Brazil. *J. Appl. Geophys.* 132, 38–52. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.06.017>.
- Wilford, J.R., Bierwirth, P.E., Craig, M.A., 1997. Application of airborne gamma-ray spectrometry in soil/regolith mapping and applied geomorphology. *AGSO J. Aust. Geol. Geophys.* 17 (2), 201–216.
- Wilford, J., 2002. Airborne gamma-ray spectrometry. In: Papp (Ed.), *Geophysical and Remote Sensing Methods for Regolith Exploration*. CRCLME Open File Report 144, pp. 46–52.

4.3 ARTIGO II - RETRIEVING GEOLOGICAL UNITS WITH UNSUPERVISED CLUSTERING OF GAMMA-RAY SPECTROMETRY DATA

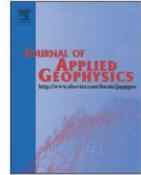
Journal of Applied Geophysics 184 (2021) 104225



Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Applied Geophysics

journal homepage: www.elsevier.com/locate/jappgeo



Retrieving geological units with unsupervised clustering of gamma-ray spectrometry data

Jessica Derkacz Weihermann^{a,*}, Matheus Pinheiro Ferreira^b, Luís Gustavo de Castro^a, Francisco José Fonseca Ferreira^a, Adalene Moreira Silva^c

^a Federal University of Paraná, Department of Geology, Laboratory for Research in Applied Geophysics, Cel. Francisco H. dos Santos Avenue, 100, Polytechnic Center, P.O. Box 19045, 81531-980 Curitiba, Paraná, Brazil

^b Cartographic Engineering Section, Military Institute of Engineering - IME, Praça Gen. Tibúrcio 80, 22290-270 Rio de Janeiro, RJ, Brazil

^c Laboratory of Applied Geophysics, Institute of Geosciences, University of Brasília, P.O. Box 04465, 70919-970 Brasília-DF, Brazil

ARTICLE INFO

Article history:

Received 29 April 2020

Received in revised form 30 September 2020

Accepted 20 November 2020

Available online 03 December 2020

Keywords:

Unsupervised clustering
Gamma-ray spectrometry
Geological mapping

ABSTRACT

Airborne gamma-ray spectrometry (AGRS) provides valuable insights for geological mapping, mineral exploration, geomorphological studies, and lithological differentiation. The interpretation of AGRS data is usually performed by skilled interpreters, requires visual acuity and is time-consuming. In this study, we used unsupervised clustering and object-based classification on the primary variables potassium (K), uranium (eU), and thorium (eTh) to automatically retrieve geological units in Mara Rosa Magmatic Arc – Goiás, Brazil, a well-studied area known by a gold district. We first cluster a color image composition (Red = K; Green = eTh; Blue = eU) using gaussian mixture models. We estimate the ideal number of classes to partition the image with the bayesian information criterion. Then, we performed a class separability analysis to identify and merge classes with low statistical separability. Finally, we used an object-based approach to reduce inconsistencies in the unsupervised classification map. To assess our approach, we compute the structural similarity index between the classification map and a reference geological map of the study area. The results show that our approach retrieved geologically meaningful regions in the AGRS data, reaching 0.94 of overall structural similarity with the geological map. Combining unsupervised clustering and AGRS data allows a better interpretation of the geological units into the same Complex or Groups.

© 2020 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

Gamma-ray spectrometry is widely used in geosciences, geochemical, environmental studies, mineral exploration and remote sensing (e.g., Galbraith and Saunders (1983); Harris (1989); Graham and Bonham-Carter (1993); Wilford et al. (1997); Maden and Akaryali (2015); dos Santos Albuquerque et al. (2020)). Airborne gamma-ray spectrometry estimates the concentration of potassium (K), uranium (eU), and thorium (eTh) in the surface (rocks, soils, and weathered materials), by up to 30–45-cm deep (Dickson and Scott, 1997; Minty, 1997; Wilford, 2002; IAEA, 2003). The natural radiation is determined by the disintegration of potassium 40 (⁴⁰K), uranium 238 (²³⁸U) and thorium 232 (²³²Th) series.

Potassium is measured directly by the isotopic decay peak of ⁴⁰K, and it has an average abundance of 2–2.5% in the Earth's crust. Uranium and thorium are measured by their daughter elements ²¹⁴Bi and ²⁰⁸Tl, respectively, and their abundance in the earth's crust ranges from 2 to

3 ppm and 8–12 ppm (Wilford et al., 1997; IAEA, 2003). Because uranium and thorium do not emit direct gamma radiation and are measured by their daughter elements, they are denominated equivalent in uranium (eU) and equivalent in thorium (eTh) (IAEA, 1991). Potassium is mainly correlated with igneous rocks (acid-felsic rocks) or metamorphic rocks with an igneous protolith, as it can be found in K-feldspars and micas. Uranium and thorium are found in accessory minerals related to various igneous and metamorphic quartz–feldspar rocks (Ulbrich et al., 2009).

The standard AGRS processing consists of basic K, eTh, eU maps, and ternary (K–eTh–eU) images to evaluate lithological information. One can additionally obtain secondary maps with arithmetic operations between the radioelements to enhance features of interest (e.g., mineral prospecting and environmental characteristics). Usually, the geophysical-geological interpretation is based on visual pattern recognition and mostly depends on expert knowledge. A quantitative analysis combined with the interpreter's expertise is a good alternative for interpreting geological-geophysical data. Particularly the combination of unsupervised clustering with AGRS has the potential to improve geological mapping.

* Corresponding author.

E-mail address: jessica.dweih@gmail.com (J.D. Weihermann).

The clustering analysis automatically finds different groups within the radioelements and classifies them into a number of tractable units. The AGRS data channels combinations can be classified using an unsupervised classification algorithm to produce a thematic map of radioelement domains that shows statistical separation (Killeen et al., 2015). The clustering of AGRS data provides a useful technique for geological mapping, depending primarily on the geological environment (e.g., the contrast between lithologies) and the quality of original data (Harris, 1989; Ranjbar et al., 2001; IAEA, 2003; Cainzos et al., 2002; Martelet et al., 2006; Teixeira et al., 2006; Eberle and Paasche, 2012).

Traditional unsupervised clustering methods, such as the *k*-means (MacQueen et al., 1967), usually requires the definition of the number of classes by the analyst, which is challenging and requires expert knowledge and field data. Therefore, the investigation of new methods to automatically find the number of classes is worth it. In this work, we address the automatic delineation of geological units, which reveals patterns that can be related to lithological variations and can assist in the construction of geological maps and visual interpretation.

This paper shows an approach to automatically delineate geological units based on gamma-ray spectrometry data of the Mara Rosa Magmatic Arc (MRMA), a central part of Brazil. More specifically, our approach is based on unsupervised clustering, and object-based classification of ternary (K-eTh-eU) images.

1.1. Study area

The study area is located within the MRMA area, Goiás State, central Brazil (Fig. 1), and it is covered by a high-resolution aerogeophysical survey with a 500 m of flight line spacing with an N-S direction and a mean terrain clearance of 100 m (CPRM, 2004). The MRMA belongs to the geological context of the Tocantins Province (Fig. 2), a Neoproterozoic orogenic region in the central part of Brazil (Arantes et al., 1991; Oliveira et al., 2004; Silva et al., 2007; Pimentel, 2016).

The Goiás Magmatic Arc extends for more than 1000 km in the western and northern portions of the Goiás state, into Tocantins state, disappearing under the Parnaíba Basin. Two main areas have been

identified in detail, the Arenópolis and the Mara Rosa Arcs, respectively, in the southern and northern sections of the State of Goiás (Pimentel et al., 1997; Pimentel, 2016).

The MRMA comprises lengthened volcano-sedimentary bands with NNE direction, individualized by orthogneisses with predominantly tonalitic composition (Fig. 3) (Arantes et al., 1991; Pimentel et al., 1997; Pimentel, 2016). The supracrustal sequences include metabasalts, intermediate to felsic metatuffs, metaultramafic, fine to medium-grained greywacke, metacherts, iron formations, and a wide variety of metasediments. The metamorphism condition indicates greenschist to amphibolites facies (Della Giustina, 2007; Oliveira, 2009). The MRMA contains important Au (Posse, Zacarias, Mundinho) and Cu-Au (Chapada) deposits (Fig. 3) (Palermo et al., 2000; Oliveira et al., 2000; Silva et al., 2007; Oliveira et al., 2016).

The geological map of the study area was obtained through bibliographical information, fieldwork, interpretation of satellite images, rock sampling, petrographical and geochronological analysis, and interpretation of airborne gamma-ray spectrometry and magnetometry images prepared by the agreement CPRM / Goiás Environmental Agency. (Moreira et al., 2008). Information was also obtained in theses and dissertations that emphasized aspects of petrology / geochronology and metallogeny of the Mara Rosa magmatic arc, as well as important data contained in internal mining company reports (Alvarenga et al., 2007).

2. Materials

2.1. Airborne gamma-ray spectrometry data

Airborne gamma-ray data provide information about the nature of the geological materials at the earth's surface through the mapping of the naturally occurring radioelements ^{40}K , ^{238}U and ^{232}Th . AGRS surveys are usually flown in a direction perpendicular to the main geologic strike of the survey area. The acquired data were corrected and processed following the International Atomic Energy Agency (IAEA) standards (IAEA, 1991, 2003).

The gamma-ray spectrometer system used was the Exploranium GR-820 of 256 spectral channels, where the spectrum of each NaI detector crystals is analyzed individually for the precise determination of the

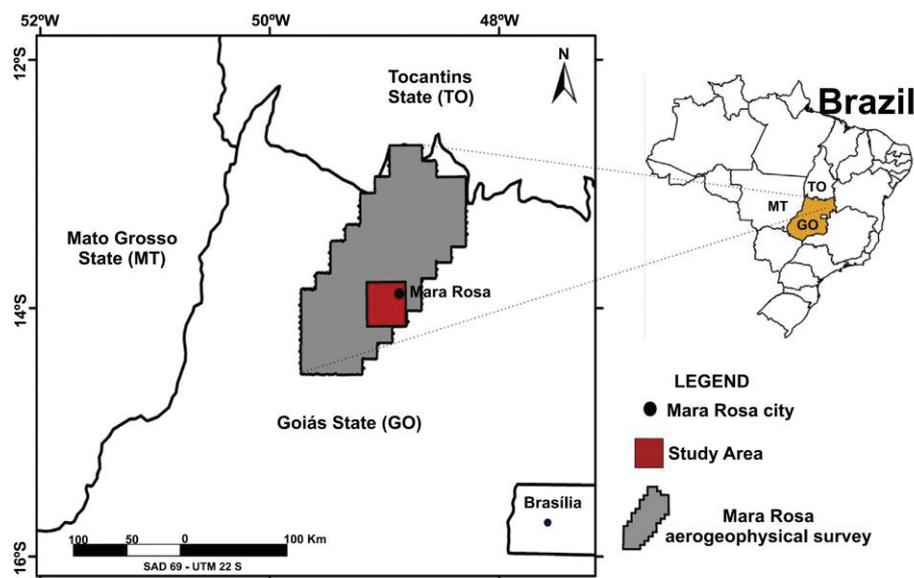


Fig. 1. Location of the study area in red, indicating the aerogeophysical survey in grey. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

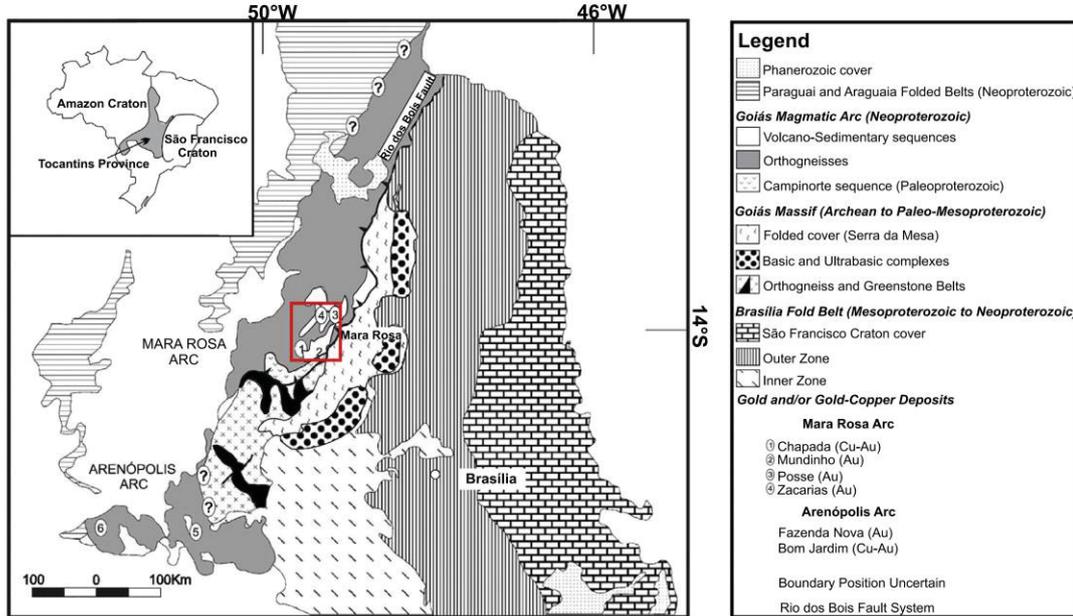


Fig. 2. Geological map of the northern sector of the Tocantins Province in Central Brazil indicating the location of the study area in red. Adapted from Oliveira et al. (2004). (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

photopeaks of potassium, uranium, and thorium (CPRM, 2004). A reading per second was performed, with a GPS satellite observation system, with a precision > 10 m.

