



Número: 419/2010
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS
ÁREA DE GEOLOGIA E RECURSOS NATURAIS

RODRIGO DOS REIS SALLES

**DEPÓSITO METAMÓRFICO-HIDROTHERMAL DE U-ETR *MARY KATHLEEN*,
NOROESTE DE *QUEENSLAND*, AUSTRÁLIA: UMA INVESTIGAÇÃO BASEADA EM
ASSINATURAS HIPERESPECTRAIS E AERORADIOMÉTRICAS**

Dissertação apresentada ao Instituto de
Geociências como parte dos requisitos para
obtenção do título de Mestre em Geociências –
Área de Geologia e Recursos Naturais

Orientador: Prof. Dr. Carlos Roberto de Souza Filho

Co-Orientador: Prof. Dr Thomas John Cudahy

CAMPINAS – SÃO PAULO
Junho/2010

**Catálogo na Publicação elaborada pela Biblioteca
do Instituto de Geociências/UNICAMP**

Salles, Rodrigo dos Reis.

Sa34d Depósito Metamórfico-Hidrotermal de U-ETR Mary Kathleen, noroeste de Queensland, Austrália : uma investigação baseada em assinaturas hiperespectrais e aeroradiométricas / Rodrigo dos Reis Salles-- Campinas, SP.: [s.n.], 2010.

Orientador: Carlos Roberto de Souza Filho, Thomas John Cudahy.

Dissertação (mestrado) Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências.

1. Prospecção mineral. 2. Urânio – Minas e mineração. 3. Lógica fuzzy. 4. Sensoriamento remoto. I. Souza Filho, Carlos Roberto. II. Cudahy, Thomas John. III. Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências. IV. Título.

Título em inglês. New insights on the Mary Kathleen Metamorphic-Hydrothermal U-REE Deposit, Northwest Queensland, Australia : an approach based on hyperspectral and airborne gamma-ray signatures.

Keywords: - Mineral prospecting;
- Uranium – Mines and mining;
- Fuzzy logic;
- Remote sensing.

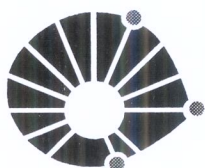
Área de concentração: Geologia e Recursos Naturais

Titulação: Mestre em Geociências.

Banca examinadora: - Carlos Roberto de Souza Filho;
- Lena Virgínia Soares Monteiro;
- Paulo Roberto Meneses.

Data da defesa: 25/06/2010

Programa de Pós-graduação em Geociências



UNICAMP

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS NA
ÁREA DE GEOLOGIA E RECURSOS NATURAIS

AUTOR: Rodrigo dos Reis Salles

Depósito Metamórfico-Hidrotermal de U-ETR Mary Kathellen, noroeste de
Queensland, Austrália: uma investigação baseada em assinaturas Hiperespectrais
e Aeroradiométricas

Orientador: Prof. Dr. Carlos Roberto de Souza Filho

Co-Orientador: Prof. Dr Thomas John Cudahy

Aprovada em: 25 / 06 / 2010

EXAMINADORES:

Prof. Dr. Carlos Roberto de Souza Filho

Prof. Dr. Paulo Roberto Meneses

Profa. Dra. Lena Virginia Soares Monteiro

Campinas, 25 de junho de 2010.

SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS	v
RESUMO	vii
ABSTRACT	ix
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Apresentação	1
1.2. Objetivos Específicos	2
1.3. Localização da Área de Estudo	3
2. MATERIAIS	3
3. MÉTODOS E TÉCNICAS DE PESQUISA	3
4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	3
4.1. Prospecção Uranífera: Modelagem Geoestatística e Integração de Assinaturas Aeroradiométricas com base no Modelo de Depósito Metamórfico-Hidrotermal de U-ETR <i>Mary Kathleen</i> , NW de <i>Queensland</i> , Austrália	4
4.2. Aplicações do <i>scanner</i> Hiperspectral HyMap como Suporte à Prospecção Uranífera: Estudo de Caso na Área do Depósito Metamórfico-Hidrotermal de U-ETR <i>Mary Kathleen</i> , NW de <i>Queensland</i> , Austrália	4
5. CONCLUSÕES GERAIS	5
ÍNDICE DE FIGURAS.....	6
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	7
ARTIGO 1	
Prospecção Uranífera: Modelagem Geoestatística e Integração de Assinaturas Aeroradiométricas com base no Modelo de Depósito Metamórfico-Hidrotermal de U-ETR <i>Mary Kathleen</i> , NW de <i>Queensland</i> , Austrália.	9
ARTIGO 2	
Aplicações do <i>scanner</i> Hiperspectral HyMap como Suporte à Prospecção Uranífera: Estudo de Caso na Área do Depósito Metamórfico-Hidrotermal de U-ETR <i>Mary Kathleen</i> , NW de <i>Queensland</i> , Austrália.	67
ANEXO 1	
Mapas com abundância de minerais primários.....	107
ANEXO 2	
Mapas com abundância de minerais de alteração supérgena.....	115



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS
ÁREA DE GEOLOGIA E RECURSOS NATURAIS

**O DEPÓSITO METAMÓRFICO-HIDROTHERMAL DE U-ETR *MARY KATHLEEN*, NOROESTE
DE *QUEENSLAND*, AUSTRÁLIA: UMA INVESTIGAÇÃO BASEADA EM ASSINATURAS
HIPERESPECTRAIS E AERORADIOMÉTRICAS**

RESUMO

Dissertação de Mestrado
RODRIGO DOS REIS SALLES

O depósito metamórfico-hidrotermal de U-ETR *Mary Kathleen*, localiza-se à NW de *Queensland*, Austrália e está inserido na Província Metamórfica *Mount Isa*. Os litotipos predominantes nessa região compreendem rochas sedimentares (calcários, folhelhos e etc.), rochas vulcânicas (riolitos, basaltos, dacitos e etc.) e, subordinadamente, rochas granitóides (granodiorito, leucogranito porfíritico e etc.), metamorfas entre as fácies xisto-verde à anfibolito. O depósito *Mary Kathleen* (1550 Ma), atualmente exaurido, ocorre associado a *skarns* enriquecidos em U-ETR. A área de estudo contém ainda várias ocorrências de U com expressivas concentrações, além dos prospectos uraníferos *Rita* e *Elaine Dorothy*. Esta tipologia de depósito distingue-se dos principais depósitos mundiais de U pela ocorrência de alterações do tipo cálcio-silicática, granatização e metassomatismo de contato. Para tanto, foram necessárias condições físico-químicas especiais impostas pela instalação de intrusões graníticas de composição intermediária e ácida sobre calcário impuro, exatamente o caso da Mina *Mary Kathleen*. No presente estudo, são investigadas as assinaturas radiométricas regionais e as assinaturas hiperespectrais associadas aos minerais vetores da mineralização uranífera. No primeiro capítulo, dois métodos e técnicas de manipulação e integração de dados são comparados, com o objetivo de compilar mapas preditivos visando proporcionar subsídios adicionais à prospecção uranífera regional. Os mapas compilados pela abordagem Geoestatística foram fundamentados na análise das variáveis quanto a sua posição e variabilidade. O método baseado em Lógica *Fuzzy* reuniu mapas auto-explicativos ainda não experimentados na pesquisa mineral para a commodity U. Nesta conjuntura, áreas com alto potencial prospectivo foram evidenciadas a partir da integração dos dados aeroradiométricos. No segundo capítulo, imagens adquiridas pelo sensor hiperespectral HyMap foram processadas segundo um conjunto de métodos para extração de informações mineralógicas de detalhe. O principal resultado deste estudo foi a determinação das assinaturas hiperespectrais dos minerais satélites da Mina *Mary Kathleen*. Parte desta associação mineral consiste de minerais passíveis de detecção remota como a andradita, o epidoto, a hornblenda, a calcita e a escapolita. A análise espectral revelou ainda outros minerais tais como, goethita, caulinita e montmorillonita nas proximidades e frente de lavra da mina. Os cartogramas de abundância mineral, resultantes dos métodos de classificação hiperespectral *Spectral Angle Mapper* (SAM) e *Mixture Tuned Matched Filtering* (MTMF) foram combinados no espaço de cores RGB. Esta estratégia permitiu delinear áreas de domínio e mistura de minerais com grande aplicabilidade na pesquisa mineral uranífera.

Palavras chaves: Prospecção Mineral, U-ETR, Lógica Fuzzy, Mapas Prospectivos, Sensoriamento Remoto Hiperespectral, HyMap, Mina *Mary Kathleen*, *Skarns*.



UNIVERSITY OF CAMPINAS
GEOCIENCES INSTITUTE
GEOCIENCES POSTGRADUATE
GEOLOGY AND NATURAL RESOURCES

**NEW INSIGHTS ON THE MARY KATHLEEN METAMORPHIC-HYDROTHERMAL U-REE
DEPOSIT, NORTHWEST QUEENSLAND, AUSTRALIA: AN APPROACH BASED ON
HYPERSPECTRAL AND AIRBONE GAMMA-RAY SIGNATURES**

ABSTRACT

Master Degree Dissertation
RODRIGO DOS REIS SALLES

The Mary Kathleen Metamorphic-Hydrothermal U-REE Deposit of northwest Queensland, Australia is inserted in the Mount Isa Metamorphic Province. The predominant rock types in the study area are represented by sedimentary rocks (limestone, shales, etc.), volcanics rocks (rhyolite, basalt, dacite, etc.) and subordinate intrusive rocks (granodiorite, porphyritic leucogranite, etc.) metamorphosed in green schist to amphibolites facies conditions. This Mary Kathleen deposit (1550 Ma), now depleted, is associated with skarns enriched in U-REE. Nevertheless, there are U occurrences with significant concentrations; also there are two prospectus uraniferous, Rita and Elaine Dorothy. This deposit type differs from the major world U deposits because of the paragenesis calc-silicates, garnetization phase and contact metasomatism. Thus, it is necessary physicochemical conditions imposed by granitic intrusions of intermediate and acid compositions upon impure limestone, as the case of Mary Kathleen Mine. In this study, we investigate the regional airborne radiometric and hyperspectral signatures associated with mineral vectors of uranium mineralization. In the first chapter, we compared two methods and techniques for handling and integration data to build predictive maps to support uranium mineral exploration. The maps compiled by the first technique were based on statistical analysis of the variables of position and variability. While the second method, based in Fuzzy Logic, compiled self-explanatory maps untried in mineral exploration for the commodity U. At this juncture, prospective areas with high potential were evidenced from the data integration of airborne gamma-ray. The second chapter, discuss the methods and techniques for hyperspectral remote sensing and digital image processing for airborne scanner HyMap image. The goal of this study was the analysis of hyperspectral signatures of calc-silicate paragenesis of Mary Kathleen Mine exposed by HyMap spectrum. Part of this mineral association consists of allanita, uraninite, andradite, epidote, hornblende, calcite and scapolite. Also, the spectra analysis revealed occurrence of minerals such as goethite, kaolinite and montmorillonite nearby mining an open pit mine. The maps on mineral abundance resulting from the methods of hyperspectral classification of Spectral Angle Mapper (SAM) e Mixture Tuned Matched Filtering (MTMF), after compile mineral abundance maps were combined in RGB color space. This strategy allowed enhancing areas of domain and mineral mix with great applicability to uranium mineral exploration.

Key words: Mineral Exploration , U-REE, Fuzzy Logic, Prospective Maps, Hyperspectral Remote Sensing, HyMap, Mary Kathleen Mine, Skarns.

Introdução

*Disse o poeta em palavras inspiradas:
“Há mais prazer em dar, do que há em receber (...)”*

At. 20:35

1.1. APRESENTAÇÃO

O urânio (U) é um dos mais importantes materiais energéticos. Atualmente seu uso está dividido em três segmentos capitais para a sociedade humana: na indústria energética, uma pequena porção na produção de isótopos medicamentosos e na indústria bélica. Aproximadamente 17% da matriz energética global é gerada por 440 reatores nucleares distribuídos por 30 países e 8% da energia elétrica consumida no mundo é de origem nuclear (EIA 2009). A energia gerada a partir do U requer o mínimo de “Pegada de Carbono” (Carbon Footprint). Assim, a substituição do carvão como fonte de energia elétrica pelo U é uma proposta para compensar a emissão de poluentes derivados deste segmento industrial, a fim de amenizar os problemas relativos ao aumento do consumo energético previsto para o futuro (Pacala e Scolow 2004). Para satisfazer as necessidades atuais e as previstas pela indústria uranífera, descobrir novos depósitos e desenvolver novas tecnologias, tanto para a prospecção como para o processamento, são questões críticas (Cuney e Kyser 2009).

Um importante pré-requisito para o uso em longo prazo da energia nuclear é o conhecimento geológico intrínseco aos atuais depósitos de U, para que este bem mineral possa ser explotado economicamente. Entretanto, a partir do final da década de 1970 até meados da década de 1990, os programas de prospecção mineral para a *commodity* U encontravam-se estagnados. A revista *Nature* alertou, de forma antecipada, a carência deste recurso em sua matéria “*Geologists warn of uranium shortage*” (Scott 1978). Como legado desta fase de limitada prospectividade uranífera, às futuras gerações de geólogos restou uma série de obstáculos relativos à pesquisa mineral deste metal, principalmente no que diz respeito à gênese, distribuição e forma de ocorrências (Herffnan 2007).

Hoje, este cenário mudou e a pesquisa mineral uranífera ocupa importante posição nos principais programas de pesquisa de recursos naturais e científicos no mundo. O exemplo deste progresso encontra-se documentado em Goldfarb (2008), Cuney e Kyser (2009) e Dahlkamp (2009).

Nesse contexto, elucidar a gênese dos depósitos uraníferos e encontrar novas ocorrências de viabilidade econômica tem sido desafio efetivo para muitos geólogos da área de prospecção mineral.

A integração de dados litoestruturais, litogeoquímicos e litogeofísicos por meio de métodos *knowledge-driven* (Bonham-Carter 1996) permitem discriminar, com grande eficiência, áreas

mineralizadas e estéreis, transcendendo muitas vezes os métodos geológicos tradicionais. Outro método destacado para a prospecção de depósitos metálicos, principalmente em ambientes áridos e semi-áridos, é o sensoriamento remoto hiperespectral (e.g, Crósta *et al.* 2003). Imagens hiperespectrais podem ser processadas no sentido de revelar a abundância, a variação química e a ordem estrutural (cristalinidade) de determinados minerais, os quais podem ser utilizados como importantes vetores para mineralizações de metais base e preciosos. Experiências pioneiras em prospecção mineral com sensoriamento remoto hiperespectral foram obtidas na Austrália com base em dados do *scanner* aerotransportado HyMap (Hyperspectral Mapper) (Bierwirth *et al.* 2002, Ellis & Scott 2004, Cudahy *et al.* 2005, 2008).

Com o propósito de buscar novas diretrizes metodológicas para a prospecção mineral, essa pesquisa visa avaliar e adaptar técnicas de processamento e integração de dados a fim de compilar mapas prospectivos e auto-explicativos, sugerindo novas fronteiras para a prospecção uranífera em um estudo de caso na área do Depósito Metamórfico-Hidrotermal de U-ETR *Mary Kathleen*, noroeste de *Queensland*, Austrália.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Dentre o objetivo geral acima exposto, os objetivos específicos e etapas de trabalho incluem: (i) análise das tendências quanto às distribuições estatísticas dos radioelementos eU, eTh e %K; (ii) comparação de duas técnicas de processamento quantitativo de dados, com o intuito de caracterizar assinaturas aeroradiométricas associadas a esta ocorrência; (iii) integração de mapas aeroradiométricos pela técnica *knowledge-driven* (Lógica *Fuzzy*); (iv) compilação de mapas de prospectividade para a pesquisa mineral nas proximidades da Mina de U-ETR *Mary Kathleen*; (v) caracterização das assinaturas hiperespectrais dos metalotectos vetores da mineralização da Mina de U-ETR *Mary Kathleen*; e (vi) realce de áreas portadoras de tais assinaturas por meio de técnicas de sensoriamento remoto hiperespectral

1.3. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo localiza-se na região do sinclinal *Mary Kathleen*, noroeste de *Queensland*, Austrália (**Figura 1**). É formada por terrenos Paleoproterozóicos da Província Metamórfica *Mount Isa*, onde os litotipos predominantes estão representados por rochas sedimentares (calcários, folhelhos e etc), rochas vulcânicas (riolitos, basaltos, dacitos e etc.) e subordinadamente por rochas granitóides (granodiorito, leucogranito porfirítico e etc.) metamorfasadas entre as fácies xisto-verde à anfibolito. A potencialidade mineral dessa região está registrada em diversas ocorrências de U, Cu e Au, além da Mina

de U-ETR *Mary Kathleen*, atualmente exaurida, e os prospectos uraníferos *Rita* e *Elaine Dorothy*. As cidades de *Mount Isa* e *Cloncurry* situam-se, respectivamente, a 55 km a W e a 62 km a L da mina são considerados importantes distritos mineiros da Austrália.

2. MATERIAIS

Para desenvolver esta pesquisa, os dados e programas de computação utilizados foram os seguintes: (i) base de dados aeroradiométricos composta por 2.483,485 milhões de pontos; (ii) aplicativos OASIS *Montaj* 7.1 para processamento dos dados aeroradiométricos, *Statistica* 7.0 para execução da análise exploratória dos canais eU, eTh e %K, MATLAB 7.0 para análise das variáveis de espalhamento *Fuzzy*, além da suíte de aplicativos composta pelo ArcMap e suas extensões *Spatial Analyst* (para análise quantitativa e integração de dados), *ArcTool Box* e *Spatial Data Modeller Tools* (**ArcSDM** – www.ige.unicamp.br/sdm) para compilar os modelos prospectivos; (iii) base hiperespectral com 10 linhas de vôo com direção NNE-SSW contendo imagens do *scanner* HyMap; (iv) aplicativo ENVI 4.6 para processamento digital de imagem e extração de assinaturas espectrais de interesse para a prospecção uranífera; e (v) Corel Draw para arte final de mapas, gráficos e figuras.

3. MÉTODOS E TÉCNICAS DE PESQUISA

A pesquisa foi iniciada com um minucioso resgate bibliográfico sobre as principais tipologias dos depósitos uraníferos, em especial *skarns* mineralizados em U-ETR. Esta coletânea permitiu um aprofundamento do conhecimento sobre as peculiaridades envolvidas na pesquisa desta *commodity* e o estabelecimento de diretrizes para sua prospecção a partir de métodos indiretos e dados adquiridos por sensores remotos hiperespectrais.

4. ESTRUTURA DE DISSERTAÇÃO

O documento aqui apresentado encontra-se segmentado no formato de dois artigos conforme Resolução 01/2008 aprovada pela Comissão de Pós-graduação do Programa Geociências da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).

4.1. ARTIGO 1: PROSPECÇÃO URANÍFERA: MODELAGEM GEOESTATÍSTICA E INTEGRAÇÃO DE ASSINATURAS AERORADIOMÉTRICAS COM BASE NO MODELO DE DEPÓSITO METAMÓRFICO-HIDROTHERMAL DE U-ETR MARY KATHLEEN, NW DE QUEENSLAND, AUSTRÁLIA

Este capítulo versa sobre dois métodos e técnicas de integração de dados. A estratégia para alcançar os objetivos foram : (i) interpolação dos canais eU, eTh e %K pelo algoritmo mínima curvatura e compilação de mapas com resolução espacial de 50 m; (ii) produção de razões e normalizações para realce dos radioelementos eU e %K, além da identificação de áreas potencialmente dominadas pelo elemento K; (iii) análise estatística quanto a distribuição dos conjunto de dados aeroradiométricos; (iv) integração dos limiares anômalos determinados pelas equações $\mu+\sigma$, $\mu+2*\sigma$ e $\mu+3*\sigma$ (Hawkes & Webb 1962) para o canal eU e mapas derivados para realce de U; (v) análise preliminar do modelo prospectivo, com a determinação do espalhamento *Fuzzy* mais coerente para cada radioelemento e para os mapas derivados; (vi) integração dos mapas evidenciais pelos operadores *Fuzzy OR*, *Fuzzy AND* e *Fuzzy PRODUCT*, objetivando definir áreas possivelmente enriquecidas em U e K; e (vii) compilação do mapa prospectivo final pelo operador *Fuzzy GAMMA*.

O uso do método de integração por Lógica *Fuzzy* aplicado à atividade de prospecção uranífera parece ser uma aproximação pioneira em diversos aspectos, além do que cumpre destacar que será a primeira pesquisa reportada na literatura sobre o uso desse método de análise e integração de dados para esta *commodity*.

4.2. ARTIGO 2: APLICAÇÕES DO SCANNER HIPERESPECTRAL HyMap COMO SUPORTE À PROSPECÇÃO URANÍFERA: ESTUDO DE CASO NA ÁREA DO DEPÓSITO METAMÓRFICO-HIDROTHERMAL DE U-ETR MARY KATHLEEN, NW QUEENSLAND, AUSTRÁLIA

Abordamos neste capítulo os métodos e técnicas de sensoriamento remoto hiperespectral. As imagens hiperespectrais do *scanner* HyMap foram processadas segundo uma série de procedimentos interconectados, visando extrair informações sobre a presença e abundância de minerais cálcio-silicáticos utilizados como vetores para a localização de áreas potenciais em U. Entre esses procedimentos, destacam-se: (i) geração de bibliotecas espectrais de referência, considerando as assinaturas espectrais das imagens do *scanner* HyMap e parte da mineralogia descrita na Mina de U-ETR *Mary Kathleen*; (ii) realce das assinaturas espectrais de minerais de interesse por meio do algoritmo *EFFORT Polishing*; (iii) aplicação do algoritmo *Reed-Xiaoli Detection* (RXD) para evidenciar áreas com estatística diferenciada do *background*, a fim de se obter alvos com potencial de análise espectral; (iv) segregação do sinal-ruído

na faixa espectral VNIR e SWIR2 pela função linear *Minimum Noise Fraction* (MNF); e (v) classificação hiperespectral pelas técnicas *Spectral Angle Mapper* (SAM) e *Mixture Tuned Matched Filtering* (MTMF).

5. CONCLUSÕES GERAIS

A integração dos dados aeroradiométricos de alta resolução permitiu compilar mapas de detalhe para a prospectividade uranífera regional. Por meio de ambos os métodos percorridos no Anexo 1, foi possível chegar a resultados bastante aceitáveis dentro do universo da pesquisa mineral.

O método proposto por Hawke & Webb (1962), onde se faz uso das equações $\mu+\sigma$, $\mu+2*\sigma$ e $\mu+3*\sigma$ para realçar possíveis anomalias se mostrou muito restritivo. Verificou-se que este conceito, quando aplicado apenas para um conjunto de dados (e.g. eU), não permitiu chegar a conclusões quanto a prospectividade da área em estudo, e também não foi possível definir quais anomalias eram mais representativas. Neste estudo foram utilizados em conjunto 5 mapas gamaespectrométricos para realce do elemento U, aumentando as chances de sucesso deste método ao definir áreas prospectivas.

A Lógica Fuzzy apresentou grande flexibilidade para os dados em questão. O sítio da Mina de U-ETR *Mary Kathleen* e outras 10 ocorrências de U correlacionaram-se ao mapa rotulado de Urânio Anômalo. Quanto ao mapa de prospectividade final, compilado pelo operador *Fuzzy Gamma* ($\gamma=0.5$), 17 ocorrências de urânio correlacionaram-se aos valores de maior pertinência. Este fato conferiu credibilidade ao modelo possibilístico, que se mostrou matematicamente consistente. Quanto ao mapa de Potássio Anômalo, novos esforços devem ser feitos para compilar um mapa mais restritivo.

O Anexo 2 discorre sobre os métodos e técnicas de mapeamento indireto por sensoriamento remoto hiperespectral. Para desenvolver esta etapa de trabalho foi utilizada parte de uma cena do *scanner* aerotransportado HyMap com a Mina *Mary Kathleen*. Observou-se que a reunião dos atributos físicos deste sistema sensor, como as altas resoluções espacial e espectral, conferiram ao HyMap grande aplicabilidade na atividade de prospecção mineral. Este fato viabilizou o realce de áreas com abundância de minerais cálcio-silicáticos como a andradita, epidoto e hornblenda, ainda não experimentado por outros sensores convencionais. Os resultados obtidos pelos algoritmos de realce se mostraram eficazes no estudo das feições de absorção de todos os minerais vetores da mineralização uranífera. Os métodos de classificação hiperespectral *Spectral Angle Mapper* (SAM) e *Mixture Tuned Matched Filtering* (MTMF) resultaram em imagens de abundância dos minerais andradita, epidoto, hornblenda, calcita, escapolita, goethita, caulinita e montmorillonita. A adição destas imagens no espaço de cores RGB deu maior transparência quanto a relação das paragêneses minerais na frente de lavra e nas proximidades da Mina *Mary Kathleen*.