The data from the MRMA aerogeophysical survey (CPRM, 2004) (red square in Fig. 1) were gridded using the minimum curvature with 1/4 of the flight lines spacing, which resulted in the potassium (K), uranium (eU), and thorium (eTh) maps (Fig. 4a,b, and c). An RGB-ternary

image (Red = K; Green = eTh; Blue = eU) was obtained from these maps (Fig. 4d).

Ternary maps enable the interpretation of the three radionuclides in the same image. In the RGB-ternary image, each color reflects the influence of each channel independently. A combination of colors indicates a combination of relative elements. White and black colors indicate respectively high and low values in all three radionuclides.

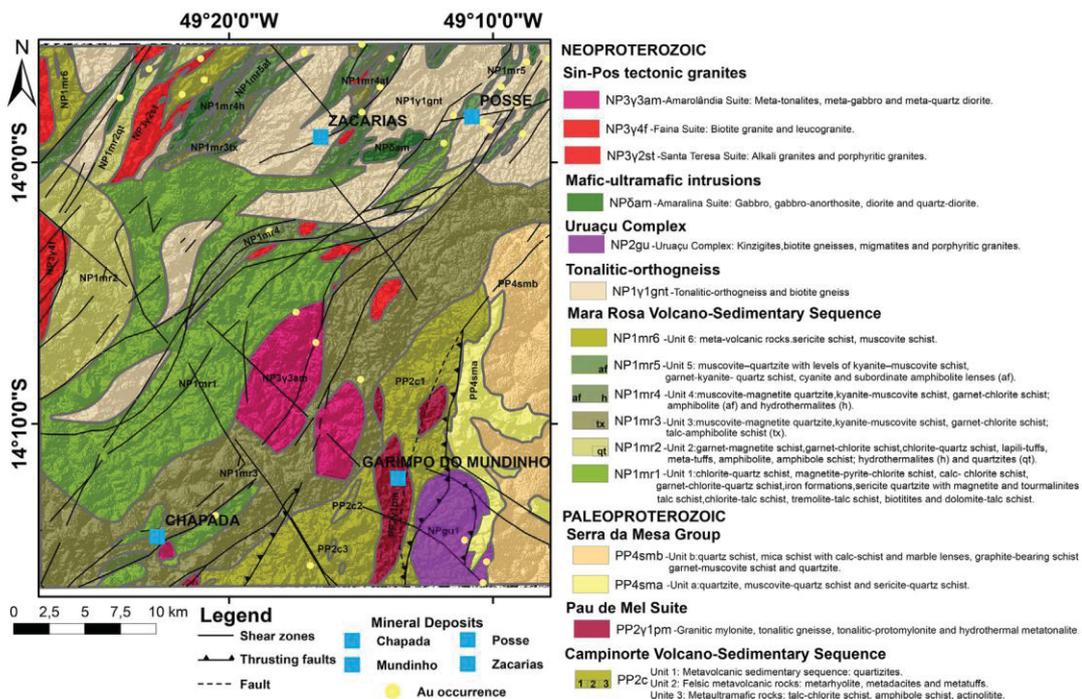


Fig. 3. Geological map of the study area. See location in Fig. 1. Adapted from Alvarenga et al. (2007); Moreira et al. (2008).

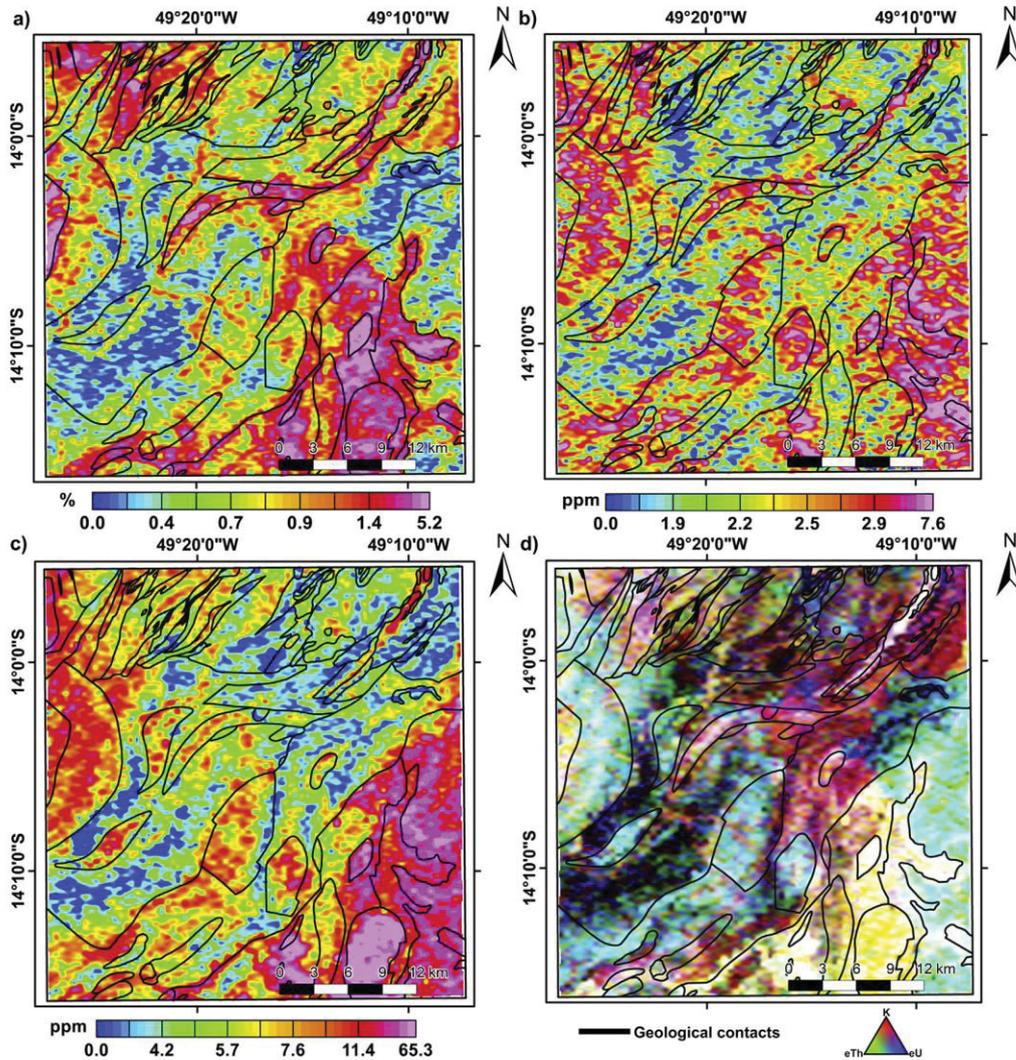


Fig. 4. Airborne gamma-ray spectrometry basic maps. (a) Potassium - K, (b) Uranium - eU, (c) Thorium - eTh and (d) Ternary - (Red = K; Green = eTh; Blue = eU). The geological contacts are shown with black lines. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

3. Methods

In this section, we describe the methodological steps used to retrieve geological units from the AGRS data automatically. First, we perform unsupervised clustering of the primary variables (potassium, uranium, and thorium). Next, we analyze the separability of the clusters to identify clusters that are statistically similar to each other. Finally, we applied an object-based classification approach to improving the delineation of geological units over the study area. To assess the correspondence between the unsupervised classification map and the geological map of the study area, we computed the structural similarity index. Fig. 5 summarizes the main steps of the methodology.

3.1. Unsupervised clustering

Cluster analysis is a multivariate method that classifies objects based on the similarity of a set of variables measured in several different groups. Unsupervised clustering is used if information regarding the

classes present in a given data set is not available. The k -means algorithm is one of the first unsupervised clustering methods (Jain, 2010) and has been applied to classify AGRS data (e.g., de Lima and Marfurt (2018)). The k -means is an iterative algorithm that aims to minimize the distance between the mean of a cluster and the samples in the cluster. It requires the user to specify three parameters: the number of k clusters, cluster initialization, and a distance metric. The most critical parameter is the number of k clusters to partitioning the data, which is usually chosen arbitrarily by the user and can lead to erroneous results.

One way to automatically determine the number of clusters is to run clustering algorithms with different values of k and choose the best value based on a predefined criterion. Gaussian Mixture Models (GMMs), in conjunction with the Bayesian Information Criterion (BIC), is a powerful approach to estimate k and was poorly explored to cluster AGRS data.

The GMM algorithm aims to estimate the mean vector and the covariance matrix of the Gaussian distributions associated with each cluster, as well as the respective mixture components. Thus, each cluster is

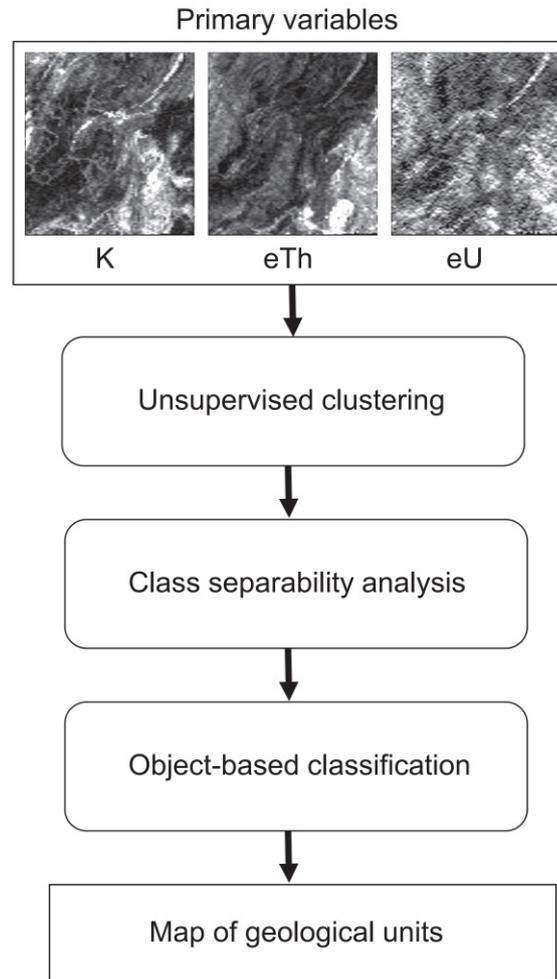


Fig. 5. The methodological steps of the proposed approach to automatically map geological units using gamma-ray spectrometry data. Rectangular boxes refer to inputs or outputs of data processing, while ellipsoidal boxes represent data processing.

modeled not only by its mean vector, which is the case of k -means but also by the covariance matrix, giving the model more flexibility to fit the data. To use the GMMs, one needs to estimate the proportion of each class and the respective mean vectors and covariance matrices. To do this, the expectation-maximization (EM) algorithm (Friedman et al., 2001) is usually employed. The EM allows automatic estimates of the Gaussian components iteratively. In a quantitative approach to estimate the number of classes using GMMs, the Bayesian information criterion (BIC) (Schwarz et al., 1978) is commonly used. The number of classes that provide the lowest BIC is considered the optimal value to separate the data.

We used the `fitgmdist` MATLAB® function to cluster the AGRS data with GMMs. We choose a full-unshared covariance matrix structure; a regularization value equals $1e-5$ and 10,000 iterations of the EM algorithm. Preliminary tests showed that these set parameters provided the most reliable results. We run the GMM algorithm with 1 to 15 classes, saving the respective BIC at each realization. We selected the number of classes that provided the lowest BIC to clustering the primary variables (K, eU, and eTh).