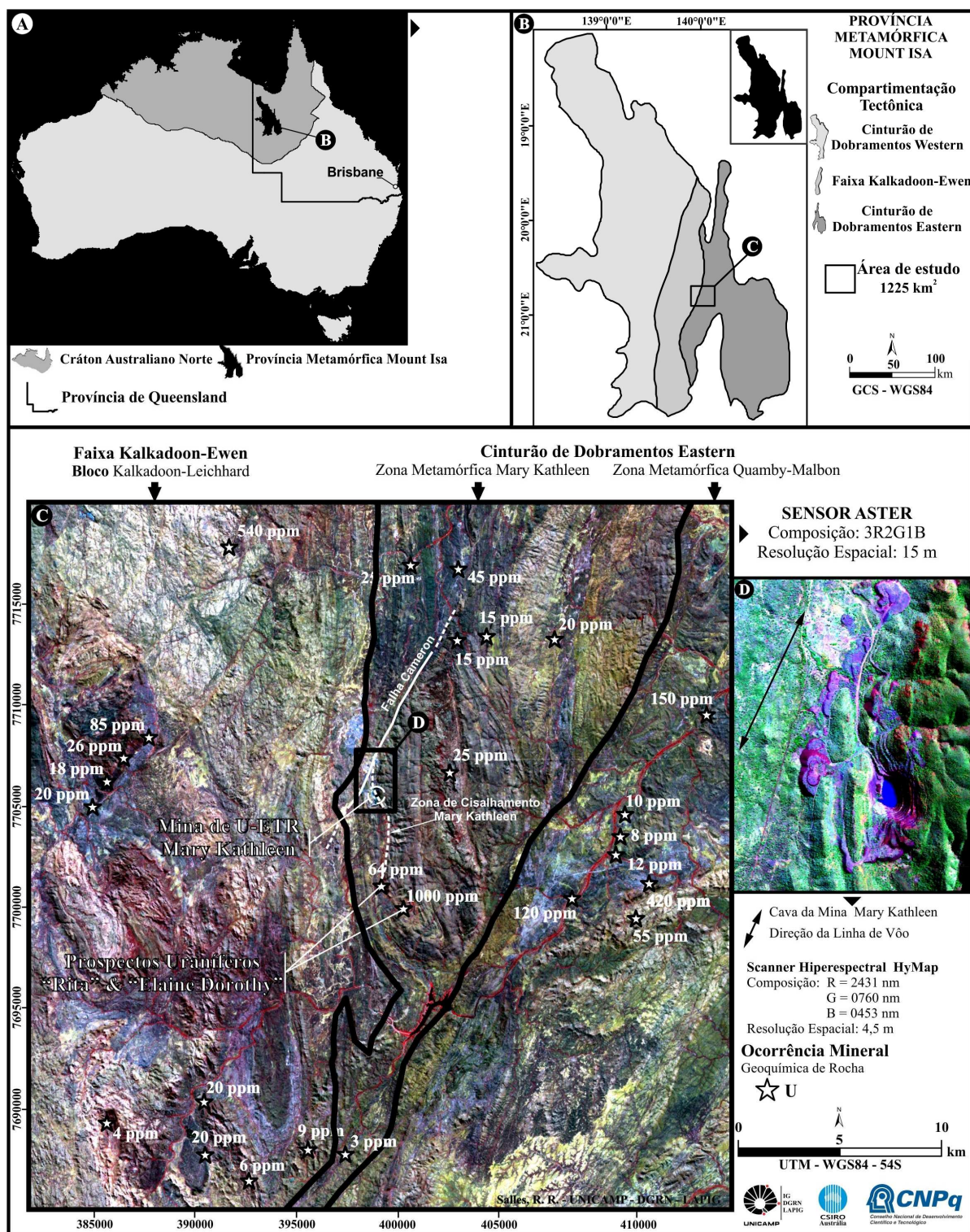


Figura 1. Contexto tectônico regional. **(B)** Compartimentação morfotectônica da Província Metamórfica Mount Isa (Sayab 2006). **(C)** Área de estudo representada por composição colorida falsa-cor das bandas 321 (RGB) do sensor orbital ASTER (resolução espacial = 15m). **(D)** Área do *pit* da Mina de U-ETR Mary Kathleen ilustrada em composição colorida falsa-cor de bandas (2431nm, 760nm, 453nm) (RGB) do sensor aeroportado HyMap.

Referências Bibliográficas

- Bonham-Carter, G. F. 1996. **Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS**. Ontario: Pergamon, 1st. ed., 391 p.
- Bierwirth, P. ; Huston, D. ; Blewett, R. 2002. Hyperspectral Mapping of Mineral Assemblages Associated with Gold Mineralization in the Central Pilbara, Western Australia. **Economic Geology**, v. 97:819 – 826.
- Cudahy, T. ; Caccetta, M. ; Cornlius, A. ; Hewson, R. ; Wells, M. ; Skwarnecki, M. ; Halley, S. ; Hausknecht, P. 2005. **Mapping Regolith and Alteration Mineral Physicochemistries using Airborne Hyperspectral Data**. <https://www.appliedgeochemists.org/events/iges2005/presentations/19CudahyTom.pdf>. Acesso em: 11/2009. 2 PM.
- Cudahy, T. ; Jones, M. ; Thomas, M. ; Laukamp, C. ; Caccetta, M. ; Hewson, R. ; Rodger, A. ; Verrall, M. 2008. **Next Generation Mineral Mapping: Queensland Airborne HyMap and Satellite ASTER Surveys 2006-2008**. CSIRO Exploration & Mining Report P2007 / 364. <http://www.em.csiro.au/NGMM/QueenslandHyperspectralMineralMappingFinalReport.pdf>. Acesso: 11/2009. 5 PM
- Cuney, M. ; Kyser, K. 2009. **Recent and not-so-recent developments in uranium deposits and implications for exploration**. Short Course Series, v.39. Quebec: Mineralogical Association of Canada, 257 p. IGES.
- CRÓSTA, A. P. ; SOUZA FILHO, C. R. ; DUCART, D. F. ; BARRETO NETO, A. A; BRODIE, C. 2003. **Alteration mapping for gold in Patagonia, Argentina, using ASTER imagery**. In: ASPRS Annual Conference, 2003, Anchorage, Alaska. Proceedings of the ASPRS Annual Conference. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, p. 1-10.
- Dahlkamp, F. J. 2009. **Uranium Deposits of the world**. Verlag Berlin Heidelberg: Springer, 508 p.
- Ellis, J. R. ; Scott, W. P. 2004. Evaluation of hyperspectral remote sensing as a means of environmental monitoring in the St. Austell China clay (kaolin) region, Cornwall, UK. **Remote Sensing of Environment**, v.93:118 – 130.

- Energy Information Administration (EIA). 2009. International Energy Outlook. Department of Energy, Washington, D.C., Chapter 5. <www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/index.html>. Acesso em: 09/2009, 18h.
- Goldfarb, R. J. 2008. Uranium: A Compilation 1905-2007. **Economic Geology**, CD-ROM.
- Hawkes, E. H. ; Webb, J. S. 1962. Geochemistry in Mineral Exploration. London: Academic Press, 1st. ed., p. 30.
- Herffnan, V. 2007. Uranium Exploration: A Guide for the Uninitiated. **Geosoft Earth Explorer**, Annual 2007, pp. 12-13, <www.earthexplorer.com>. Acesso em: 01/2008, 10h.
- Cunery, M. ; Kyser, K. 2008. **Recent and not-so-recent developments in uranium deposits and implications for exploration**. v. 39. Quebec: Mineralogical Association of Canada, Short Course Series, 257 p.
- Scott, P. 1978. Geologists warn of uranium shortage. **Nature**, v. 274, p. 524.
- Sayab, M. 2006. Decompression through clockwise P–T path: implications for early N–S shortening orogenesis in the Mesoproterozoic Mt Isa Inlier (NE Australia). **J. Metamorphic Geol**, 24: 89–105
- Pacala, S. ; Scolow, R. 2004. Stabilization Wedges: Solving the climate problem for the next 50 years with current technologies. **Science**, v.305, p. 968-972.

**PROSPECÇÃO URANÍFERA: MODELAGEM GEOESTATÍSTICA E INTEGRAÇÃO
DE ASSINATURAS AERORADIOMÉTRICAS COM BASE NO MODELO DE
DEPÓSITO
METAMÓRFICO-HIDROTHERMAL DE U-ETR MARY KATHLEEN, NW DE
QUEENSLAND, AUSTRÁLIA**

Rodrigo dos Reis Salles^{1,2}, Carlos Roberto de Souza Filho², Thomas Cudahy³

¹AngloGold Ashanti Córrego do Sítio S.A. – Nova Lima, MG, Brasil
Gerência de Projetos e Crescimento – Projetos Step Change
sallesgeologia@yahoo.com.br ; rrsalles@anglogoldashanti.com.br

² Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP/IG
Caixa Postal 6152 – 13083-970 – Campinas-SP, Brasil
beto@ige.unicamp.br

³ Mineral Mapping Technology Group
CSIRO Division of Exploration and Mining
thomas.cudahy@csiro.au

RESUMO

Com o incremento de ferramentas para a manipulação e a integração de dados geológicos, geofísicos, geoquímicos dentre outros dados, os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) fornecem excelentes recursos para a geração de mapas regionais de prospecção mineral. Os modelos prospectivos constituem uma visão sintética da geologia local, mas são altamente elucidativos para a pesquisa mineral uranífera e podem ser erigidos das seguintes abordagens: (i) as empíricas, onde são consideradas as particularidades derivadas do conhecimento científico-geológico intrínseco ao modelo de depósito procurado; e (ii) as conceituais, onde o modelo prospectivo é sintetizado a partir de análises numéricas, e onde o conhecimento geológico é limitado por um ou diversos fatores, ou ainda encontra-se em processo de aquisição. Ambas as abordagens auxiliam a percepção das diferenças entre áreas mineralizadas e estéreis. Neste sentido, este trabalho descreve e compara os modelos conceituais de integração de dados gamaespectrométricos com base na Geoestatística Descritiva e na Lógica *Fuzzy*, com o intuito de caracterizar áreas com assinaturas radiométricas típicas de áreas de interesse prospectivo. A integração desses conjuntos de dados está fundamentada nas análises das variáveis estatísticas de posição e variabilidade e na teoria da Lógica *Fuzzy*. A área de estudo, localizada a noroeste de *Queensland*, é formada por terrenos Paleoproterozóicos da Província Metamórfica *Mount Isa*. Os litotipos predominantes nessa província estão representados por rochas graníticas, vulcânicas e sedimentares metamorfisadas na transição termodinâmica da fácies xisto-verde a anfibolito superior. O mineral de minério uraninita ocorre associado aos *skarns* alterados por intensa granatização e escapolitização. O potencial prospectivo da área está registrado nas ocorrências minerais de U, Cu e Au, além da Mina de U-ETR *Mary Kathleen*, atualmente exaurida. Para delimitar novas áreas de prospectividade aplicaram-se duas técnicas. A primeira abordagem geoestatística, levou-se em consideração os valores anômalos definidos pelas equações $\mu + \sigma$, $\mu + 2\sigma$ e $\mu + 3\sigma$ para os canais eU e eTh, além dos mapas eU/eTh, Ud e F_U derivados para realçar áreas anômalas em U. Alvos prospectivos foram definidos pelo operador Booleano *AND*. Os limiares definidos pelas equações $\mu + \sigma$, $\mu + 2\sigma$ e $\mu + 3\sigma$ mostraram que as respectivas áreas 772.4 km² (63%), 1087 km² (89%) e 1162 km² (95%) apresentam baixa prospectividade. Na segunda abordagem, baseada nos conceitos da Lógica *Fuzzy*, os mapas aeroradiométricos foram divididos em dois conjuntos, Suíte de Urânio e Suíte de Potássio, visto a falta de informação quanto à associação do U a estilos de alteração hidrotermal dominados pelo elemento K. Os dados foram normalizados pelas funções *Fuzzy Small* e *Fuzzy Large* e, em seguida, compilados na forma de mapas evidenciais pelos operadores *Fuzzy AND* e *Fuzzy OR*. Para minimizar as altas respostas gamaespectrométricas, tais os mapas evidenciais foram integrados pelo operador *Fuzzy PRODUCT*. O mapa de prospectividade para a tipologia de depósito de U-ETR *Mary Kathleen* foi compilado a partir da integração das duas suítes pelo operador *Fuzzy Gamma* ($\gamma=0.5$). Com a Lógica *Fuzzy* foi possível decompor a área de estudo em quatro categorias prospectivas que corresponde às classes baixa, média, alta e altíssima. Assim, este estudo traduz o panorama prospectiva da área de estudo com mapas alto explicativos, além de exemplificar a eficácia da Lógica *Fuzzy* para a pesquisa da commodity U. Também, não desconsidera a abordagem tradicional, baseada na análise Geoestatística Descritiva. Trabalhos futuros, como a adição de novos planos de informação e análises comparativas entre outras áreas, ajudarão a estabelecer orientações para a construção de modelos preditivos que maximizem a inferência prospectiva para esta tipologia de depósito.

Palavras chaves: Urânio, prospecção mineral, *skarns*, aerogamaespectrometria, lógica *Fuzzy*, integração de dados, *Mary Kathleen*, Austrália

ABSTRACT

With the enhancement of tools for manipulation and integration of geological, geophysical and geochemical data, Geographic Information Systems (GIS) have provided increasingly resources for the generation of regional maps for mineral exploration. Prospective models comprise a synthetic vision of local geology and significant insights into the field of uranium exploration. Two approaches have conventionally been adopted: (i) an empirical approach, where the particular knowledge derived from scientific and geological data that is intrinsic to a given deposit; and (ii) a conceptual approach, where the prospective model synthesized from statistical analysis and geological knowledge is insufficient or limited by several factors or is in the acquisition stage. Both approaches help to detect the differences between barren and mineralized areas, but the first is a particularly powerful technique for this purpose. In this sense, this work describes and compares two conceptual models based on Geostatistics and Fuzzy Logic. This goal is to characterize areas with radiometrics signatures typical of mineralized areas with U. This application will use radiometrics maps of eU, eTh and %K channel, as well as ratio, normalized and index anomalous maps. The study area is located in northwest of Queensland, Australia. The geology is formed by Paleoproterozoics rocks of Mount Isa Metamorphic Province. The predominant lithotypes in this area are represented by granitics, volcanic and sedimentary rocks metamorphosed at green-schist to amphibolite facies. At Mary Kathleen Mine, uraninite ore occurs in association with mineral parageneses allanite+andradite+uraninite skarns. Also occurred intense garnetization and scapolitization. The potential for prospecting uranium in the Mary Kathleen area is based in the mineral occurrences of U, Cu and Au, besides the Mary Kathleen U-REE Mine, which is currently depleted. Considering the Geostatistical approach, prospective mapping was based on anomalous values defined by equations $\mu+\sigma$, $\mu+2\sigma$ and $\mu+3\sigma$ for eU and eTh channels, as well as eU/eTh, U_d and F_U maps besides products yielded for U enhancement. High priority areas for mineral prospecting were extracted by data integration through Boolean operator AND. The thresholds defined by the equation $\mu+\sigma$, $\mu+2*\sigma$ e $\mu+3*\sigma$ shown that the respectively area 772.4 km² (63%), 1087 km² (89%) e 1162 km² (95%) have low prospectivity. For the Fuzzy modeling, gamma ray datasets were divided into Uranium and Potassium Suites, because were not found information about the association between anomalous concentration of U and hydrothermal alteration marked by anomalous concentration of K. The data was first normalized by the Large and Small fuzzy functions and preliminary evidential maps compiled using Fuzzy AND and Fuzzy OR operators in Matlab and ArcSDM module into ArcGIS software. In order to restrict the high gamma-ray responses, Fuzzy PRODUCT operators further integrated the evidential maps. All the evidential maps were finally combined using the Fuzzy GAMMA operator ($\gamma=0.5$) yielding a regional prospectivity map for the Mary Kathleen deposit type. With the Fuzzy Logic technique areas highlighted in the modeling were divided into four categories of mineral prospectivity: low, middle, high, highest. This study shows the panorama of the prospective study area with self-explanatory maps. This study shows the panorama of the prospective study area with self-explanatory maps. This pilot study illustrates the effectiveness of Fuzzy logic for uranium exploration, but does neglect the positive results also brought out by the geostatistical approach. Future work, comprising additional evidential data and comparative analysis with other mineralized areas, will help establishing guidelines for the construction of regional prospective models that maximize the inference for U deposits with similar characteristic to Mary Kathleen.

Key words: Uranium, mineral prospectivity, skarns, airborne gamma-rays, Fuzzy logic, data integration, Mary Kathleen, Austrália.

1. INTRODUÇÃO

Nos anos mais recentes, a prospecção mineral tem experimentado um desenvolvimento exponencial de métodos e técnicas qualitativas e quantitativas para processamento de dados geoquímicos, geofísicos e de sensoriamento remoto, combinados a uma série de técnicas para a integração de dados. Neste contexto, o uso de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), em especial o programa ArcGIS® e a sua extensão ArcSDM (Sawatzky *et al.* 2007, SDM 2010), se destacam como veículo de desenvolvimento e modelagem de mapas preditivos, que suportem tomadas de decisões na prospecção mineral (D’Ercole *et al.* 2000, Jianping *et al.* 2005). Para isso, faz-se necessário recorrer à: (i) abordagens conceituais, que requerem conhecimentos sólidos de modelos de depósitos para aplicá-los ao modelo pesquisado; (ii) abordagens empíricas, onde é considerada a relação espacial entre mapas e feições metalogenéticas (e.g. depósitos minerais) conhecidas, com o objetivo de selecionar as técnicas cabíveis para tal modelagem; e (iii) a integração dessas abordagens, a fim de evidenciar, caso existam, áreas favoráveis à pesquisa desses recursos naturais (Bonham-Carter 1996, Harris *et al.* 2001, Knox-Robinson 2000). A correlação de metalotectos, como anomalias geofísicas e geoquímicas, registros de diferentes estilos de alteração hidrotermal, bem como litoestruturas particulares, permite a definição de áreas com prospectividade mineral. Para isso, modelos estatísticos quantitativos de prospecção geoquímica têm sido intensamente usados como apoio à pesquisa mineral desde a década de 1940.

No início da década de 1960, alguns autores propuseram novas sistemáticas para a manipulação de dados geoquímicos no âmbito da prospecção mineral (Hawkes & Webb 1962; Rose *et al.* 1979). Muitas dessas técnicas são aplicadas até os dias atuais.

A partir da década de 1980, houve um aumento significativo no desenvolvimento dos algoritmos e programas de análise espacial, em especial os voltados para pesquisa mineral com os SIG. Alguns fatores estão intrinsecamente ligados a este aumento, como por exemplo: (i) a prosperidade da pesquisa mineral, que alavancou o mercado de geotecnologias (software e hardware); (ii) o aumento da demanda em integrar uma grande quantidade de dados multifonte; e (iii) a necessidade de agilidade para compilar e interpretar dados com maior acurácia, num curto período de tempo. Neste âmbito, destacam-se na comunidade geológica, as técnicas de análise espacial para a construção de modelos preditivos conhecidos como *knowledge-driven*, que incluem os modelos de Lógica Booleana, Lógica Fuzzy e Lógica Dempster-Shafer (Bonham-Carter 1996).

Carranza (2009), com base na interpretação da palavra “modelo” pelo *The Glossary of Geology* (America Geological Institute 2007), define modelos preditivos como uma “compilação de descrições, representações ou previsões sobre observações indiretas e complexas do mundo real via análise

quantitativa de dados relevantes”. Para tanto, as ferramentas ArcSDM e *Spatial Analyst*, que constituem extensões do programa ArcGIS permitirão cumprir os objetivos comentados a seguir.

A essência desta pesquisa consiste em: (i) analisar as características estatísticas dos canais eU, eTh e %K fim de determinar pertinências coerentes para a modelagem *knowledge-driven*; (ii) comparar aplicações derivadas de dois métodos quantitativos de manipulação de dados geoquímicos no universo dos dados aeroradiométricos — o primeiro método usa como critério as variáveis estatísticas de posição (média) e de variabilidade (desvio padrão) (Hawkes & Webb 1962); o segundo método integra dados baseados nos conceitos da Lógica Fuzzy (*knowledge-driven*) (Bonham-Carter 1996); (iii) integrar e compilar mapas de uma única fonte, de forma a simular o ambiente real de exploração mineral em diversos países, onde bases de dados são escassas; (iv) descrever a integração e a análise de dados aeroradiométricos por meio dos critérios abordados no item (i e ii); (v) discutir os resultados destas abordagens como estratégia inicial para a atividade de prospecção mineral; e (vi) compilar mapas que priorizem áreas para expedição de campo e pesquisa mineral de detalhe.

O modelo conceitual de depósito utilizado nesta pesquisa será o Depósito Metamórfico-Hidrotermal de U-ETR *Mary Kathleen* (Matheson & Searl 1956, Oliver *et al.* 1999) localizado à noroeste de *Queensland*, Austrália. Neste depósito ocorrem *skarns* mineralizados em U-ETR. A restrição geológica de *skarns* enriquecidos em U-ETR, a alta qualidade dos dados aeroradiométricos disponíveis para uso no projeto e a escassez deste tipo de aplicação com foco na pesquisa uranífera situam o estudo na fronteira das aplicações das geotecnologias à geologia.

2. CENÁRIO ATUAL DA EXPLORAÇÃO URANÍFERA

A partir da década de 1970, após o declínio na taxa de crescimento econômico mundial, e conseqüente escassez de investimentos, os programas de exploração de várias *commodities* minerais ficaram estagnados até meados da década de 1990 (Figura 1). Hoje, a pesquisa mineral, em especial a uranífera, ocupa importante posição nos principais programas exploratórios de recursos naturais no mundo. Como legado desta fase, às futuras gerações de geólogos restou uma série de obstáculos relativos à exploração de U, principalmente no que diz respeito ao entendimento da gênese, distribuição e forma dessas ocorrências (Heffernan 2007). Portanto, elucidar a gênese dos depósitos de U e encontrar novas ocorrências de viabilidade econômica tem sido desafio efetivo para muitos geólogos exploracionistas. Aliados a esta difícil tarefa, além da geologia clássica, é preciso um domínio maior dos novos métodos e técnicas de integração de dados litoestruturais, litogeoquímicos e geofísicos, que permitem discriminar áreas mineralizadas e estéreis.

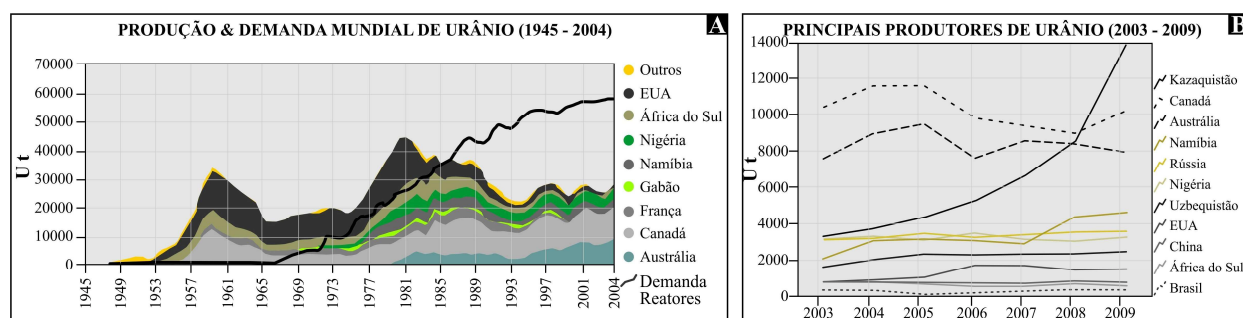


Figura 1. (A) A partir de 2003, com a ascensão do preço do U no mercado internacional, a retomada de antigos projetos e a descobertas de novas jazidas contribuíram para o aumento da produção uranífera. Ainda assim, há um estrangulamento entre a oferta e a demanda dessa commodity. A *World Nuclear Association* (WNA) estima que em 2015 a demanda seja de aproximadamente 77000 t, ampliando a necessidade de novas descobertas. **(B)** O Cazaquistão atualmente é o maior produtor mundial de U (27%), acompanhado pelo Canadá (20%) e Austrália (16%) (Modificado de: WNA 2010).

3. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo compreende 1225 km² e está inserida em uma das regiões mais prospectivas do mundo, a Província Metamórfica *Mount Isa* (PMMI), a noroeste de *Queensland*, Austrália (**Figura 2**). As cidades de *Mount Isa* e *Cloncurry* são alguns dos importantes distritos mineiros da Austrália localizados na PMMI.

O potencial prospectivo da PMMI está representado por inúmeras ocorrências de U, Au e Cu (**Ford & Blenkinsop 2008a**). O depósito de U-ETR *Mary Kathleen* (**Matheson & Searl 1956**), atualmente exaurido, é o principal referencial para a pesquisa uranífera na região. Com o advento de novas tecnologias e o aumento de preço da commodity U no mercado internacional, houve a retomada da pesquisa mineral de antigos projetos uraníferos nesta região da Austrália, que foi alvo de extensivo levantamento aerogamaespectrométrico de alta densidade e sensoriamento remoto hiperespectral.

A precipitação pluviométrica da região de *Mary Kathleen* possui média anual inferior a 50 mm. A média das temperaturas dos meses mais quentes é superior a 30°C e a dos meses mais frios é de aproximadamente 15°C (**BOM 2009**). Segundo a referência mundial para classificação climática *Köppen-Geiger*, o depósito de U-ETR *Mary Kathleen* está localizado numa região com clima predominantemente árido e quente, com vegetação do tipo estepes. Estas características climáticas favorecem o mapeamento geológico e prospectivo fundamentado em dados derivados de métodos indiretos.