3.2. Class separability

A common procedure in unsupervised clustering is to perform an analysis of the statistical separability of classes. This procedure aims to merge classes with low separability, thus improving the chance that the classes in the image represent same physical world object (geological unit in our case). Aiming to verify the separability of the classes we compute the Jeffries-Matusita (JM) distance according to Richards and Jia (1999):

$$JM_{ij} = 2(1 - e^{-B}) \quad (1)$$

in which B is the Bhattacharyya distance (Kailath, 1967):

$$B = \frac{1}{8} (m_i - m_j)^T \left\{ \frac{\Sigma_i + \Sigma_j}{2} \right\}^{-1} (m_i - m_j) + \frac{1}{2} \ln \left\{ \frac{(|\Sigma_i + \Sigma_j|/2)}{(|\Sigma_i|^{1/2} |\Sigma_j|^{1/2})} \right\} \quad (2)$$

where m_i and m_j are the mean value of the primary variables (K, eU and eTh) of classes i and j , Σ_i and Σ_j correspond to their covariance matrices, while $|\Sigma_i|$ and $|\Sigma_j|$ are the determinants of Σ_i and Σ_j , respectively. T is

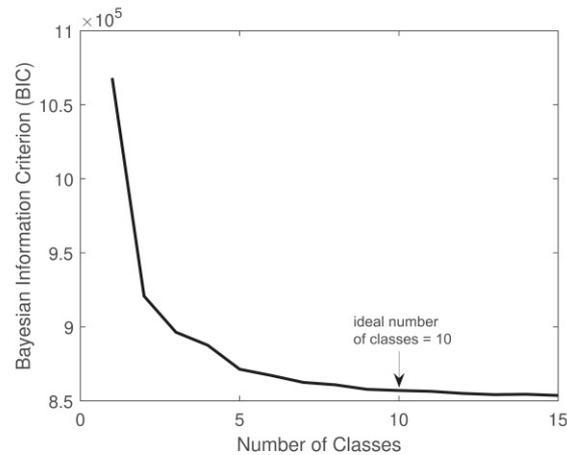


Fig. 6. Bayesian information criterion (BIC) computed for 1 to 15 classes obtained using Gaussian Mixture Models (GMMs) to cluster the ternary image (K, eU and eTh; Fig. 7).

the transposition function. The JM distance varies from 0 to 2 and was calculated for all pairwise combinations between classes. The classes showing low separability (< 0.5) were merged to compose a single class. Prior to computing the JM distance, normality and homoscedasticity (homogeneity of variances) of the primary variables values were verified.

3.3. Object-based classification

Pixel-by-pixel image classification is usually affected by the so-called *salt and pepper* effect, which is characterized by inconsistent pixel labeling. The *salt and pepper effect* is a common drawback of pixel-based methods and is caused by either classification errors or noise present in the image data. One way to overcome this effect is by adopting object-based image analysis (OBIA) techniques (Blaschke, 2010). OBIA is based on image segmentation, which consists in splitting the input image into regions formed by spatially connected pixels sharing similar characteristics (spectral or textural). Compared to single pixels, segmented areas provide additional information regarding the spatial context of objects or classes. The combination of image segmentation and classification is often called object-based classification and has been successfully

used to improve the classification accuracy of remote sensing images (e.g., Zanotta et al. (2018)). However, the use of the object-based classification of AGRS data for geological mapping is poorly explored.

Here, we used the simple linear iterative clustering (SLIC) (Achanta et al., 2012) algorithm to segment the ternary image (Fig. 4d). The SLIC method groups pixels into the so-called superpixels, that is, atomic regions that are similar in color and texture, for example. The overall goal of superpixels is to reduce image complexity while avoiding a few image divisions (under-segmentation). SLIC employs k -means for superpixel generation, and the only parameter that should be set by the user is the desired number of approximately equal regions (superpixels). More details about SLIC can be found in (Achanta et al., 2012). In this study, based on preliminary tests, we choose to segment the ternary image in 2500 superpixels. We used the SLIC implementation available in MATLAB® through the function *superpixels*.

Our object-based classification approach to automatically delineate geological units consists of applying a majority-voting rule inside each superpixel, based on the classification map produced in Section 3.1 after class merging (Section 3.2). In this rationale, a given superpixel is assigned the most frequent class of the pixels within it. With the

Table 1

Class separability computed by the Jeffries-Matusita (JM) distance (Eq. (1)). Pairwise combination of classes with low separability (< 0.5) are highlighted in grey.

	Class 1	Class 2	Class 3	Class 4	Class 5	Class 6	Class 7	Class 8	Class 9	Class 10
Class 1	-									
Class 2	1.30	-								
Class 3	0.72	1.77	-							
Class 4	1.70	1.81	1.19	-						
Class 5	1.62	1.95	1.31	1.91	-					
Class 6	0.71	0.48	1.50	1.69	1.88	-				
Class 7	1.40	1.94	1.03	1.98	1.49	1.85	-			
Class 8	1.12	1.34	1.31	1.07	1.93	0.95	1.92	-		
Class 9	1.67	1.02	1.87	1.64	1.99	1.24	1.98	1.14	-	
Class 10	1.43	1.91	0.46	1.55	1.20	1.82	1.10	1.71	1.94	-

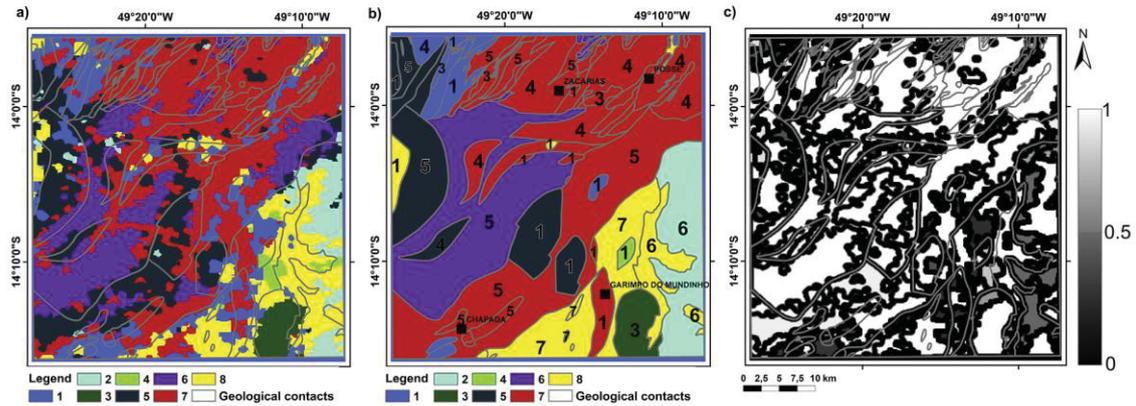


Fig. 9. (a) Object-based classification of the gamma-ray spectrometry data with 8 classes. (b) Most frequent classes within geological contacts. The numbers in the figure represents the geological units: 1 - Granites; 2 - Mafic-ultramafic intrusions; 3 - Uruaçu Complex; 4 - Tonalitic-orthogneiss; 5 - Mara Rosa Volcano-Sedimentary Sequence; 6 - Serra da Mesa Group; 7 - Campinorte Volcano-Sedimentary Sequence. (c) Structural Similarity Index showing intersecting areas between classes and geological contacts. Geological contacts and geological units in black and grey lines, respectively.

2 with class 6 and class 3 with class 10, producing a map with eight classes (Table 1), which was consistent with geology of the study area.

Fig. 7 shows the results of the SLIC algorithm. One can note in Fig. 7b that homogeneous regions in terms of color and texture are grouped into *superpixels* that coincide with the geological contacts.

The visual comparison with geology showed good correspondence with the classification map, as shown in Fig. 8. The object-based classification (Fig. 8a) suppressed the *salt and pepper* effect and improved the image, facilitating the interpretation and delineation of geological units.

The Fig. 9 shows the results of the structural similarity between a simplified version of the geological map and the classification map. Areas of high ($SSI > 0.9$) and low ($SSI < 0.3$) similarity are shown in white and black in Fig. 9c, respectively. The overall structural similarity index was of 0.94. The granites are represented by the number 1 (Fig. 9b) and were well-delineated ($SSI \approx 1$). They are mainly correlated with classes 1, 5, 7 and 8, differentiating the compositional variations of the granitic suites: (i) Amarolândia Suite (classes 5 and 7), (ii) Faina Suite (classes 7 and 8) and (iii) Santa Tereza Suite (classes 7 and 5), (iv) Pau de Mel Suite (classes 7, 8 and 4). It is possible to note that

even in the same geological units, there are correlation with different classes, possibly due to lithological, compositional variations.

The mafic-ultramafic intrusions (number 2 of Fig. 9b) are related to class 7. The Uruaçu Complex (number 3 of Fig. 9b) is well-delineated by class 3 ($SSI \approx 1$, Fig. 9c). The tonalitic-orthogneisses (number 4 of Fig. 9b) are correlated mainly with classes 1, 5, 7. The clustering analysis reflects the differentiation among the distinct units of the Mara Rosa Sequence (number 5 of Fig. 9b). NP1mr1 is represented by class 6, NP1mr2 by class 5, NP1mr3 by class 7, NP1mr4 by class 7, NP1mr5 by class 7, and NP1mr6 by classes 5 and 7 (see Fig. 3 for geological units).

The Serra da Mesa Group (number 6 in Fig. 9b), has a peculiar signature that differs it from all geological units in the study area. The unit PP4sma is related with class 8 highlighting the quartzite unit, and the PP4smb with class 2 related to the quartz-schist of the meta-psamopelitic unit. The Campinorte Sequence (number 7 in Fig. 9b) consists of quartzites and a wide variety of mica schists. Within this unit, three smaller units (meta-rhyodacite, meta-rhyolite, and schists) are observed, and are mainly related to class 8. Only classes 2, 3 and 4 (Fig. 9b) are related to a single geological unit, the other classes are associated with more than one unit. Class 5 (Fig. 9a) correlates with

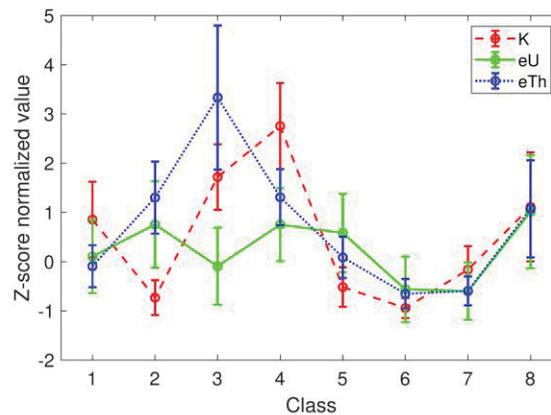


Fig. 10. Statistics (means and standard deviation) of the unsupervised classification of the gamma-ray spectrometry data with 8 classes. The values of the primary variables (K-eTh-eU) were normalize for clarity.

numbers 1,4 and 5 (Fig. 9b) probably due to the main mineral composition of these rocks being associated with the silicates group (Deer et al., 2013). Such variation of geological units could be related to the mineralogical composition similarity among different rock types.

In Fig. 9c it is possible to note the similarity of the classification map with the geological contacts. The clustering AGRS classes showed a spatial correlation with mapped geology and identified other clusters that reflected compositional variations in the same geological units. The different lithological assemblages can be seen on these unsupervised maps.

In Fig. 10 we show the main statistics (mean and standard deviation) of the eight classes in the primary variables. One can note that the clustering procedure has defined statistically different radiometric populations, except for class 8 (which are characterized by very similar K, eU and eTh). Class 3 has the highest concentration of eTh, class 4 has the highest K and class 5, the highest eU (Fig. 10).

5. Conclusions

In this study, we combined unsupervised clustering and airborne gamma-ray spectrometry to automatically retrieve geological units from an area located in the Mara Rosa Magmatic Arc, in central Brazil. We developed an approach that was based on ternary (K-eTh-eU) images. We show that unsupervised clustering and AGRS data allows a better quantitative analysis of the geological contacts of the study area. Object-based classification facilitates the interpretation of geological units as it groups relevant regions in the AGRS data. The comparison of the unsupervised classes and the geology showed an overall structural similarity index of 0.94 differentiating even mineralogical variation among the same geological Complex or Groups. The unsupervised clustering technique was useful for classifying the AGRS data, resulting in a satisfactory correlation with the geology. The study area was suitable for the clustering application, as it has a radiometric contrast between lithologies (particularly the granites, orthogneisses, and metasediments). This approach can be useful to areas with limited access and, combined with other geophysical methods, can provide information in areas without geological knowledge.

Authorship statement

All authors give their final approval of the manuscript version to be submitted and any revised version of it.

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

The authors have no conflicts of interest to disclose.

Acknowledgments

J.D. Weihermann and L.G. Castro were supported in this research by fellowships from Fundação Capes, Ministério da Educação. F.J.F. Ferreira and A.M. Silva were supported in this research by the National Council for Scientific and Technological Development (CNPq, Brazil) (contracts 303826/2018-5, and 307177/2014-9, respectively).