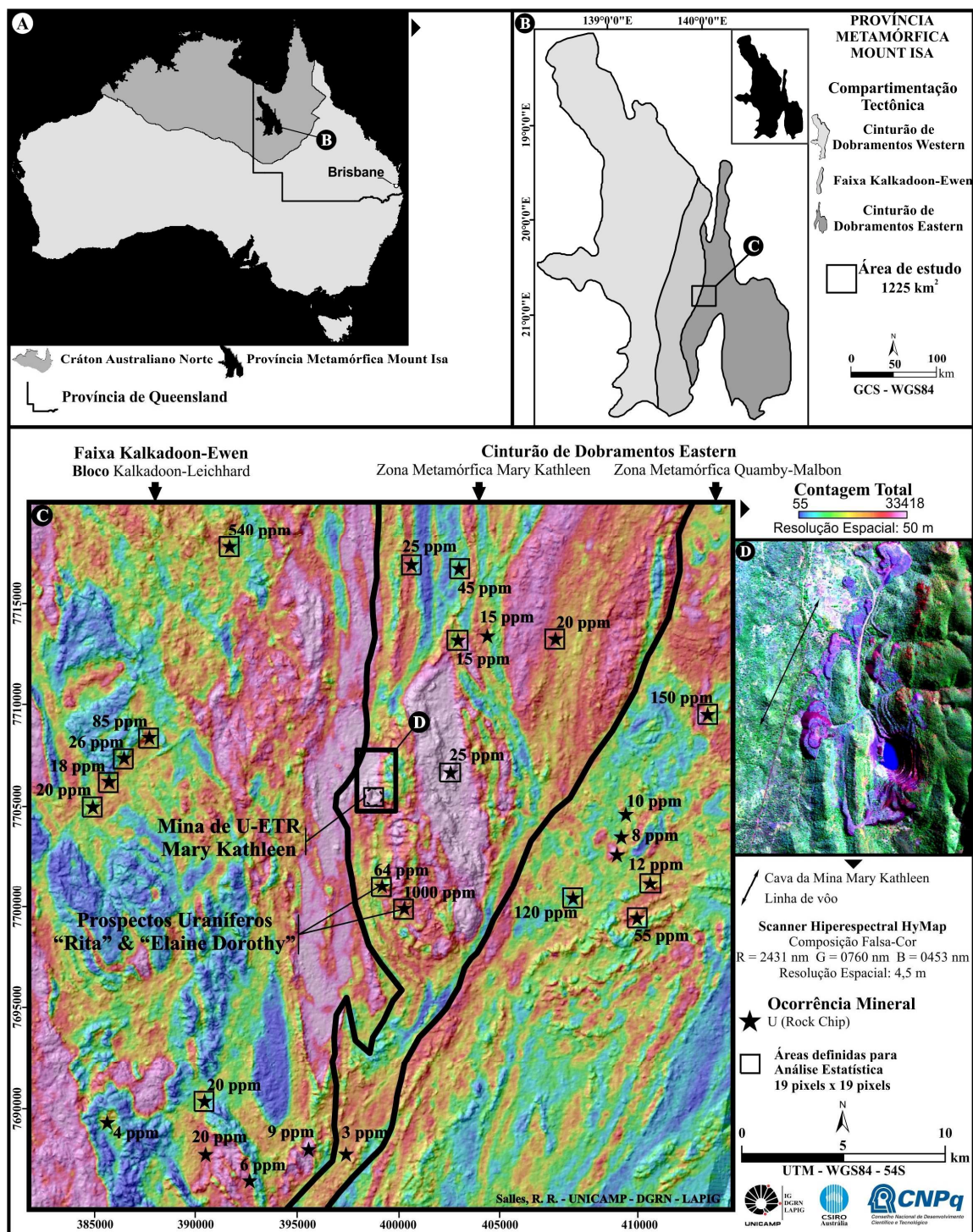


Figura 2. (A) Contexto tectônico regional. (B) Compartimentação tectônica da porção sul da Província Metamórfica Mount Isa (Modificado de: Sayab 2006). (C) Mapa aerogamaespectrométrico de Contagem Total sobreposto ao Modelo Digital de Elevação do sensor ASTER. Na área de estudo, as Faixas Kalkadoon-Ewen e Eastern estão compartimentadas nas respectivas subunidades morfotectônicas Bloco Kalkadoon-Leichhard, Zonas Metamórficas Mary Kathleen e Quamby-Malbom. (D) Pit do Depósito de U-ETR Mary Kathleen.

4. CONTEXTO GEOLÓGICO

A Província Metamórfica *Mount Isa* (PMMI), de todas as demais da plataforma australiana, expõe extensas áreas de embasamento, onde há registros de uma complexa e periódica história de sedimentação, magmatismo, tectonismo, metamorfismo, metassomatismo regional, mineralizações e fluxo de fluidos (Betts *et al.* 2006, Sayab 2006, 2008).

Durante 600 milhões de anos, dois grandes eventos orogênicos se destacaram quanto à evolução tectônica de *Mount Isa*. Neste contexto, o embasamento é constituído por rochas supracrustais metamorfisadas e feições tectônicas atribuídas ao Evento Orogênico *Barramundi* (1900-1870 Ma). Este evento foi associado a volumosas e extensivas atividades magmáticas félsicas, caracterizadas por posicionamento de granitos do tipo-I. O Evento denominado Orogenia *Isan* (1610-1500 Ma) originou os principais padrões de deformação e metamorfismo, além de notável sincronismo das mineralizações em *Mount Isa*, em especial as uraníferas. Durante este último evento, rochas granitóides, vulcânicas e sedimentares foram deformadas e metamorfisadas na transição termodinâmica das fácies xisto-verde inferior à anfibolito superior (Betts *et al.* 2006, Betts & Goleby 2006, Blenkinsop *et al.* 2007, McLellan & Oliver 2007, Ford & Blenkinsop 2008b). Entre 1860 a 1490 Ma, diversos corpos de rochas granitóides intrudiram a PMMI. A maioria destas intrusões são formadas por granitos do tipo-I e subordinadamente por granitos do tipo-S (Budd *et al.* 2001).

Mount Isa possui uma longa história de exploração mineral e hospeda depósitos de metais preciosos e metais-base de classe mundial, com destaque para depósitos de Cu, Au, Ag-Pb-Zn, *Iron Oxide Copper Gold* (IOCG), além de depósitos de U (Betts *et al.* 2006, Betts & Goleby 2006, Austin & Blenkinsop 2008, Ford & Blenkinsop 2008b), o que faz jus ao *status* de Província Mineral.

Fatores determinantes na gênese dos depósitos minerais na PMMI (Tabela 1), na maioria das vezes, estão associados a (i) episódios de extensiva alteração Na-Ca durante os intervalos 1750-1730 Ma, 1670-1610 Ma, 1610-1500 Ma e pós-1500 Ma, (ii) encurtamento crustal e posicionamento dos granitos *Williams-Naraku* por volta de 1530 Ma durante o Evento *Isan* (1610-1500 Ma), e (iii) fluxo de fluidos hipersalinos com temperaturas compreendidas entre 300-650°C (Mark & Foster 2000, Betts *et al.* 2006, Oliver *et al.* 2008, Marshall & Oliver 2008).

Tabela 1. Síntese dos principais eventos magmáticos e metamórficos na Província Metamórfica *Mount Isa*.

	Período / Evento	Hidrotermalismo	Características	Ocorrências	Referências
Eventos Metamórficos – Hidrotermais	Pós – 1490 Ma	Mistura de fluidos baciais hipersalinos e água meteórica com temperatura inferior a 300°C	Controle estrutural e resfriamento crustal		Betts & Giles, 2006, Betts <i>et al.</i> 2006
	Posicionamento dos Batólitos <i>Williams e Naraku</i> ~1550 – 1500 Ma Orogenia Isan 1610 – 1500 Ma	Intensa alteração Na-Ca (300 – 500°C), escapolitização, albitização	Remobilização do U (1550 Ma, U-Pb e Sm-Nd) e consequente mineralização dos <i>skarns</i> (1750- 1730 Ma), Cu–Au e <i>IOCG</i> . Tectônica caracterizada por encurtamento crustal (E-W). Intrusões de composição máfica e intermediária. Vulcanismo bimodal, múltiplos estágios de deformação, brechação	Depósitos do tipo <i>IOCG</i> ocorrem no Cinturão de Dobramentos <i>Eastern</i> . <i>Skarns</i> mineralizados em U-ETR ocorrem na Zona Metamórfica <i>Mary Kathleen</i> (item 4.3)	Page 1983, Maas <i>et al.</i> 1987, Oliver 1999, Spikings <i>et al.</i> 2001, Sayab & Rubenach 2004, Betts <i>et al.</i> 2006, Sayab 2006, 2008, Oliver <i>et al.</i> 2008
	1670 – 1610 Ma	Fluídos hipersalinos com temperaturas baixas a moderadas (<300°C)	Gêneses de importantes depósitos de metais-base (Zn-Pb-Ag) e metais preciosos.		Betts <i>et al.</i> 2006
Eventos Mágmatícos – Hidrotermais	Evento Extensional <i>Wonga</i> 1750 – 1730 Ma	Metamorfismo+ Hidrotermalismo Altas temperaturas, escapolitização, albitização e gênese de <i>skarns</i>	Controle estrutural, intrusões de rochas granitóides e posicionamento do Batólito <i>Wonga</i>	Gênese de <i>skarns</i> (Zona Metamórfica <i>Mary Kathleen</i>), rocha encaixante: calcário da Formação <i>Corella</i>	Maas <i>et al.</i> 1987, Oliver 1999, Betts <i>et al.</i> 2006, Giles <i>et al.</i> 2006, Pirajno & Bagas 2008
	Orogenia Barramundi (~1900 – 1850 Ma)	Metamorfismo Fácies Xisto-verde a Anfibólito superior	Poucas evidências geológicas, rochas supracrustais, tonalitos, granodioritos (1875 – 1850 Ma) contemporâneos às rochas vulcânicas félsicas da unidade <i>Leichhardt</i>		Betts <i>et al.</i> 2006, Ford & Blenkinsop 2008

A PMMI, em sua maior parte, é compreendida por três domínios tectono-metamórficos segundo orientação N-S. Seus limites são marcados por zonas de falhas transcorrentes, que compreendem, de oeste para leste, o Cinturão de Dobramentos *Western* (CDW), a Faixa *Kalkadoon-Ewen* (FKE) e o Cinturão de Dobramentos *Eastern* (CDE) (Betts *et al.* 1998, Duncan *et al.* 2006, McLellan & Oliver 2007). *Mount Isa* preserva extensas áreas com assinaturas dos episódios termais responsáveis por sua edificação. Entretanto, os mais expressivos sistemas de alteração são correlatos às rochas cálcio-silicatadas do Cinturão de Dobramentos *Eastern* (Betts *et al.* 2006).

Muito comum nas principais publicações que abordam como tema a evolução tectônica de *Mount Isa*, as nomenclaturas *Western Succession* e *Eastern Succession* não são sinônimos de Cinturão de Dobramentos *Eastern* e Cinturão de Dobramentos *Western*, respectivamente. Assim, a diferença entre *Western Succession* e *Eastern Succession* é puramente litoestratigráfica (Ford & Blenkinsop 2008b). Neste contexto, a *Western Succession* inclui as unidades estratigráficas relativas ao Cinturão de Dobramentos *Western* e Faixa *Kalkadoon-Leichhardt*, enquanto a *Eastern Succession* inclui as unidades relativas ao Cinturão de Dobramentos *Eastern*. Jackson *et al.* (2000) abordam em detalhes parte da estratigrafia de *Mount Isa*.

Os litotipos Proterozóicos aflorantes estão subdivididos em três grandes seqüências estratigráficas designadas: Sequência 1, Sequência 2 e Sequência 3. A Sequência 1 (pré-1800 Ma) consiste principalmente de vulcânicas félsicas associadas a granitos, geralmente restritos a FKE. As Sequências 2 (1800-1740 Ma) e 3 (1700-1590 Ma) ocorrem em CDW e CDE. A Sequência 2 é representada por sedimentos e vulcanismo bimodal. Estes litotipos estão geralmente ausentes no FKE. Na Sequência 3 (1700-1590 Ma) ocorrem rochas sedimentares de granulometria fina a média e vulcânicas subordinadas características de sistema de rifte intracontinental.

Neste contexto geológico, a área de estudo está delimitada pelos terrenos formadores dos domínios FKE e CDE, representados, respectivamente, pelas subdivisões morfotectônicas, Bloco *Kalkadoon-Leichhardt*, Zonas Metamórficas *Mary Kathleen* e *Quamby-Malbon*. Não foram encontradas referências bibliográficas que abordassem a geologia de *Quamby-Malbon*.

4.2. BLOCO KALKADOON-LEICHHARDT

O Bloco *Kalkadoon-Leichhardt* é delimitado a oeste e leste pelos sistemas de falhas *Quilalar* e *Pilgrime*, respectivamente, e engloba as rochas mais antigas de *Mount Isa*. Segundo McDonald *et al.* (1997), a evolução crustal desta bloco teve início entre 2900-3000 Ma. Unidades paleoproterozóicas constituídas por litotipos supracrustais reliquiares ocorrem preservadas e incluem vulcânicas máficas e

félsicas intrudidas por corpos granodioríticos. Estas rochas foram posteriormente metamorfisadas em condições de alta temperatura e baixa pressão (<5 kbar) entre as fácies anfibolito e granulito durante a Orogenia *Barramundi* (1900-1850 Ma). A estas se somam quartzo micaxistos, quartzitos, migmatitos e rochas cálcio-silicáticas (McDonald *et al.* 1997). A base da seção estratigráfica (Sequência 1) é dominada pelos batólitos *Kalkadoon* e *Ewen* (1870-1850 Ma) (McDonald *et al.* 1997, Spikings *et al.* 2001, Oliver *et al.* 2008, Ford & Blenkinsop 2008a, Bierlein *et al.* 2008).