References

Achanta, R., Shaji, A., Smith, K., Lucchi, A., Fua, P., Süsstrunk, S., 2012. Slic superpixels compared to state-of-the-art superpixel methods. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 34, 2274–2282.

Alvarenga, C.J.S.d., Oliveira, C.G.d., Oliveira, F.B., Dantas, E.L., Fuck, R.A., 2007. Geologia da folha campinorte sd (22-zbi).

Arantes, D., Buck, P., Osborne, G., Porto, C., 1991. A sequência vulcano-sedimentar de mara rosa e as mineralizações auríferas associadas. SBG, Núcleo Centro-Oeste, Boletim informativo, pp. 27–40.

Blaschke, T., 2010. Object based image analysis for remote sensing. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 65, 2–16.

Cainzos, R.L.P., Pascholati, E.M., Souza Filho, C.R.D., 2002. Utilização da classificação não-supervisionada na integração e interpretação de dados geofísicos em cuba centro-oriental. *Rev. Brasil. Geofis.* 20, 151–161.

CPRM, S.G.D.B., 2004. Levantamento aerogeofísico Do Estado de Goiás-1ª Etapa: Arco magmático de arenópolis.

de Lima, R.P., Marfurt, K.J., 2018. Principal component analysis and k-means analysis of airborne gamma-ray spectrometry surveys. SEG Technical Program Expanded Abstracts 2018. Society of Exploration Geophysicists, pp. 2277–2281.

Deer, W.A.F., Howie, R.A., Zussman, J., 2013. An Introduction to the Rock-Forming Minerals. 3rd edition. Mineralogical Society of Great Britain and Ireland.

Della Giustina, M.E.S., 2007. Geologia e geocronologia da sequência vulcano-sedimentar campinorte e do complexo uruaçu, província tocantins.

Dickson, B., Scott, K., 1997. Interpretation of aerial gamma-ray surveys-adding the geochemical factors. *AGSO J. Aust. Geol. Geophys.* 17, 187–200.

dos Santos Albuquerque, M.F., Horbe, A.M.C., Soares, T.M., Sousa, E.M.D., de Figueiredo Iza, E.R.H., 2020. Airborne radiometric data for identifying lateritic surfaces in southwestern Amazonia, Brazil. *J. Appl. Geophys.* 175, 103989. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.103989>.

Eberle, D.G., Paasche, H., 2012. Integrated data analysis for mineral exploration: a case study of clustering satellite imagery, airborne gamma-ray, and regional geochemical data suites. *Geophysics* 77, B167–B176.

Friedman, J., Hastie, T., Tibshirani, R., 2001. *The Elements of Statistical Learning*, volume 1. Springer Series in Statistics New York.

Galbraith, J.H., Saunders, D.F., 1983. Rock classification by characteristics of aerial gamma-ray measurements. *J. Geochem. Explor.* 18, 49–73.

Graham, D., Bonham-Carter, G., 1993. Airborne radiometric data—a tool for reconnaissance geological mapping using a gis. *Photogramm. Eng. Remote. Sens.* 59, 1243–1249.

Harris, J., 1989. Clustering of gamma ray spectrometer data using a computer image analysis system. *Stat. Appl. Earth Sci.* 89.

IAEA, 1991. Airborne Gamma Ray Spectrometer Surveying. Technical Report 323. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria URL: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/22/072/22072114.pdf.

IAEA, 2003. Guidelines for Radioelement Mapping Using Gamma Ray Spectrometry Data. Technical Report 1363. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria URL: https://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/te_1363_web.pdf.

Jain, A.K., 2010. Data clustering: 50 years beyond k-means. *Pattern Recogn. Lett.* 31, 651–666.

Kailath, T., 1967. The divergence and bhattacharyya distance measures in signal selection. *IEEE Trans. Commun. Technol.* 15, 52–60. <https://doi.org/10.1109/TCOM.1967.1089532>.

Killeen, P., Mwenifumbo, C., Ford, K., 2015. Tools and Techniques: Radiometric Methods. MacQueen, J., et al., 1967. Some methods for classification and analysis of multivariate observations. Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, Oakland, CA, USA, pp. 281–297.

Maden, N., Akaryali, E., 2015. Gamma ray spectrometry for recognition of hydrothermal alteration zones related to a low sulfidation epithermal gold mineralization (eastern pontides, ne türkiye). *J. Appl. Geophys.* 122, 74–85.

Martelet, G., Truffert, C., Tourliere, B., Ledru, P., Perrin, J., 2006. Classifying airborne radiometry data with agglomerative hierarchical clustering: a tool for geological mapping in context of rainforest (French Guiana). *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 8, 208–223.

Minty, B.R.S., 1997. Fundamentals of airborne gamma-ray spectrometry. *AGSO J. Aust. Geol. Geophys.* 17, 39–50.

Moreira, M.L.O., Moreton, L.C., Araújo, V.A.D., Lacerda Filho, J.V.D., Costa, H.F.D., 2008. Geologia do estado de goiás e distrito federal.

Oliveira, F.B., 2009. Características epigenéticas do depósito de cu-au chapada, arco magmático de goiás.

Oliveira, C.G., de Queiroz, C.L., Pimentel, M.M., 2000. The arenópolis-mara rosa gold-copper belt, neoproterozoic goiás magmatic arc. *Rev. Brasil. Geosci.* 30, 219–221.

Oliveira, C.G., Pimentel, M.M., de Melo, L.V., Fuck, R.A., 2004. The copper-gold and gold deposits of the neoproterozoic Mara Rosa magmatic arc, Central Brazil. *Ore Geol. Rev.* 25, 285–299.

Oliveira, C.G., de Oliveira, F.B., Della Giustina, M.E.S., Marques, G.C., Dantas, E.L., Pimentel, M.M., Buhn, B.M., 2016. The Chapada cu–au deposit, Mara Rosa magmatic arc, Central Brazil: constraints on the metallogenesis of a neoproterozoic large porphyry-type deposit. *Ore Geol. Rev.* 72, 1–21.

Palermo, N., Porto, C.G., da Costa Jr., C.N., 2000. The Mara Rosa gold district, Central Brazil. *Rev. Brasil. Geosci.* 30, 256–260.

Pimentel, M.M., 2016. The tectonic evolution of the neoproterozoic Brasília belt, Central Brazil: a geochronological and isotopic approach. *Brazil. J. Geol.* 46, 67–82.

Pimentel, M.M., Whitehouse, M.J., Viana, M.D.G., Fuck, R.A., Nuno, M., 1997. The Mara Rosa arch in the Tocantins province: further evidence for neoproterozoic crustal accretion in Central Brazil. *Precambrian Res.* 81, 299–310.

Ranjbar, H., Hassanzadeh, H., Torabi, M., Ilaghi, O., 2001. Integration and analysis of airborne geophysical data of the Darrehzar Area, Kerman Province, Iran, using principal component analysis. *J. Appl. Geophys.* 48, 33–41.

Richards, J.A., Jia, X., 1999. *Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction*. 3rd ed. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.

Schwarz, G., et al., 1978. Estimating the dimension of a model. *Ann. Stat.* 6, 461–464.

Silva, A.M., Oliveira, C.G., Marques, G.C., Pires, A.C.B., 2007. Geophysical responses of hydrothermal rocks associated with copper-gold mineralization in the neoproterozoic Mara Rosa magmatic arc, Central Brazil. Proceedings of the Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration, pp. 1179–1183.

Teixeira, A.D.A., Silva, A.M., Pires, A.C.B., Moraes, R.A.V.D., Souza Filho, C.R.D., 2006. Integração e análise de dados aerogeofísicos por meio da aplicação de técnicas de processamento digital de imagens e classificação não supervisionada: O exemplo

- do greenstone belt rio das velhas, quadrilátero ferrífero, mg. *Rev. Brasil. Geofis.* 24, 559–572.
- Ulbrich, H.H.G.J., Ulbrich, M.N.C., Ferreira, F.J.F., Alves, L.S., Guimarães, G.B., Fruchting, A., 2009. Levantamentos gamaespectrométricos em granitos diferenciados. i: revisão da metodologia e do comportamento geoquímico dos elementos k, th e u. *Rev. Inst. Geosci.* 9, 33–53.
- Wang, Z., Bovik, A.C., Sheikh, H.R., Simoncelli, E.P., 2004. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity. *IEEE Trans. Image Process.* 13, 600–612.
- Wilford, J., 2002. Airborne gamma-ray spectrometry. In: Papp, E. (Ed.), *Geophysical and Remote Sensing Methods for Regolith Exploration*, pp. 46–52.
- Wilford, J., Bierwirth, P.N., Craig, M., 1997. Application of airborne gamma-ray spectrometry in soil/regolith mapping and applied geomorphology. *AGSO J. Austral. Geol. Geophys.* 17, 201–216.
- Zanotta, D.C., Zorzea, M., Ferreira, M.P., 2018. A supervised approach for simultaneous segmentation and classification of remote sensing images. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 142, 162–173.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme anteriormente discutido, a aquisição dos dados aerogamaespectrométricos é complexa, e envolve diversas variáveis instrumentais e do ambiente, como o ruído estatístico proveniente do decaimento radioativo, a área de amostragem do detector (*field of view*), os coeficientes de atenuação no ar e no terreno, a umidade do ar e o planejamento do aerolevanteamento. As correções pré-processamento são estabelecidas na literatura e devem ser efetuadas de maneira sistemática para estimar a concentração dos radioelementos no solo, embora algumas dessas correções possam suavizar demasiadamente os dados. A correção de altura considera a altura nominal constante da aeronave, o que não é sensato em áreas com relevo acidentado, já que pode levar a erros significativos. Uma outra questão importante é a natureza positiva dos dados AGRS, e em grande parte os dados finais acabam apresentando valores negativos, em função dos ruídos e das sucessivas correções as quais os dados são submetidos.

Neste trabalho foi desenvolvida uma metodologia de inversão com uma barreira logarítmica, para suprimir os valores negativos e melhorar a resolução das concentrações dos dados. Para isso foi testado em um ambiente teoricamente controlado, onde os parâmetros necessários para realizar a inversão pudessem ser encontrados na literatura, como as pistas de calibração. Foram testados os parâmetros mais relevantes como a eficiência do fopico do detector que foi estimada através dos *pads* de calibração, as atividades das fontes que podem ter inúmeras combinações a depender do tipo de rocha (fonte da radiação), parâmetros de atenuação no ar e no solo e a área do detector.

A inversão de dados AGRS não é amplamente utilizada, e foi retomada recentemente, sendo que não havia ainda sido aplicada no Brasil. A metodologia de inversão apresentada nesta tese é um avanço em relação ao processamento padrão, já que considera a sobreposição das áreas de amostragem, preserva a alta frequência espacial dos dados, e impõe a positividade.

No Artigo I, foi demonstrado que os resultados invertidos com e sem a barreira logarítmica (*Log-Barrier*) são praticamente os mesmos, exceto onde o parâmetro de regularização não foi suficiente o bastante para prevenir oscilações nos modelos invertidos, nesses casos, a inversão sem a barreira logarítmica apresentou valores

negativos espúrios. Um outro avanço em relação a inversão tradicional de dados AGRS é o fator de correção aplicado a matriz de sensibilidade que corrige a variação estatística das variáveis usadas na detecção dos raios gama.

A aplicação da inversão nos dados AGRS do Arco Magmático de Mara Rosa demonstrou ser eficiente (Anexo I), e reduziu os “olhos-de-boi”, que são padrões concêntricos ao redor dos dados provenientes do processamento padrão, oriundos da interpolação. Esse trabalho comparou dados AGRS tratados pelo processamento padrão e pela inversão, sendo os mapas invertidos mais contínuos e melhor interpretáveis para identificar feições de escala intermediária que coincidem com a geologia, e apresentam valores positivos. Por fim, foi demonstrado que a inversão de dados AGRS aumenta a resolução dos teores, evitando a sobreposição das áreas de amostragem e evita valores negativos espúrios.

A análise de dados aerogamaespectrométricos pode ser complexa, e para facilitar a interpretação foi desenvolvida uma metodologia para identificar automaticamente unidades geológicas aplicando a classificação não supervisionada em imagens ternárias (R - K, G - eTh, B - eU). A metodologia apresentada no Artigo II se mostrou eficiente para identificar as unidades geológicas, inclusive, separando unidades distintas de um mesmo Complexo ou Grupo geológico. É importante destacar que a área de estudo apresentou um contraste radiométrico significativo entre as litologias (principalmente granitos, ortognaisses e metassedimentos), resultando em uma correlação satisfatória com a geologia. Essa aproximação pode ser útil em áreas com acesso limitado, e combinada com outros métodos geofísicos pode fornecer informações em áreas com conhecimento geológico escasso. A metodologia apresentada no Artigo II poderá também ser aplicada aos dados invertidos.