4.3. ZONA METAMÓRFICA MARY KATHLEEN

Dentre as subdivisões do domínio CDE, o depósito de U-ETR de *Mary Kathleen* está inserido na Zona Metamórfica *Mary Kathleen* (Figura 3). A Zona Metamórfica *Mary Kathleen* (ZMMK) fica restrita numa estreita faixa de direção N-S, a oeste do CDE. Seus limites oeste e leste, respectivamente, coincidem com as unidades Bloco *Kalkadoon-Leichhardt* e Zona *Quamby-Malbon*.

Neste terreno ocorrem rochas metassedimentares, como calcários e quartzitos, além de metabasaltos (Formação *Corella*). As rochas intrusivas estão representadas pelas unidades Granito *Burstall* (1745 ± 16 Ma, U-Pb) e Gabro *Lunch Creek* (McKay & Mieзитis 2001).

Os primeiros registros de hidrotermalismo Na-Ca na ZMMK coincidem com o Evento Extensional *Wonga* (1750-1730 Ma). Este evento é caracterizado por controle estrutural, escapolitização (altas temperaturas), albitização e gênese de *skarns* localizados (Betts *et al.* 2006). Este período foi responsável pela formação de um ambiente propício para a hospedagem de importantes mineralizações uraníferas (Blenkinsop *et al.* 2007).

Na ZMMK, o *front* de alteração é facilmente reconhecido pela intensa albitização e escapolitização. Cerca de 20% das rochas expostas na ZMMK foram afetadas por estes tipos alterações hidrotermais (Fu *et al.* 2004, Oliver *et al.* 2004, Betts *et al.* 2006). Localmente ocorre alteração cálcio-silicática com formação de allanita, hornblenda, diopsídio e epitodo, e granatização (fase andradita–grossulária) (Matheson & Searl 1956, Oliver *et al.* 1999).

As mineralizações uraníferas estão hospedadas em metassedimentos e *skarns* cálcicos paleoproterozóicos da Formação *Corella*. Nesta Formação são observadas intrusões de vários corpos máficos e félsicos.

4.4. GEOLOGIA DO DEPÓSITO DE U-ETR *MARY KATHLEEN*

Este depósito, classificado como metamórfico-hidrotermal (**Maas et al. 1987, Oliver et al. 1999**), está localizado no flanco ocidental da megaestrutura sinclinal *Mary Kathleen*. O mineral de minério uraninita (U_3O_8) ocorre disseminado em *skarns* cálcicos da Formação *Corella* (1780-1760 Ma).

A Formação *Corella* (1780-1760 Ma) é formada por espessas camadas (aproximadamente 2000 m) de rochas carbonáticas características de ambiente marinho, além de arenitos, evaporitos e vulcânicas máficas subordinadas (**Maas et al. 1987**). Diversos corpos granitóides félsicos e máficos (Granito *Burstall*, Batólito *Wonga* e Gabro *Lunch Creek*) intrudem esta unidade. Ocorrem ainda rochas relacionadas a fenômenos vulcânicos de natureza riolítica (**Page 1983**).

Após o período deposicional, esses litotipos foram extensivamente diferenciados por ciclos magmáticos–hidrotermais e metamórficos entre o período 1750 Ma à < 1490 Ma. O Evento Extensional *Wonga* (1750-1730 Ma) foi responsável pela 1ª Fase magmática–hidrotermal e de deformação. Outra característica desta fase é o posicionamento do Granito *Burstall* com consequente gênese de *skarns* derivados do metassomatismo de contato (**Oliver et al. 1999**), formados essencialmente pela paragênese de minerais cálcio-silicáticos allanita+andradita+uraninita, ocorrem ainda minerais secundários como epitoto, escapolita, diopsídeo, hornblenda e quartzo (**Maas et al. 1987, Oliver et al. 1985, McKay & Mieзитis 2009**).

O Depósito de U-ETR *Mary Kathleen* é considerada epigenética, além de possuir especial relação com halos de alteração cálcio-silicática e granatização (fase andradita–grossulária) (**Matheson & Searl 1956, Oliver et al. 1999**).

Postula-se história polifásica para a formação dos *skarns* e a mineralização na Mina de U-ETR *Mary Kathleen*. Neste contexto, a gênese dos *skarns* (1ª Fase – ~1740 Ma) está intrinsecamente relacionada ao metassomatismo de contato imposto por intrusões félsicas do Granito *Burstall*, enquanto que o transporte e deposição do U-ETR preexistente (e.g. granito) ocorreu durante o metamorfismo regional no período de 1550–1500 Ma (Evento *Isan* – 2ª Fase), aproximadamente 200 Ma após a gênese dos *skarns* (**Oliver et al. 1999**). Interpretações baseadas nas análises U-Pb (**Page 1983**) e Sm-Nd (**Maas et al. 1987**) sugerem a ação de prolongados eventos hidrotermais entre 1550–1500 Ma. Os fluidos hidrotermais no metamorfismo regional encontravam-se enriquecidos em Cl, Na, Ca e K, além de Cu, Pb e Au. É provável que sob essas condições os elementos U-ETR estivessem altamente solubilizados (**Oliver et al. 1999**). A ocorrência de andradita-grossulária impressa na rocha hospedeira é outra assinatura relevante das zonas mineralizadas.

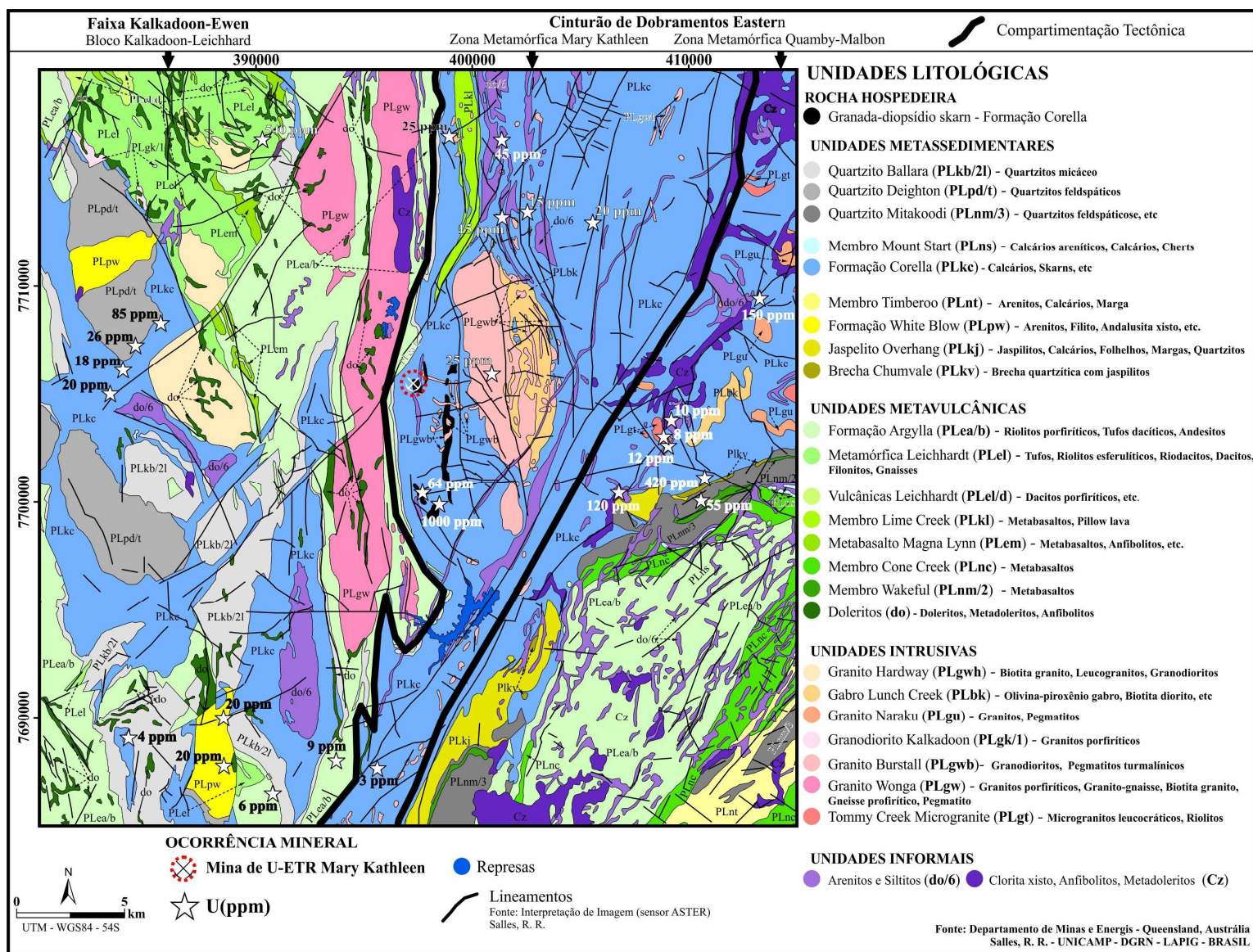


Figura 3. Mapa geológico da área de estudo e ocorrências (ppm) de U na proximidades da Mina de U-ETR *Mary Kathleen* (Modificado de: Departamento de Minas e Energia – Governo de Queensland – Austrália).

5. DADOS AERORADIOMÉTRICOS & GEOQUÍMICA

Os dados aeroradiométricos utilizados neste estudo foram gerados a partir de um levantamento aerogeofísico com linhas de voo na direção E-W, espaçadas por 250m. O espectrômetro utilizado foi o *Geometrics Exploration GR800B*, com o qual leituras radiométricas foram feitas a cada 60 m ao longo das linhas de voo e com uma visada de 80 m. No âmbito do levantamento, foram mensurados duzentos e cinquenta e cinco (255) canais no intervalo de energia de 0,06 a 3,0 Mev, sendo que um canal adicional foi utilizado para registrar o intervalo de 3,0 a 6,0 Mev (janela cósmica). Este levantamento foi completado com a supressão das contribuições primárias e ruídos, como a determinação do coeficiente de *background*, correção do espalhamento *Compton* e da altitude de voo. Ademais, o coeficiente de sensibilidade foi determinado, tornando possível a conversão dos dados radiométricos para porcentagem de Potássio (%K), parte por milhão equivalente de Urânio (eU ppm) e parte por milhão equivalente de Tório (eTh ppm). Jayawardhana & Sheard (2000) documentaram os procedimentos de aquisição, compilação e correções realizados para os canais eU, eTh e %K aqui utilizados. Os dados deste levantamento foram obtidos na sua versão final no formato X, Y, Z.

De comum aplicação na pesquisa metalogenética, a aerogamaespectrometria voltada à exploração mineral, com especial destaque à prospecção de U e Th (Dickson & Scott 1997), é empregada na Austrália desde a década de 1960. Desde então, as variações geoquímicas entre os radioelementos Urânio (U), Tório (Th) e Potássio (K) nos diferentes tipos de rochas e solo, além da caracterização de estilos de alteração hidrotermal, vêm sendo mensurados com esta técnica para fins de mapeamento básico e prospecção mineral (Jayawardhana & Sheard 2000).

A análise do cenário prospectivo da área de estudo contou com 26 ocorrências de U medidas a partir da análise de *rock chip*, dentre as quais 17 foram utilizadas para estudo estatístico por conter os maiores valores de concentração de U.

Esta base de dados é pública e encontra-se disponível para *downloads* pelo sistema *Interactive Resource and Ternure Maps* (IRTM) do Departamento de Minas e Energia do Governo de *Queensland*.

6. MÉTODOS

Os métodos de análise e integração dos dados aeroradiométricos foram compilados segundo as seguintes etapas: (i) análise exploratória dos dados (Turkey 1967), com propósito de evidenciar a distribuição estatística dos canais eU, eTh e %K, assim como dos subconjuntos definidos para o canal eU; (ii) interpolação dos canais de eU, eTh e %K pelo algoritmo de Mínima Curvatura em malha regular

de 50 m; (iii) produção de mapas definidos pelas razões eU/eTh , $eU/\%K$ e $eTh/\%K$, pelas normalizações do canal de eTh , e Fatores de realce para eU e $\%K$; (iv) estimativa de valores anômalos para os mapas eU , eTh , eU/eTh , F_U , U_d pelas equações $\mu+\sigma$, $\mu+2*\sigma$, $\mu+3*\sigma$ e posterior integração por meio da álgebra booleana; e (v) compilar mapas de prospectividade uranífera baseados nos conceitos de integração da Lógica *Fuzzy*.

6.1. ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS DADOS AERORADIOMÉTRICOS

A Análise Exploratória de Dados (AED) na pesquisa mineral tem função de quantificar o conjunto de dados numéricos por meio de uma grande variedade de técnicas estatísticas, iniciando pelo reconhecimento das medidas de posição e variabilidade. Turkey (1977), em oposição aos resumos numéricos, sugeriu técnicas visuais para incrementar esta análise e evidenciar tendências, relações e padrões intrínsecos ao conjunto analisado.

O conjunto de dados utilizados nessa pesquisa compreende valores de concentração dos radioelementos eU , eTh e $\%K$.

A AED foi aqui dividida em duas etapas. Primeiro, foi compilada uma síntese estatística dos canais dos radioelementos eU , eTh e $\%K$. Em seguida, foi realizada uma análise detalhada de 17 ocorrências de U mensuradas a partir de *rock chip* (cf. síntese no item 7.2). Esta segunda etapa também foi utilizada como estratégia para: (i) verificar a eventual relação das áreas de ocorrências de U com áreas realçadas no mapa aerogamaespectrométrico de eU e com o depósito de U-ETR *Mary Kathleen*; (ii) evidenciar as características radiométricas destas áreas para as quais análises geoquímicas de *rock chip* encontram-se disponíveis; (iii) resumir descritivamente as 17 ocorrências de U e dividi-las em subconjuntos compostos por 19 *pixels* x 19 *pixels* a fim de observar a sua distribuição e variabilidade; e (iv) concretizar, por meio de análise gráfica *P-P plot*, quais tipos de distribuições representam os canais de eU , eTh e $\%K$.

6.2. ÍNDICES E NORMALIZAÇÕES DE DADOS AERORADIOMÉTRICOS

Os radioelementos U e Th apresentam comportamento químico complexo no líquido magmático, concentrando-se no magma residual, enriquecido principalmente em Si. Assim, partes anômalas de U e/ou Th em granitos diferenciados são realçadas pela razão eU/eTh . A razão $eU/\%K$ tem por finalidade realçar áreas enriquecidas em U e depletadas em K. Em geral, a baixa razão $eTh/\%K$ é excelente indicadora de áreas com alteração hidrotermal potássica (Dickson & Scott 1997, Shives *et al.* 2000).

Mapas aeroradiométricos derivados dos canais eU, eTh e %K foram compilados a partir das equações propostas por Saunders *et al.* (1993, 1994).

Os valores, definidos como U anômalo (Ud) e K anômalo (Kd) (Saunders 1994), foram estimados a partir da normalização do eTh (Equações 1 e 2). As intempéries que influenciam as concentrações aparentes do Th também atuam de forma similar nas concentrações do U e do K. Assim, é possível suprimir efeitos indesejáveis a partir da normalização do eTh, visto a relação de comportamento entre estes radioelementos (Saunders *et al.* 1993, 1994). Também por ocorrer somente no estado oxidado Th⁴⁺, este elemento apresenta baixa solubilidade, exceto quando soluções ácidas reagem com o sistema. Isso efetivamente o qualifica como fator de normalização no procedimento citado acima (Durrance 1986, Dickson & Scott 1997).

$$K_i = (\text{mean } K_s / \text{mean } Th_s) * Th_s \rightarrow K_d = (K_s - K_i) / K_i \quad (1)$$

$$U_i = (\text{mean } U_s / \text{mean } Th_s) * Th_s \rightarrow U_d = (U_s - U_i) / U_i \quad (2)$$

As relações das distribuições superficiais de eU e %K em relação à razão dos radioelementos eTh/%K e eU/eTh, respectivamente, é demonstrada pelo Fator *F* (Efimov, 1978). Assim como a razão eU/eTh, o Fator *F* para o eU (*F_U*) tende a concentrar áreas enriquecidas em U. O Fator *F* para %K (*F_K*) segue o mesmo princípio (Equações 3 e 4):

$$F_U = eU * eTh / \%K, \quad (3)$$

$$F_K = \%K * eU / eTh, \quad (4)$$

É importante salientar que a análise integrada desta base de dados aeroradiométricos solidifica a pesquisa uranífera, pois conforme a necessidade, áreas enriquecidas em elementos específicos, como o U e o K, são evidenciadas por meio de índices e fatores de normalização.

6.3. PROSPECÇÃO GEOQUÍMICA REGIONAL COM BASE EM GEOESTATÍSTICA

A constante busca por valores que representem *outliers* geoquímicos é uma das principais tarefas da Geoestatística Analítica aplicada à prospecção mineral. Reimann (2005) faz relevantes considerações a respeito da análise de valores extremos, além de sugerir técnicas estatísticas mais robustas para a análise de *outliers*. As propostas sugeridas por Hawkes & Webb (1962) e Rose *et al.* (1979) – seguindo o silogismo da média aritmética (μ) adicionada ao desvio padrão (σ) dada pelas equações $\mu + \sigma$, $\mu + 2 * \sigma$ e $\mu + 3 * \sigma$ (Figura 4) – foi implementada nesta pesquisa em ambiente SIG.

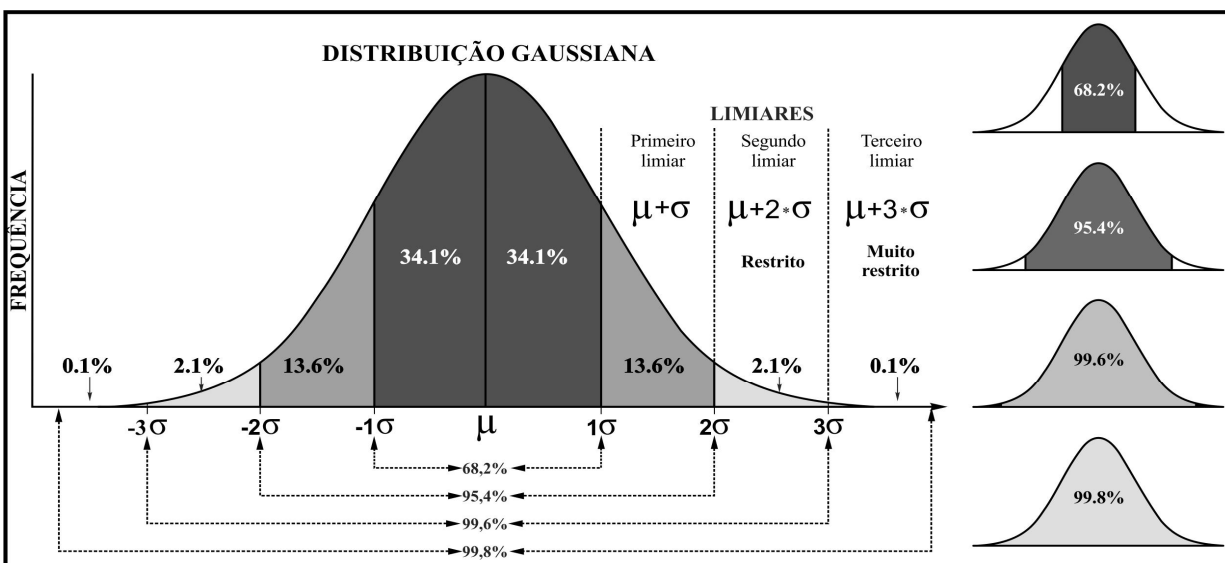


Figura 4. Área sob a Curva Normal com os respectivos intervalos definidos para determinar os limiares anômalos. À medida que se caminha para a faixa $\mu+3\sigma$ a pesquisa se torna mais restritiva (**Modificado de: Krumbein & Graybill 1965, Rose et al. 1979, Davis 1986, Licht 1998**).

Segundo Licht (1998), um geólogo exploracionista, ao manipular dados geoquímicos multifonte, como os de solo e/ou de rocha, é levado a definir dois ou mais limiares a fim de obter valores anômalos. Para tanto, aplica-se o resultado definido pela $\mu+\sigma$ e suas variantes $\mu+2\sigma$ e $\mu+3\sigma$. Os dados de um levantamento aerogamaespectrométrico, quando convertidos para concentração em ppm, correspondem, de certa forma, a um método indireto de amostragem geoquímica. Assim, podem ser submetidos a essa abordagem quantitativa.

Na pesquisa uranífera esta técnica estatística tem sido amplamente utilizada. Hamed (1995) discorreu sobre os limiares $\mu+\sigma$, $\mu+2\sigma$ e $\mu+3\sigma$ como tratamento estatístico dos valores de eU e das razões eU/eTh e eU/K, correlacionando-os a um conjunto de unidades litológicas. Asfahani (2005, 2009) demonstrou a aplicação do limiar $\mu+2\sigma$ em dados aeroradiométricos voltados à prospecção de U. Roquin e Zeegers (1987) utilizaram a equação de $\mu+3\sigma$ para estimar variação de *background* em dados levantados para prospecção geoquímica regional.

À medida que o analista impõe, até mesmo de forma indireta, o princípio da distribuição simétrica aos dados de estudo, os conceitos relativos à Distribuição Normal ou Gaussiana passam ser considerados primordiais. Porém, na maioria dos casos, dados geoquímicos não obedecem às regras inerentes a este modelo. Logo, apresentam distribuição assimétrica (Light 1998).

A função densidade de probabilidade para a Distribuição Normal pode ser definida usando a média (μ) e variância S^2 . A equação da curva é dada por:

$$f(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \rightarrow f(x) = e^{-\frac{x^2}{2S^2}},$$

onde σ representa a meia largura de uma altura de $1/e$. Assim, a área sob a Curva Gaussiana é,

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2S^2}} dx = \sqrt{2\pi S^2}.$$

Concluindo, na teoria das probabilidades, a Distribuição Normal é dada por,

$$\tau(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi S^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2S^2}} \rightarrow \tau(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2S^2}},$$

onde π e e são constantes, correspondendo a 3.14159 e 2.71828, respectivamente; $\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}$ é o fator de normalização para área unitária (Walpole *et al.* 2007).

Neste contexto, o mais importante é entender que a curva Gaussiana é afetada pelas medidas de μ e σ , o que conduz a erros interpretativos, pois tanto μ como σ não são medidas adequadas para representar um conjunto de dados geoquímicos, por serem afetados, de forma exagerada, por valores extremos (Bussab e Morettin 1987).

6.4. PROSPECÇÃO GEOQUÍMICA REGIONAL COM BASE EM MODELAGEM FUZZY

A Teoria ou Lógica *Fuzzy*, concebida para modelar os atributos evidenciais existentes em classes de objetos, foi inicialmente proposta por Zadeh (1965). Formalmente, um conjunto *fuzzy* é definido por uma função de pertinência (μ) que expressa a transição gradual do elemento do conjunto universo X de pertencer ou não ao intervalo dos números reais de 0 a 1 (Equação 5).

$$A = \{[x, \mu_A(x)] \mid x \in X\}, \text{ onde } \mu_A: X \rightarrow [0,1] \quad (5)$$

Isso implica dizer que a Lógica *Fuzzy* considera os números reais entre dois extremos, indicados por 0 e 1, além dos próprios extremos contidos num conjunto de dados. Assim, a teoria dos conjuntos *fuzzy* procede diferentemente da teoria clássica, onde os conjuntos são denominados *crisp*. Nesta última, admite-se o preceito da dualidade 0 ou 1 para uma dada proposição. A Tabela 2 compara esses dois conceitos.

Tabela 2: Diferença entre os conjuntos de dados *crisp* e *fuzzy*.

Conjuntos <i>Crisp</i>	Conjuntos <i>Fuzzy</i>
$A(X) \rightarrow \{0,1\}$; onde, $A(X) = 1$ se e somente se X pertence a A ; $A(X) = 0$ se e somente se X não pertence a A ;	$\mu_A: X \rightarrow [0,1]$; onde, $\mu_A: X = 1$, indica o grau de pertinência máximo do elemento X num conjunto <i>fuzzy</i> ; $\mu_A: X = 0$, indica nenhuma pertinência do elemento X num conjunto <i>fuzzy</i> ; $0 \leq \mu_A: X \leq 1$, o elemento X é representado por pertinência parcial (0.1,0.9) com o conjunto <i>fuzzy</i> .

É importante destacar que a Lógica *Fuzzy* não têm nenhuma relação com funções de Probabilidades (An *et al.* 1991), embora seja às vezes confundida como tal por alguns autores.

Neste estudo, as funções para a fuzzificação dos dados aeroradiométricos foi realizada com base nas funções *Fuzzy Large* (Equação 6) e *Fuzzy Small* (Equação 7) (Tsoukalas & Uhrig, 1997):

$$\mu_{(X)} = 1 / (1 + (X/f_2)^{f_1}) \quad (6)$$

$$\mu_{(X)} = 1 / (1 + (X/f_2)^{-f_1}) \quad (7)$$

onde, f_1 corresponde ao valor de espalhamento para $\mu_A: X \in [0,1]$ e f_2 define o ponto de inflexão da distribuição entre os intervalos de classes. A função *Fuzzy Large* atribui maior pertinência aos maiores valores, enquanto que a função *Fuzzy Small* atribui maior pertinência aos menores valores. Por exemplo, se a função *Fuzzy Small* for aplicada ao mapa derivado da razão eTh/%K, a maior pertinência *fuzzy* indicará a possibilidade de áreas enriquecidas em K.