6 TRABALHOS FUTUROS

No Anexo I, encontra-se o resumo expandido intitulado “*Airborne Gamma-ray spectrometry inversion: Case Study at Mara Rosa Magmatic Arc, Brazil*” aceito na conferência da SEG (Society of Exploration Geophysicists) *Annual Meeting 2021*, que mostra a metodologia de inversão apresentada neste tese, aplicada aos dados do Arco Magmático de Mara Rosa. A pesquisa encontra-se em desenvolvimento e será estruturada como um artigo a ser submetido a revista *Geophysics*.

Como a área de estudo apresenta importantes jazimentos minerais, serão gerados mapas gamaespectrométricos transformados de (F, KD e UD), cujas equações estão no Capítulo 2, subitem 2.1.3 (Radioelementos associados com alterações hidrotermais), através do processamento padrão e da inversão, a fim de identificar áreas hidrotermalizadas. Os dados dos parâmetros F, KD e UD podem ser representados conjuntamente na forma de mapas ternários (RGB). Como nos mapas básicos (K, eU, eTh e ternário) a inversão demonstrou um avanço em relação ao processamento padrão, espera-se que nesses mapas transformados as anomalias permaneçam mais contínuas e mais interpretáveis para identificar as feições relacionadas as alterações hidrotermais.

Como a proposta dessa tese é inovadora, após a publicação deste artigo, o algoritmo de inversão dos dados AGRS em malha poderá ser utilizado por agências governamentais, empresas privadas e pesquisadores.

REFERÊNCIAS

- ADAMS, J. A. & GASPARINI, P. **Gamma-ray spectrometry of rocks**. Elsevier, London, 295 pp. 1970.
- ALMEIDA, F. F. M., HASUI, Y., BRITO NEVES, B. B., FUCK, R.A. Províncias Estruturais Brasileiras. In: SBG, Simpósio de Geologia do Nordeste, 8, Campina Grande, **Anais**, 363-391. 1977.
- ALVARENGA, C.J.S.D., OLIVEIRA, C.G.D., OLIVEIRA, F.B., DANTAS, E.L., FUCK, R.A. **Geologia da folha campinorte sd (22-zbi)**. 2007.
- ARANTES, D., BUCK, P.S., OSBOURNE, G.A., PORTO, C.G. A Sequência Vulcanosedimentar de Mara Rosa e Mineralizações Auríferas Associadas. Boletim Informativo da SBG, Núcleo Centro-Oeste, 27-40. 1991.
- BEA, F. **Uranium**. In Encyclopedia of Geochemistry, Marshall, C.P and Fairbridge, R.W. (editors), Kluwer Academic Publishers, London, 712 pp. 1999.
- BARBOSA, R. D. & PEREIRA, J. G. Inversão 3D de dados Magnéticos na Região de Mara Rosa-Goiás, Brasil, utilizando Geosoft VOXI. In 13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF, Rio de Janeiro, Brazil, 26–29 August 2013, 520-525. 2013.
- BILLINGS, S. & HOVGAARD, J. Modeling detector response in airborne gamma-ray spectrometry. **Geophysics**, 64, 1378-1392. 1999.
- BILLINGS, S. D., MINTY, B. R. S., NEWSAM, G. N. Deconvolution and spatial resolution of airborne gamma-ray surveys. **Geophysics**, 68, 1257–1266. 2003.
- BLUM, M. L. B. Processamento e interpretação de dados de geofísica aérea no Brasil Central e sua aplicação à geologia regional e à prospecção mineral. Brasília, Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. 1999.
- BRIGGS, I. C. Machine contouring using minimum curvature. **Geophysics**, 39(1), 39-48. 1974.
- CAINZOS, R.L.P., PASCHOLATI, E.M., SOUZA FILHO, C.R.D. Utilização da classificação não supervisionada na integração e interpretação de dados geofísicos em cuba centro-oriental. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 20, p. 151–161. 2002.
- CARLOS, D. U. Desenvolvimento e construção de blocos de concreto radioativo para a calibração de espectrômetros gama portáteis e aerotransportados, utilizados em exploração mineral e de hidrocarbonetos. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. 2006.
- COMMER, M., & NEWMAN, G. A. New advances in three-dimensional controlled-source electromagnetic inversion. **Geophysical Journal International**, 172(2), 513-535. 2008.
- CPRM. **Levantamento Aerogeofísico do Estado de Goiás – Arco Magmático de Mara Rosa – Relatório Final do Levantamento e Processamento dos Dados Magnetométricos e Gamaespectrométricos**, Volume I – Texto Técnico. 2004.
- CPRM. **Programa Geologia do Brasil (PGB) – Projeto Arogeofísico Paraná- Santa Catarina Relatório final do levantamnto processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos**. Volume I. Lasa Prospecções. 2011.
- CRAIG, M., DICKSON, B., RODRIGUES, S. Correcting aerial gamma-ray survey data for aircraft altitude. **Exploration Geophysics**, 30(4), 161-166. 1999.
- CRAWFORD, A.J., CORBETT, K.D., EVERARD, J.L. Geochemistry of the Cambrian volcanic-hosted massive sulfide-rich Mount Read volcanics, Tasmania, and some tectonic implications. **Economic Geology**. v.87, p.597-619. 1992.

- CROSLY, D. J., REID, A. B. Inversion of gamma-ray data for element abundances. **Geophysics**, 47(1), 117-126. 1982.
- DANNI, J.C.M., DARDENNE, M.A., FUCK, R.A. Geologia da região de Goiás (GO): O "Greenstone Belt" da Serra de Santa Rita e a Sequência Serra do Cantagalo. In: Simp. Geol. do Centro-Oeste, I, Goiânia, SBG. 265-280. 1981.
- DAVIS, J. C., & SAMPSON, R. J. **Statistics and data analysis in geology**, (Vol. 646). New York: Wiley. 1986.
- DELLA GIUSTINA, M. E. S. Geologia e geocronologia da sequência Vulcano-sedimentar Campinorte e do Complexo Uruaçu, província Tocantins. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, 106 pp. 2007.
- DENTITH, M., & MUDGE, S. T. **Geophysics for the mineral exploration geoscientist**. Cambridge University Press, 454pp. 2014.
- DE LIMA, R. P., MARFURT, K. J. Principal component analysis and K-means analysis of airborne gamma-ray spectrometry surveys. In SEG Technical Program Expanded Abstracts 2018 (pp. 2277-2281). Society of Exploration Geophysicists. 2018.
- DICKSON, B.L. & SCOTT, K.M. Interpretation of aerial gamma-ray surveys — adding the geochemical factors. **AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics**, 17 (2), 187–200. 1997.
- DRUKER, E. Airborne gamma-ray spectrometry data processing using 1.5 D inversion. **Journal of Environmental Radioactivity**, 177, 13-23. 2017.
- DRUKER, E. Processing of Airborne Gamma-Ray Spectrometry Using Inversions. ASEG Extended Abstracts, 2016(1), 1-8. 2016.
- EBERLE, D. G., PAASCHE, H. Integrated data analysis for mineral exploration: A case study of clustering satellite imagery, airborne gamma-ray, and regional geochemical data suites. **Geophysics**, 77(4), B167-B176. 2012.
- FRANKLIN, J.M. **Volcanic-associated massive sulphide base metals; in Geology of Canadian Mineral Deposit Types**, (ed.) O.R. Eckstrand, W.D. Sinclair and R.I. Thorpe; Geological Survey of Canada, Geology of Canada, no. 8, 158-183. 1996.
- FORD, K., HARRIS, J. R., SHIVES, R., CARSON, J., BUCKLE, J. Remote predictive mapping 2. Gamma-ray spectrometry: A tool for mapping Canada's North. Geoscience Canada. 2008.
- 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, 197-208. 2003.
- FUCK R.A. A Faixa Brasília e a compartimentação tectônica na Província Tocantins. In: SBG, Simp. Geol. Centro-Oeste, 4, Brasília, Anais, 184-187. 1994
- FUCK R.A., JARDIM DE SÁ E.F., PIMENTEL M.M., DARDENNE M.A., PEDROSA SOARES A.C. As faixas de dobramentos marginais do Cráton do São Francisco: síntese dos conhecimentos. SBG, Núcleos Bahia e Sergipe, 161-185. 1993.
- GALBRAITH, J.H. & SAUNDERS, D.F. Rock classification by characteristics of aerial gamma ray measurements. **Journal of Geochemical Exploration**, 18, 49-73. 1983.
- GEOSOFT. Oasis Montaj Toppics in Gridding. Tutorial and User Guide. Disponível em: http://updates.geosoft.com/downloads/files/how-to-guides/Oasis_montaj_Gridding.pdf Acesso em: 01/05/2019. 2014.
- GUNN, P. J. Inversion of airborne radiometric data. **Geophysics**, 43, 133–143. 1978.
- GUNN P.J. Quantitative methods for interpreting aeromagnetic data: a subjective review. **AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics**. 17(2), 105-113. 1997.

- GNOJEK, I. & PRICHSTAL, A.A. New Zinc Mineralization Detected by Airborne Gamma-ray Spectrometry in Northern Moravia (Czechoslovakia). **Geoexploration**, 23, 491-502. 1985.
- GRANT, J. A. Ten things the textbooks don't tell you about processing and archiving airborne gamma-ray spectrometric data. **Current research**, 83-87. 1998.
- GRASTY, R.L. **Gamma-ray spectrometric methods in uranium exploration — theory and operational procedures**. In: Hood, P.J. (Ed.), In Geophysics and Geochemistry in the Search for Metallic Ores. Geological Survey of Canada, Economic Geology Report 31, pp. 147–161, 1979.
- GRASTY, R.L., KOSANKE, K.L., Foote, R.S. Fields of view of airborne gamma-ray detectors. **Geophysics**, 44 (8), 1447–1457, 1979.
- GRASTY, R. L., HOLMAN, P. B., BLANCHARD, Y. B. **Transportable calibration pads for ground and airborne gamma-ray spectrometers**. Geological Survey of Canada, 90 (23), 1991.
- GRASTY, R. L.; GLYNN, J. E.; GRANT, J. A. The analysis of multichannel airborne gamma-ray spectra. **Geophysics**, 50(12), 2611-2620, 1985.
- GRASTY, R. L; MINTY, B. R. S. **A guide to the technical specifications for airborne gamma-ray surveys**. Australian Geological Survey Organisation (AGSO), 89 pp. 1995.
- HARRIS, J. R. **Clustering of gamma ray spectrometer data using a computer image analysis system**. Statistical Applications in the Earth Science. Geological Survey of Canada, Canada, 19-31. 1989.
- HOOVER, D.B. & PIERCE, A.A. **Annotated bibliography of gamma-ray methods applied to gold exploration**. United States Geological Survey Open File Report 90-203. 1990.
- IAEA. **Airborne Gamma Ray Spectrometer Surveying**. Technical Reports Series No. 323. International Atomic Energy Agency, Vienna, 116 pp. 1991.
- IAEA. **Guidelines for Radioelement Mapping Using Gamma Ray Spectrometry Data**. Technical Report Serie, n° 1363. International Atomic Energy Agency, Vienna. 179 pp. 2003.
- JAIN, A. K. Data clustering: 50 years beyond K-means. **Pattern recognition letters**, v. 31, n. 8, p. 651-666, 2010.
- JOST, H., CARVALHO, M. J., RODRIGUES, V. G., MARTINS, R. **Metalogênese dos greenstone belts de Goiás. Metalogênese das Províncias Tectônicas Brasileiras**. CPRM, Belo Horizonte, 141-168. 2014.
- JOST H. & OLIVEIRA A.M. Stratigraphy of the greenstone belts, Crixás region, Goiás, Central Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, 4(3), 201 -214. 1991.
- KOGAN, R. M., NAZAROV, I. M., FRIDMAN, SH. D. **Gamma spectrometry of natural environments and formations**. Translated 1971 by Israel Program for scientific Translations Ltd., Springfield, VA, 22151, 337 pp, 1971.
- KILLEEN, P. G., MWENIFUMBO, C. J., FORD, K. L. **Tools and techniques: radiometric methods**. 2015.
- KUHNS, R., KENNEDY, P., COOPER, P., BROWN, P., MACKIE, B., KUSINS, R., FRIESEN, R. **Geology and mineralization association with the Golden Giant deposit, Hemlo, Ontario, Canada**. In Macdonald, A. J., ed., Gold '86: Willowdale, Ontario, Konsult Internat., 327-339. 1986.
- KUYUMJIAN, R. M. The geochemistry and tectonic significance of amphibolites from the Chapada sequence, central Brazil. P.h.D Thesis, University of London. 1989.
- KUYUMJIAN, R.M. & JOST, H. Low- and high-alumina komatiites of Goiás, Central

- Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**. 20, 315-326. 2006.
- KRISHNASWAMI, S. **Thorium**. In Encyclopedia of Geochemistry. Marshall, C.P and Fairbridge, R.W. (editors), Kluwer Academic Publishers, London, 712 pp. 1999.
- LAGERBLAD, B. & GORBATSCHEV, R. Hydrothermal alteration as a control of regional geochemistry and ore formation in the central Baltic Shield. **Geologische Jurnschau**, v. 74, p.33-49. 1985.
- LANGMUIR, D. & HERMAN, J.S. **The mobility of thorium in natural waters at low temperatures**. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 44, 1753–1766. 1980.
- LASA ENGENHARIA E PROSPECÇÕES S/A. **Levantamento Aerogeofísico do Estado de Goiás – Arco Magmático de Mara Rosa – Relatório Final do Levantamento e Processamento dos Dados Magnetométricos e Gamaespectrométricos**, Volume I – Texto Técnico. 2004.
- LI, Y., & OLDENBURG, D. W. 2000. 3-D inversion of induced polarization data. **Geophysics**, 65(6), 1931-1945. 2000.
- LINDSAY, M.D., JESSELL, M.W., AILLERES, L., PERROUTY, S., DE KEMP, E.A., BETTS, P.G. Geodiversity: exploration of 3D geological model space. **Tectonophysics**, 594, 27–37. 2013.
- LØVBORG, L., P. KIRKEGAARD. **Numerical evaluation of the natural gamma radiation field at aerial survey heights**. Risø Report n. 317. Danish atomic agency commission. 1975.
- MACQUEEN, J. Some methods for classification and analysis of multivariate observations. *Proceedings of the fifth Berkeley symposium on mathematical statistics and probability*. 1 (14). 1967.
- MARTELET, G., TRUFFERT, C., TOURLIERE, B., LEDRU, P., PERRIN, J. Classifying airborne radiometry data with agglomerative hierarchical clustering: a tool for geological mapping in context of rainforest (French Guiana). **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, 8(3), 208-223. 2006.
- MINTY, B.R.S. Fundamentals of airborne gamma-ray spectrometry. **AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics**, 17 (2), 39-50. 1997.
- MINTY, B. & BRODIE, R. The 3D inversion of airborne gamma-ray spectrometric data. **Exploration Geophysics**, 47(2), 150-157. 2015.
- MOREIRA, M.L.O., MORETON, L.C., ARAÚJO, V.A.D., LACERDA FILHO, J.V.D., COSTA, H.F.D. *Geologia do estado de goiás e distrito federal*. 2008.
- NOCEDAL, J., & WRIGHT, S. **Numerical Optimization**, second ed. Springer, New York, p. 664pp. 2006.
- OLIVEIRA, C. G., PIMENTEL, M. M., DE MELO, L. V., FUCK, R. A. The copper–gold and gold deposits of the Neoproterozoic Mara Rosa magmatic arc, central Brazil. **Ore Geology Reviews**, 25(3), 285-299. 2004.
- OSTROVSKY, E. Ya. Antagonism of radioactive elements in wallrock alteration fields and its use in aerogamma spectrometric prospecting. *International Geological Review*, 17, 461-468. 1975.
- PALERMO, N., PORTO, C.G., COSTA JR., C.N. The Mara Rosa gold district, central Brazil. **Revista Brasileira Geociências**, 30(2), 256-260. 2000.
- PIRES, A. C. B. Statistical characterization of greenstone sequences using magnetic and gamma-ray spectrometric data, Guarinos-Pilar de Goiás area, Brazil. **Brazilian Journal of Geology**, 20(1), 293-298. 1990.
- PIRES, A.C.B. Identificação geofísica de áreas de alteração hidrotermal, Crixás-Guarinos, Goiás: **Revista Brasileira de Geociências**, 21(1), 61–68. 1995.

- PIRES, A. C. B., HARTHILL, N. Statistical analysis of airborne gamma-ray data for geologic mapping purposes: Crixas-Itapaci area, Goiás, Brazil. **Geophysics**, 54(10), 1326-1332. 1989.
- PIMENTEL, M.M. & FUCK, R.A. Neoproterozoic Crustal Accretion in Central Brazil. **Geology**, 20, 375-379. 1992.
- PIMENTEL M.M., HEAMAN L., FUCK R.A. U-Pb zircon and sphene geochronology of late Proterozoic volcanic arc rock units from southwestern Goiás, central Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, 4, 329-339. 1991.
- PIMENTEL, M.M., WHITEHOUSE, M.J., VIANA, M.G., FUCK, R.A., MACHADO, N. The Mara Rosa Arc in the Tocantins Province: further evidence for Neoproterozoic crustal accretion in central Brazil. **Precambrian Research**, 81, 299-310. 1997.
- PIMENTEL, M. M. The tectonic evolution of the Neoproterozoic Brasília Belt, central Brazil: a geochronological and isotopic approach. **Brazilian Journal of Geology**, 46, 67-82. 2016.
- POLL N.J. The geology of the Zacarias gold-silver-barite deposit, Goiás State, Brazil. Colorado School of Mines, USA, Master thesis, 124p. 1994.
- PORTO, C.G. & HALE, M. Mineralogy, morphology, and chemistry of gold in stone line lateritic profile of the Posse deposit, Central Brazil. **Journal of Geochemical Exploration** 57, 115–125. 1996.
- POULSEN, K.H. & HANNINGTON, M.D. **Volcanic-associated massive sulphide gold; in Geology of Canadian Mineral Deposit Types**, (ed.) O.R. Eckstrand, W.D. Sinclair and R.I Thorpe; Geological Survey of Canada, Geology of Canada, 8, 183-196. 1996.
- RANJBAR, H., HASSANZADEH, H., TORABI, M., ILAGHI, O. Integration and analysis of airborne geophysical data of the Darrehzar area, Kerman Province, Iran, using principal component analysis. **Journal of Applied Geophysics**, 48(1), 33-41. 2001.
- RENNER, R. M. A constrained least-squares subroutine for adjusting negative estimated element concentrations to zero. **Computers & Geosciences**, 19(9), 1351-1360. 1993.
- RICHARDSON, J.V., JONES, J.P., ESSENE, E.J., KESLER, S.E. Origin and geochemistry of the Chapada Cu-Au deposit, Goiás, Brazil: a metamorphosed wall-rock porphyry Copper deposit. **Economic Geology**, 81:1884-1898. 1986.
- SAUNDERS, D.F., TERRY, S.A., THOMPSON, C.K. Test of National Uranium Resource Evaluation gamma-ray spectral data in petroleum reconnaissance. **Geophysics**, 52(11), 1547-1556. 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**, 58(10), 1417–1427. 1993.
- SHIVES, R.B.K., CHARNONNEAU, B.W., FORD, K.L. The detection of potassic alteration by gamma-ray spectrometry – Recognition of alteration related to mineralization. **Geophysics**, 65, 2001-2011. 2000.
- SILVA, A.M., OLIVEIRA, C.G., MARQUES, G.C., PIRES, A.C.B. Geophysical Responses Of Hydrothermal Rocks Associated With Copper-Gold Mineralization in the Neoproterozoic Mara Rosa Magmatic Arc, Central Brazil. In: Exploration in the Millennium, 2007, Toronto. Proceedings of the Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration, 02, 1179-1183. 2007.
- SCHETSELAAR, E. M., CHUNG, C. J. F., KIM, K. E. Integration of Landsat TM, gamma-ray, magnetic, and field data to discriminate lithological units in vegetated. **Remote Sensing of Environment**, 71(1), 89-105. 2000.

- SCHWARZ, G. F., KLINGELE, E. E., RYBACH, L. How to handle rugged topography in airborne gamma-ray spectrometry surveys. **First Break**, 10, 11–17. 1992.
- TAMMENMAA, J. K., GRASTY, R. L., PELTANIEMI, M. The reduction of statistical noise in airborne radiometric data. **Canadian Journal of Earth Sciences**, 13, 1351–1357. 1976.
- TEIXEIRA, A. D. A., SILVA, A. M., PIRES, A. C. B., MORAES, R. A. V. D., SOUZA FILHO, C. R. D. Integração e análise de dados aerogeofísicos por meio da aplicação de técnicas de processamento digital de imagens e classificação não supervisionada: O exemplo do Greenstone Belt Rio das Velhas, Quadrilátero ferrífero, MG. **Revista Brasileira de Geofísica**, 24(4), 559-572. 2006.
- TELES, L. S. B., CAMPOS, J. E. G., DE ALMEIDA, T., CICERELLI, R. E., YOKOYAMA, E. Utilização de Classificação Supervisionada Voltada ao Objeto para Discriminação das Rochas Fosfatadas da Região de Coromandel, Minas Gerais, Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências**, 43(1), 300-310. 2019.
- 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**, 9(1), 33-53, 2009.
- VALERIANO, C. M., PIMENTEL, M. M., HEILBRON, M., ALMEIDA, J. C. H., TROUW, R. A. J. Tectonic evolution of the Brasília Belt, Central Brazil, and early assembly of Gondwana. **Geological Society London**, 294(1), 197-210. 2008.
- WANG, J., MENG, X., & Li, F. A computationally efficient scheme for the inversion of large-scale potential field data: application to synthetic and real data. **Computers & Geosciences**, 85, 102-111. 2015.
- WEIHERMANN, J. D., OLIVEIRA, S. P., LI, Y., FERREIRA, F. J. F., SILVA, A. M., FORTIN, R. A log–barrier approach for airborne gamma-ray spectrometry inversion. **Computers & Geosciences**, 147, 104682. 2021a.
- WEIHERMANN, J. D., FERREIRA, M. P., DE CASTRO, L. G., FERREIRA, F. J. F., SILVA, A. M. Retrieving geological units with unsupervised clustering of gamma-ray spectrometry data. **Journal of Applied Geophysics**, 184, 104225. 2021b.
- WILFORD, J. R., BIERWIRTH, P. N., & CRAIG, M. A. Application of airborne gamma-ray spectrometry in soil/regolith mapping and applied geomorphology. **AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics**, 17(2), 201-216. 1997.
- WILFORD J. Airborne gamma-ray spectrometry. In: PAPP E. ed. Geophysical and remote sensing methods for regolith exploration. 2002.

ANEXO 1 – RESUMO EXPANDIDO SUBMETIDO EM CONGRESSO

RESUMO I - AIRBORNE GAMMA-RAY SPECTROMETRY INVERSION: CASE STUDY AT MARA ROSA MAGMATIC ARC, BRAZIL

Airborne Gamma-ray Spectrometry Inversion: Case Study at Mara Rosa Magmatic Arc, Brazil

Jessica D. Weihermann^{*1}, Saulo P. Oliveira¹, Yaoguo Li², Francisco J. F. Ferreira¹, and Adalene M. Silva³

¹ Laboratory for Research in Applied Geophysics, Department of Geology, Federal University of Paraná

² Center for Gravity, Electrical, and Magnetic Studies, Department of Geophysics, Colorado School of Mines

³ Instituto de Geociências, University of Brasília

Summary

Rocks and minerals are natural sources of radiation. For this reason, airborne gamma-ray spectrometry (AGRS) has been used for many applications such as geological mapping, environmental studies, mineral exploration, and mapping of lithologic units. As an alternative to the AGRS standard processing, we have developed a 2D inversion-based processing method that incorporates the aircraft height and replaces the sensitivity correction. In addition, the inclusion of positivity condition using a logarithmic barrier prevents unphysical negative values that may arise from steps in the standard processing. We present a comparative study between the standard AGRS processing and the inversion-based processing of AGRS data in the gold deposit-rich area of Mara Rosa Magmatic Arc, Brazil, and demonstrate the benefits of the new approach.

Introduction

Airborne gamma-ray spectrometry (AGRS) is a tool for geophysical and geological mapping to aid in both mineral exploration and mapping lithology distribution, especially in the areas difficult to access (Davis & Guilbert, 1973; Grasty, 1979; Dickson & Scott, 1997; Shives, 2015; Weihermann et al., 2021a). AGRS measures the relative abundance or concentration of potassium (K), uranium (eU), and thorium (eTh) in rocks and weathered materials up to 30- to 45-cm depth by detecting the gamma radiation emitted by the natural radioactive decay of these elements (Minty, 1997; Wilford, 2002; IAEA, 2003). The main sources of gamma radiation are derived from the disintegration of potassium 40 (^{40}K), uranium 238 (^{238}U) and thorium 232 (^{232}Th) decay series. The purpose of AGRS acquisition is to determine the concentrations of radioelements on the ground while eliminating the influencing factors that are not related to the geology (IAEA, 2003). Uranium and thorium do not emit direct gamma radiation. They are measured by their daughter elements ^{214}Bi and ^{208}Tl , respectively, and are reported in ppm (parts per million) of equivalent in uranium (eU), and equivalent in thorium (eTh).

The standard processing of AGRS data usually provides satisfactory results, especially in areas with a flat topography. Despite the satisfactory results, however, there is often an issue of negative concentrations caused by the successive corrections applied to the data in the standard processing. The inversion of AGRS data (Tammenmaa et al., 1976; Gunn, 1978; Crossley and Reid, 1982; Schwarz, 1992;

Minty and Brodie, 2015; Druker, 2017) is an alternative to the standard processing. Inversions incorporate the field of view of the detector and can suppress noise. Standard least-squares inversion may still produce models with negative concentrations, though. Such negative values are spurious and could compromise the quantitative interpretation of the concentration maps (IAEA, 2003). Weihermann et al. (2021b) recently developed an inversion method that included a logarithmic barrier constraint to overcome the negative values in the AGRS data inversion.

This paper presents an application of the logarithmic barrier inversion to AGRS data from the Mara Rosa Magmatic Arc, Brazil. The information provided by AGRS is relevant to this study area because AGRS is an effective method to detect the potassium alterations that are commonly associated with hydrothermal ore deposits.

Study Area and AGRS Survey

The study area is located in the State of Goiás, central Brazil. Figure 1 shows the area (red) inserted in the Mara Rosa Magmatic Arc Aerogeophysical Survey (grey) (CPRM, 2004). The high-resolution survey has N-S flight lines spaced 500 m apart and a flight height of 100 m.

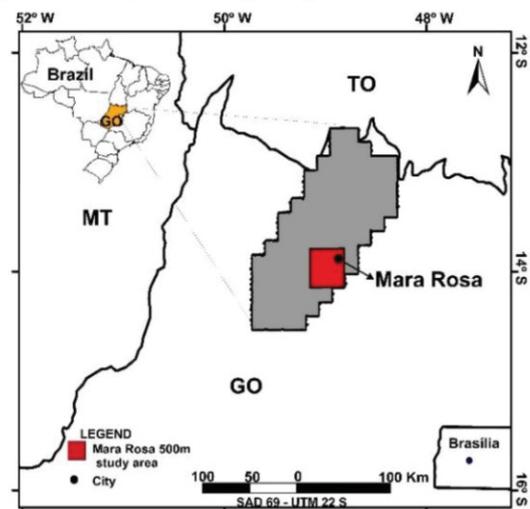


Figure 1: Location of the study area in red inside a larger geophysical project area shown in grey.

Airborne Gamma-ray Spectrometry Inversion: Case Study at Mara Rosa Magmatic Arc, Brazil

The geology of the Mara Rosa Magmatic Arc (MRMA) (Figure 2) consists of elongated volcano-sedimentary belts in NNE direction, surrounded by orthogneisses with predominantly tonalitic composition (Arantes et al. 1991, Pimentel, 2016). The supracrustal sequences include expressive volume of mafic metavolcanic rocks, in addition to intermediate to felsic representatives, intercalated to metasedimentary rocks of detrital and chemical nature. The metamorphism condition indicates greenschist to amphibolites facies (Oliveira et al., 2000). The MRMA contains important Au deposits (e.g., Posse, Zacarias, Mundinho) and Cu-Au deposits (e.g., Chapada) as outlined in Figure 2 (Palermo et al., 2000; Oliveira et al., 2000; Silva et al., 2007; Oliveira et al., 2016).

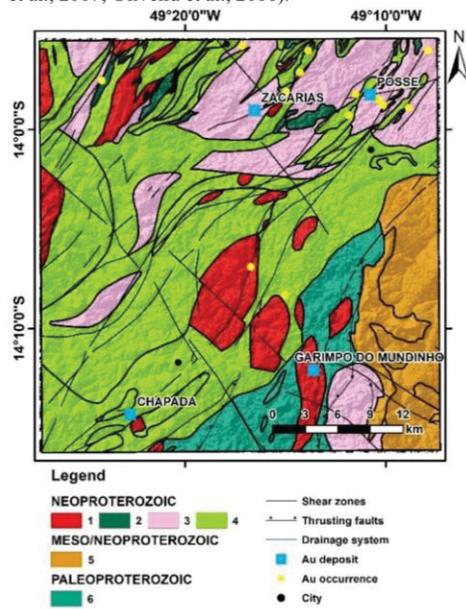


Figure 2: Schematic geological map of the study area (red square of Figure 1). 1 - Sin-Pos tectonic granites; 2- Gabbrodiorite; 3 - Orthogneiss-Biotite gneiss; 4 - Mara Rosa Volcano-Sedimentary Sequence; 5- Serra da Mesa group; 6 - Campinorte Volcano-Sedimentary Sequence.

Methodology

AGRS Standard Approach

The standard approach of radiometric data processing is well established in literature (IAEA 1989, IAEA 1991, IAEA 2003). After the airborne survey, the data are corrected from dead time, noise reduction, background, stripping, height, and reduction to elemental concentrations (IAEA 2003).

Usually, the AGRS data are represented in the form of color maps illustrating the three channels (K, eU and, eTh). The data were gridded using the minimum curvature gridding at a quarter of the flight lines spacing, resulting in the potassium (K - %), uranium (eU - ppm) and thorium (eTh - ppm) maps. When the topography is flat the standard processing provides good results, but in rugged terrains the parameter variations including the flight height can lead to erroneous anomaly images.

AGRS Inversion

The inversion was applied to the corrected and stripped data and replaced the height and sensitivity corrections as well as accounted for the overlapping sensor footprints. The inversion incorporated the actual aircraft height and the field of view of the detector and tends to represent the sources more reasonably. The data were acquired by an NaI(Tl) detector in counts per second (cps) and were estimated as elemental concentrations in the ground. To perform the inversion, we first assume that sources are distributed only in the lower half-space and consist of elementary rods with constant radioactivity (Kogan et al., 1971) (Figure 3).

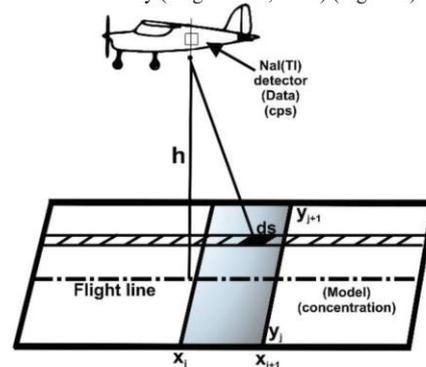


Figure 3: Schematic model of AGRS acquisition over a flight line (Adapted from Kogan et al., 1971 and Løvborg and Kirkegaard, 1975). The dashed line is the flight line profile, ds is the infinitesimal cross-sectional area and h is the flight height.

To invert the Mara Rosa data, we divide the study area into M blocks $B_j = [x_j, x_{j+1}] \times [y_j, y_{j+1}]$ with $(1 \leq j \leq M)$. Within each block, the radioactive source is represented as a homogeneous, vertically semi-infinite prism. Following Kogan et al. (1971) and Gunn (1978), the number of gamma-rays per seconds is found by integration of the intensity due to elementary rods within this prism as follows:

$$J = c A \varepsilon_p \int_{B_j} \frac{h \exp(-\mu_1 R) ds}{2\pi R^3}, \quad (1)$$

Airborne Gamma-ray Spectrometry Inversion: Case Study at Mara Rosa Magmatic Arc, Brazil

where c is the source concentration in a rod, A is the detector area, ε_p is the photopeak efficiency, $J_0 = q/2\mu_2$ is the surface radiation intensity, q is the source activity, μ_1 (μ_2) is the attenuation parameter in the air (earth), h is the flight altitude, R is the distance between the detector and ground.

We regard as model parameters the elemental concentration m_j in each block B_j . Using equation 1, we find the total contribution of all blocks to the i 'th record of number of counts per second by a weighted sum:

$$d_i = \sum_{j=1}^M m_j \tilde{G}_{ij}, \quad \tilde{G}_{ij} = A \varepsilon_p J_0 \frac{h}{2\pi} \int_{B_j} \frac{e^{-\mu_1|\vec{r}_i-\vec{r}|}}{|\vec{r}_i-\vec{r}|^3} ds \quad (2)$$

where \vec{r}_i is the position of i 'th observation point above the area and \vec{r} denotes the position on the ground.

To correct for possible discrepancies between the parameters reported in the literature and the actual parameters of the survey area, we have included a correction factor (c_f) in the sensitivity matrix:

$$G = c_f \tilde{G}. \quad (3)$$

where c_f is determined as the scaling factor that minimizes the dispersion in the L_2 norm between the data vector \vec{d} and the predicted data $\vec{d}_{st} = \tilde{G}m_{st}$ obtained from the concentration vector \vec{m}_{st} provided by standard processing:

$$c_f = \underset{\tau}{\operatorname{argmin}} \|\vec{d} - \tau \vec{d}_{st}\|, \quad (4)$$

In summary, by discretizing the source into homogeneous prisms as in equation 2 and accounting for the correction factor, we obtain the linear system of equations,

$$\vec{d} = G\vec{m}, \quad (5)$$

where $\vec{d} = (d_1, d_2, \dots, d_N)^T$ is the vector of observed counts per second, $\vec{m} = (m_1, m_2, \dots, m_M)^T$ gathers the concentrations of all blocks, $G = [G_{ij}]$ ($1 \leq i \leq N$; $1 \leq j \leq M$) is the matrix defining the contribution of j 'th prism to i 'th count.

The least-squares solution of equation 5 may not avoid negative concentrations (i.e., $m_j < 0$) that are usually also encountered in standard processing due to the successive corrections of the data. To suppress the negative values and to obtain a more robust concentration estimate, we consider the following constrained regularized inversion:

$$\begin{aligned} \min \varphi &= \varphi_d + \lambda \varphi_m, \\ \text{subject to } &0 \leq m_j \leq u, \quad j = 1, \dots, M, \end{aligned} \quad (6)$$

where $\varphi_d(\vec{m}) = \|W_d(G\vec{m} - \vec{d})\|^2$ is the weighted data misfit, $\varphi_m(\vec{m}) = \|W_m(\vec{m} - \vec{m}_0)\|^2$ penalizes the model roughness and distance to a reference model \vec{m}_0 , λ is the regularization parameter, and u is the upper bound for numerical stability (Li and Oldenburg, 2000) when implementing the positivity. To create an appropriate reference model for AGRS inversions, we calculated the ideal concentration of the radioelements (K, eU, eTh) in rocks and weathered materials (IAEA, 2003).

To impose the constraints $0 \leq m_j \leq u$, we minimize the augmented functional:

$$L(\vec{m}, \eta) = \varphi - 2\eta \left\{ \sum_{j=1}^M \ln\left(\frac{m_j}{u}\right) + \sum_{j=1}^M \ln\left(1 - \frac{m_j}{u}\right) \right\}, \quad (7)$$

where η is the barrier parameter. The log-barrier inversion for 2D AGRS data is detailed in Weihermann et al. (2021b).

Results and Discussion

The results of the standard approach for the three elements' concentrations are shown in Figure 4, which exhibit negative values. In addition, there are significant small-scale fluctuations that are judged to be noise.

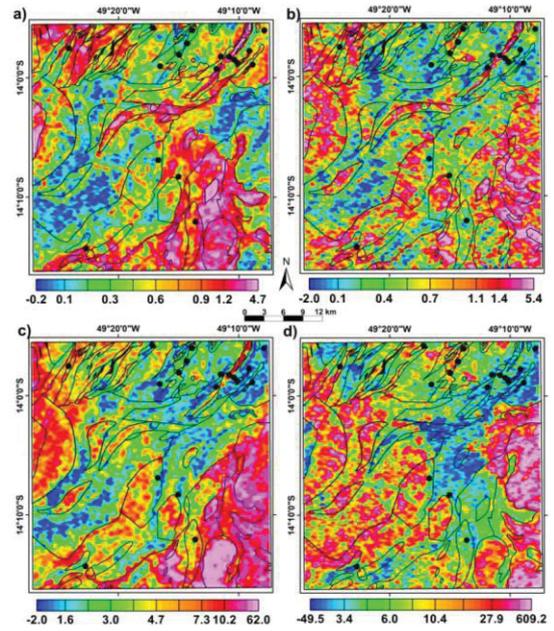


Figure 4: Concentration maps from the standard processing for a) K, b) eU, c) eTh and d) eTh/K ratio. Black dots are the locations of mineral occurrences, and black lines are the known geology boundaries.

Airborne Gamma-ray Spectrometry Inversion: Case Study at Mara Rosa Magmatic Arc, Brazil

We applied the inversion algorithm to the K, eU and eTh radioelements, and the recovered maps shown in Figure 5. The comparison between Figures 4 and 5 shows the long-wavelength similarities between them with some exceptions. It can be seen that the inverted maps are smoother and more continuous than those from the standard approach. The inverted maps (Figure 5) tend to suppress the “bull's-eye” patterns of concentric contours around the data points from the standard processing.

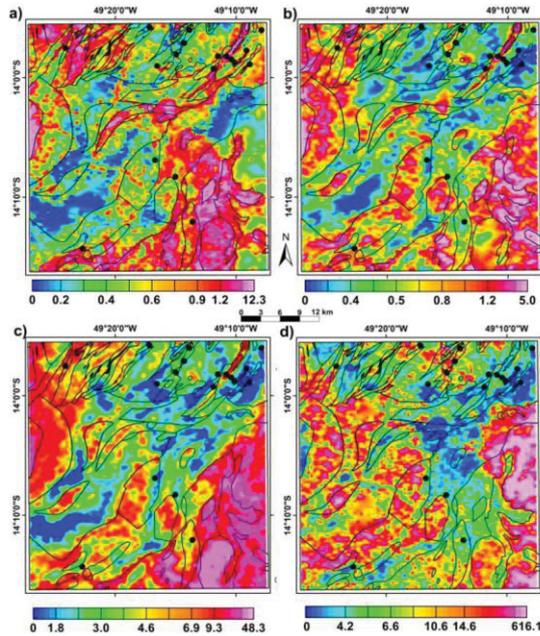


Figure 5: Inverted concentration maps of a) K, b) eU, c) eTh and d) eTh/K ratio. Black dots are the locations of mineral occurrences, and black lines are the known geology boundaries.

Usually, primary radiometric maps (K, eU and eTh) reflect the lithotype and soil variations. Operations among the K, eU, and eTh channels enhances different features, which could be related to hydrothermal alterations, for example. AGRS has been used to detect the potassic alteration zones associated with porphyry copper deposits (e.g., Shives et al., 2000). Potassic alteration zones typically have low eTh/K ratio. As thorium enrichment generally does not accompany potassium during hydrothermal alteration processes, eTh/K ratios provide an excellent indicator to distinguish between potassium associated with alteration and anomalies related to normal lithological variations (Galbraith and Saunders, 1983). Figures 4d and 5d compare the eTh/K ratio of both approaches presented in this study. The observed anomalies

are likely related to normal lithological variations, since they do not follow the mineralized occurrences (black dots). The low ratios are likely related to the potassic alteration zones, as these zones correspond to the known mineral occurrences (black dots) in the study area. The results are similar, but the inverted map (Figure 5d) is more continuous and, the mineral occurrences have a better correlation with the low values of eTh/K ratio.

Conclusions

This work has compared the AGRS data processed using standard approach and our inversion algorithm. The inversion results show improvement in several aspects. The large-scale zonation is consistent between the recovered maps from inversion and those from standard approach. The most noticeable improvement is the removal of small-scale variations in each map that are judged to be noise from the acquisition. As a result, recovered maps from inversion are more continuous and also reduced the interpolation artifacts. The inverted maps are also more interpretable for identifying intermediate-scale features that correspond with geology.

The standard AGRS data processing consists of several corrections that are routinely adopted by the AGRS community, but some steps could lead to erroneous results because the drawbacks such as assuming a constant flight height and allowing nonphysical negative concentrations.

The inversion of AGRS data has been shown to be an effective alternative to the standard procedure. The new approach can increase the concentration resolution by dealing with the overlapping sensor footprint and avoiding over-smoothing from standard processing. The log-barrier constraint ensures that spurious negative values are avoided as well so the final results are physical.

Acknowledgments

J.D. Weihermann was supported in this research by a fellowship from Fundação Capes - Ministério da Educação, Brazil. S.P. Oliveira, F.J.F. Ferreira and A.M. Silva were supported in this research by National Council for Scientific and Technological Development (CNPq, Brazil) (contracts 313100/2017-9, 303826/2018-5, and 307177/2014-9 respectively).

Society of Exploration Geophysicists

View Abstract

CONTROL ID: 3582157

SUBMISSION TITLE: Airborne gamma-ray spectrometry inversion: case study at Mara Rosa Magmatic Arc, Brazil

PREFERRED PRESENTATION TYPE: Oral Presentation

PRIMARY TOPIC: Mining

SECONDARY TOPIC:

KEYWORDS: radiometrics, inversion, geology, mining.

EXPANDED ABSTRACT: [[Weihermann_et_al_2021.pdf](#)]

EXPANDED ABSTRACT AUTHOR BYLINE: Jessica D. Weihermann¹, Saulo P. Oliveira¹, Yaoguo Li², Francisco J. F. Ferreira¹, and Adalene M. Silva³

¹ Laboratory for Research in Applied Geophysics, Department of Geology, Federal University of Paraná

² Center for Gravity, Electrical, and Magnetic Studies, Department of Geophysics, Colorado School of Mines

³ Instituto de Geociências, University of Brasília

PRESENTER: Jessica Weihermann,

TRANSFER OF COPYRIGHT: I agree to all terms of the Transfer of Copyright Agreement.

LICENSE AGREEMENT FOR PRESENTATION FILE(S): No

LICENSE AGREEMENT FOR BROADCAST/RECORDING: One-time presentation rights granted

NO SHOW POLICY: I agree

AUTHORS (FIRST NAME, LAST NAME): Jessica Weihermann¹, Saulo Oliveira¹, Yaoguo Li², Francisco Jose Ferreira³, Adalene N. Silva⁴

AFFILIATIONS (ALL): 1. Federal Univ of Parana, Curitiba, PR, Brazil.

2. Colorado School of Mines, Golden, CO, United States.

3. Federal Univ of Parana, Curitiba, PR, Brazil.

4. University of Brasilia, Brasilia, Brazil.

REFERENCES:

Arantes, D., Buck, P., Osborne, G., Porto, C., 1991. A sequência vulcano-sedimentar de mararosa e as mineralizações auríferas associadas. SBG, Núcleo Centro-Oeste, Boletim informativo, pp. 27–40.

Crossley, D.J., Reid, A.B., 1982. Inversion of gamma-ray data for element abundances. *Geophysics* 47 (1), 117–126.

CPRM, 2004. Levantamento aerogeofísico do estado de Goiás-1a Etapa: Arco magmático de Arenópolis.

Davis, J., and J.M. Guilbert, 1973, Distribution of the radioelement's potassium, uranium and thorium in selected porphyry copper deposits. *Economic Geology*, 68, 145–160.

Dickson, B. L., and K. M. Scott, 1997, Interpretation of aerial gamma-ray surveys — adding the geochemical factors. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, 17 (2), 187–200.

Druker, E., 2017. Airborne gamma-ray spectrometry data processing using 1.5 D inversion. *Journal of Environmental Radioactivity*, 177, 13–23.

Galbraith, J.H., Saunders, D.F., 1983. Rock classification by characteristics of aerial gamma-ray measurements. *Journal of Geochemical Exploration*, 18, 49–73.

Gunn, P. J., 1978, Inversion of airborne radiometric data: *Geophysics*, 43, 133–143.

- Grasty, R.L., 1979, Gamma-ray spectrometric methods in uranium exploration — theory and operational procedures. In: Hood, P.J. (Ed.), *In Geophysics and Geochemistry in the Search for Metallic Ores*. Geological Survey of Canada, Economic Geology Report 31, pp. 147–161.
- IAEA, 1989, Construction and use of calibration facilities for radiometric field equipment; Technical Report Series No. 309 International Atomic Energy Agency, Vienna, 86 p.
- IAEA, 1991, Airborne Gamma Ray Spectrometer Surveying, Technical Reports Series No. 323. International Atomic Energy Agency, Vienna, 116 pp.
- IAEA, 2003, Guidelines for Radioelement Mapping Using Gamma Ray Spectrometry Data. Technical Report Serie, n° 1363. International Atomic Energy Agency, Vienna. 179 pp.
- Kogan, R. M., I. M. Nazarov, and SH. D. Fridman, 1971, Gamma spectrometry of natural environments and formations. Translated 1971 by Israel Program for scientific Translations Ltd., Springfield, VA, 22151, 337 pp.
- Li, Y., Oldenburg, D.W., 2000. 3-D inversion of induced polarization data. *Geophysics* 65 (6), 1931–1945.
- Løvborg, L., and P. Kirkegaard, 1975, Numerical evaluation of the natural gamma radiation field at aerial survey heights. Risø Report n. 317. Danish atomic agency commission.
- Minty, B.R.S., 1997, Fundamentals of airborne gamma-ray spectrometry. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, 17(2), 39-50.
- Minty, B.R.S., and R. Brodie, 2015, The 3D inversion of airborne gamma-ray spectrometric data: *Exploration Geophysics*, 47, 150–157.
- Oliveira, C.G., de Queiroz, C.L., Pimentel, M.M., 2000. The Arenópolis-Mara Rosa goldcopper belt, neoproterozoic Goiás magmatic arc. *Revista Brasileira de Geociências*, 30, 219–221.
- Oliveira, C.G., de Oliveira, F.B., Della Giustina, M.E.S., Marques, G.C., Dantas, E.L., Pimentel, M.M., Buhn, B.M., 2016. The Chapada cu–au deposit, Mara Rosa magmatic arc, Central Brazil: constraints on the metallogenesis of a neoproterozoic large porphyry-type deposit. *Ore Geology Reviews*, 72, 1–21.
- Palermo, N., Porto, C.G., da Costa Jr., C.N., 2000. The Mara Rosa gold district, Central Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, 30, 256–260.
- Pimentel, M.M., 2016. The tectonic evolution of the neoproterozoic Brasília belt, Central Brazil: a geochronological and isotopic approach. *Brazilian Journal of Geology*, 46, 67–82.
- Silva, A.M., Oliveira, C.G., Marques, G.C., Pires, A.C.B., 2007. Geophysical responses of hydrothermal rocks associated with copper-gold mineralization in the Neoproterozoic Mara Rosa magmatic arc, Central Brazil. *Proceedings of the Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration*, pp. 1179–1183.
- Schwarz, G.F., Klingele, E.E., Rybach, L., 1992. How to handle rugged topography in airborne gamma-ray spectrometry surveys. *First Break* 10, 11–17.
- Shives, R.B., 2015. Using gamma-ray spectrometry to find rare metals. In: Simandl, G.J. and Neetz, M., (Eds.), *Symposium on Strategic and Critical Materials Proceedings*, November 13-14, 2015, Victoria, British Columbia. British Columbia Ministry of Energy and Mines, British Columbia Geological Survey Paper 2015-3, pp. 199-209.
- Shives, R. B., Charbonneau, B. W., Ford, K. L., 2000. The detection of potassic alteration by gamma-ray spectrometry—recognition of alteration related to mineralization. *Geophysics*, 65(6), 2001-2011.
- Tammenmaa, J.K., Grasty, R.L., Peltaniemi, M., 1976. The reduction of statistical noise in airborne radiometric data. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 13, 1351–1357.
- Wilford, J., 2002, Airborne gamma-ray spectrometry. In: Papp (Ed.), *Geophysical and Remote Sensing Methods for Regolith Exploration*. CRCLEME Open File Report 144, pp. 46–52.

3/29/2021

ScholarOne Abstracts - Abstract proof popup

Weihermann, J. D., Ferreira, M. P., de Castro, L. G., Ferreira, F. J. F., & Silva, A. M., 2021a. Retrieving geological units with unsupervised clustering of gamma-ray spectrometry data. *Journal of Applied Geophysics*, 184, 104225.

Weihermann, J. D., Oliveira, S. P., Li, Y., Ferreira, F. J. F., Silva, A. M., & Fortin, R., 2021b. A log-barrier approach for airborne gamma-ray spectrometry inversion. *Computers & Geosciences*, 147, 104682.

© Clarivate Analytics | © ScholarOne, Inc., 2021. All Rights Reserved.

ScholarOne Abstracts and ScholarOne are registered trademarks of ScholarOne, Inc.

ScholarOne Abstracts Patents #7,257,767 and #7,263,655.

[@ScholarOneNews](#) | [System Requirements](#) | [Privacy Statement](#) | [Terms of Use](#)

Product version number 4.17.4 (Build 110). Build date Thu Mar 25 07:11:58 EDT 2021. Server ip-10-236-27-113