Tal como procede na Lógica Booleana, existem na Lógica *Fuzzy* conjuntos de operadores disponíveis para estimativas, neste caso, de possibilidades de ocorrências minerais.

Os operadores *Fuzzy* empregados nesta pesquisa foram os seguintes (An *et al.* 1991, Bonham-Carter 1996, Knox-Robinson 2000):

(A) operador *Fuzzy AND*: quando aplicado, seleciona os valores mínimos nos mapas evidenciais. É definido por (Equação 8):

$$\mu_c(x) = \text{Min} [(\mu_A(x), \mu_B(x), \dots, \mu_N(x))] \quad (8)$$

(B) operador *Fuzzy OR*: quando aplicado, seleciona os valores máximos nos mapas evidenciais. É dado por (Equação 9):

$$\mu_c(x) = \text{Max} [(\mu_A(x), \mu_B(x), \dots, \mu_N(x))] \quad (9)$$

(C) operador *Fuzzy Algebraic PRODUCT*: a combinação dos valores de pertinência *fuzzy* por esse operador resultará em mapas com valores reduzidos, visto a multiplicação de coeficientes menores que 1. Este operador pode ser aplicado em situações em que a presença de fatores geológicos convergentes mascaram anomalias de interesse prospectivo. É definido por (**Equação 10**):

$$\mu_c(x) = 1 - \prod_{i=1}^n \mu_i \quad (10)$$

(D) operador *Fuzzy Algebraic SUM*: não corresponde a uma operação algébrica clássica. O resultado desta operação terá valor maior ou igual ao maior valor de pertinência *fuzzy* contido no conjunto de dados. É definido por (**Equação 11**):

$$\mu_c(x) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i) \quad (11)$$

(E) operador *Fuzzy Gamma*: é definido com base no produto das equações 10 e 11 (**Equação 12**). O valor de γ é um parâmetro definido por valores do intervalo fechado [0,1]. Assim, quando γ for 1, o resultado será igual aquele do *Fuzzy Algebraic SUM*; quando for 0, a resultado será igual aquele do *Fuzzy Algebraic PRODUCT*. Valores γ próximos a 0 tendem a minimizar o mapa prospectivo final; enquanto valores γ próximos a 1 tendem a maximizá-lo.

$$\mu_c(x) = (\text{Fuzzy Algebraic SUM})^\gamma + (\text{Fuzzy Algebraic PRODUCT})^{1-\gamma} \quad (12)$$

Apesar de traduzir a informação direta quanto a concentração de U, apenas o uso do canal eU não basta para a pesquisa uranífera. Portanto, optou-se por agrupar os mapas específicos para realce desse elemento em Suíte de Urânio e posteriormente integrá-los pelo operador *Fuzzy Product*. Pretende-se então, realçar áreas anômalas em U traduzidas na forma de mapas prospectivos.

Como estratégia de integração, os mapas aeroradiométricos foram divididos e integrados em etapas diferentes. O diagrama (**Figura 5**) traduz de forma organizada as etapas de processamento adotadas.

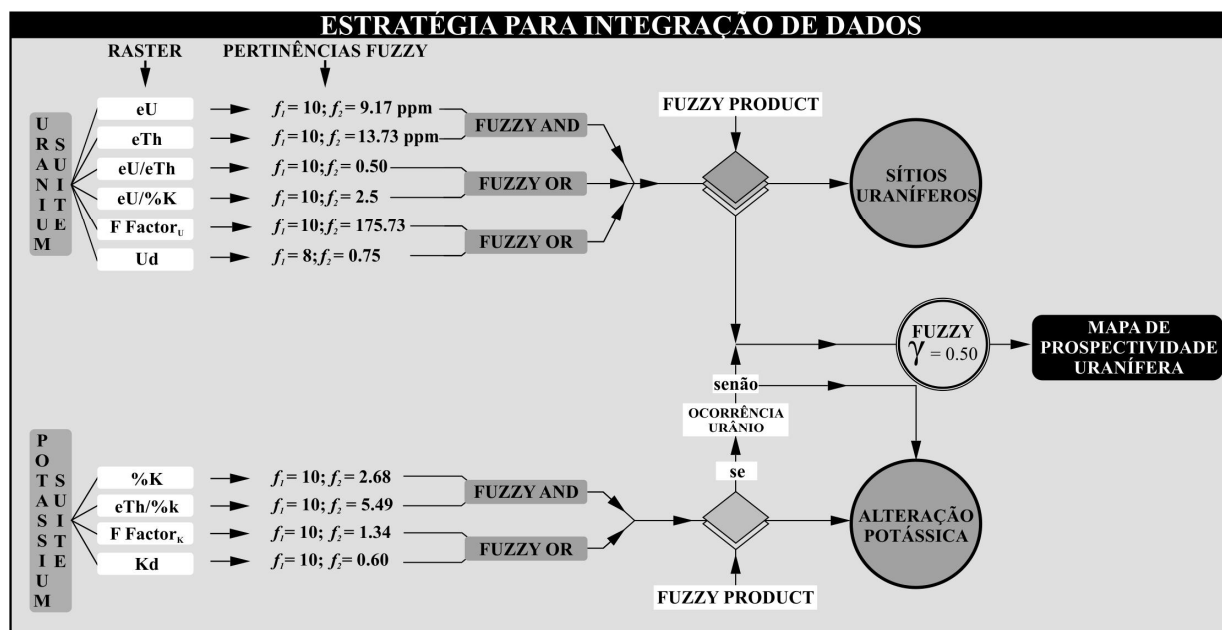


Figura 5. Estratégia para integrar os canais eU, eTh e %K, assim como os mapas derivados das razões desses canais, índices e normalizações.

Após o incremento da Lógica *Fuzzy* para aplicações na área de pesquisa mineral por esforço de Bonham-Carter (1994), a credibilidade deste método de análise e integração de dados está documentada de forma sistemática numa série de artigos. Por exemplo, An *et al.* (1991), através da Lógica *Fuzzy*, realizaram a integração de dados geofísicos para pesquisa mineral de metais base e formações ferríferas para a região do Lago *Farley*, Manitoba (Canadá). Moon (1998) compilou uma revisão a respeito dos conceitos da teoria *Fuzzy* no universo da exploração mineral e da integração de dados. D’Ercole *et al.* (2000), através da Lógica *Fuzzy*, elaboraram mapas prospectivos em escala regional e de semi-detalle para a pesquisa de depósitos do tipo *Mississippi-Valley* na Bacia de *Canning*, no oeste australiano. Knox-Robinson (2000) abordou esse método como referência para pesquisa de mineralizações do tipo Au-orogênico no Cráton *Yilgar*, Austrália. Luo & Dimitrakopoulos (2003), com base nos operadores *Fuzzy* integram dados geológicos, geoquímicos e magnéticos para *skarns*. Carranza (2009) aborda uma série de exemplos utilizando Lógica *Fuzzy* para processamento de dados geoquímicos com fins prospectivos.

Demicco & Klir (2004) discorrem de forma sistemática sobre diversas aplicações de modelagem em geociências com a Lógica *Fuzzy*, exceto para a prospecção mineral. Barreto-Neto & Souza Filho (2008) demonstram a aplicabilidade da teoria *Fuzzy* na modelagem hidrológica.

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os mapas aeroradiométricos foram segmentados em dois conjuntos, denominados de Suíte de Urânio (**Figura 6**) e Suíte de Potássio (**Figura 7**). A Suíte de Urânio visa quantificar e qualificar áreas anômalas em U. A Suíte de Potássio objetiva realçar áreas dominadas pelo K e possivelmente com ocorrência de alteração hidrotermal, visto que o U pode acompanhar o K nos processos hidrotermais. Esta estratégia foi organizada porque não foram encontradas referências bibliográficas que correlacionasse o U a zonas enriquecidas em K.

7.1. ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS CANAIS AERORADIOMÉTRICOS

Inicialmente, com o objetivo de equacionar o grande volume de dados envolvidos nesta pesquisa (463.702 mil pontos), optou-se por extrair os valores $\text{Min}\{x_i\}=X_1$ e $\text{Max}\{x_i\}=X_n$ (de Smith *et al.* 2007) para os canais de eU, eTh e %K. Estas funções traduzem, de forma objetiva, valores extremos (*spike*) positivos e/ou negativos. Segundo Pires (1995), tais valores extremos ocorrem devido a erros na correção do *background* atmosférico e/ou calibração inadequada do gamaespectrômetro. Este último impõe erros na fase de mensuração dos radioelementos. Também, muitas das vezes esses erros são introduzidos pelo usuário desatento ao manipular a tabela de dados

Quanto ao valor máximo, a função retornou 9999 para %K. Como inexistia justificativa para este valor extremo, optou-se por corrigi-lo por meio da média aritmética dos pontos vizinhos amostrados. Assim, o valor deste ponto passou a ser -1,12 %K.

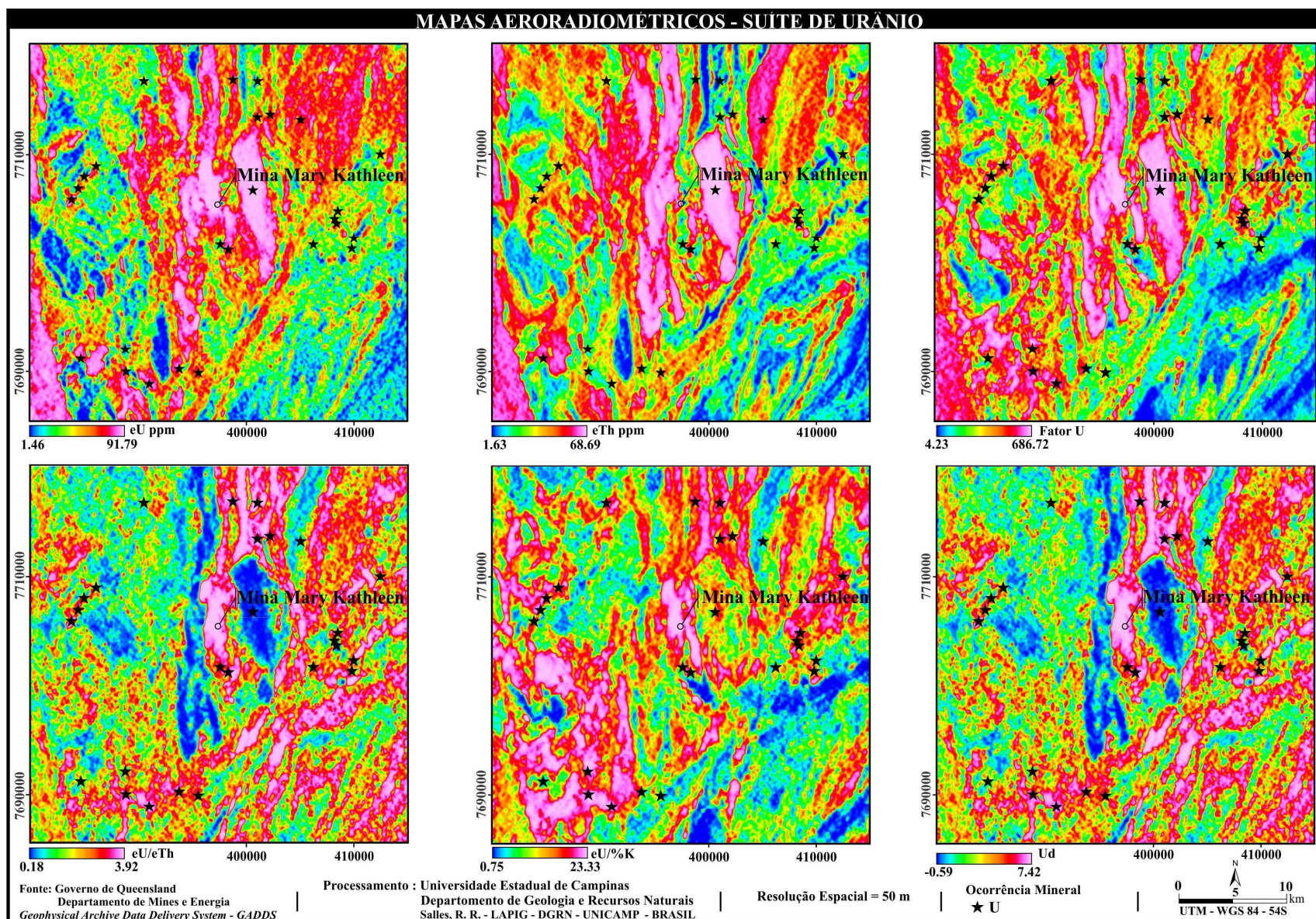


Figura 6. Conjunto de mapas aeroradiométricos para o radioelemento U. Os mapas de Fator F para eU e U anômalo (Ud) tendem a concentrar as altas respostas gamaespectrométricas.

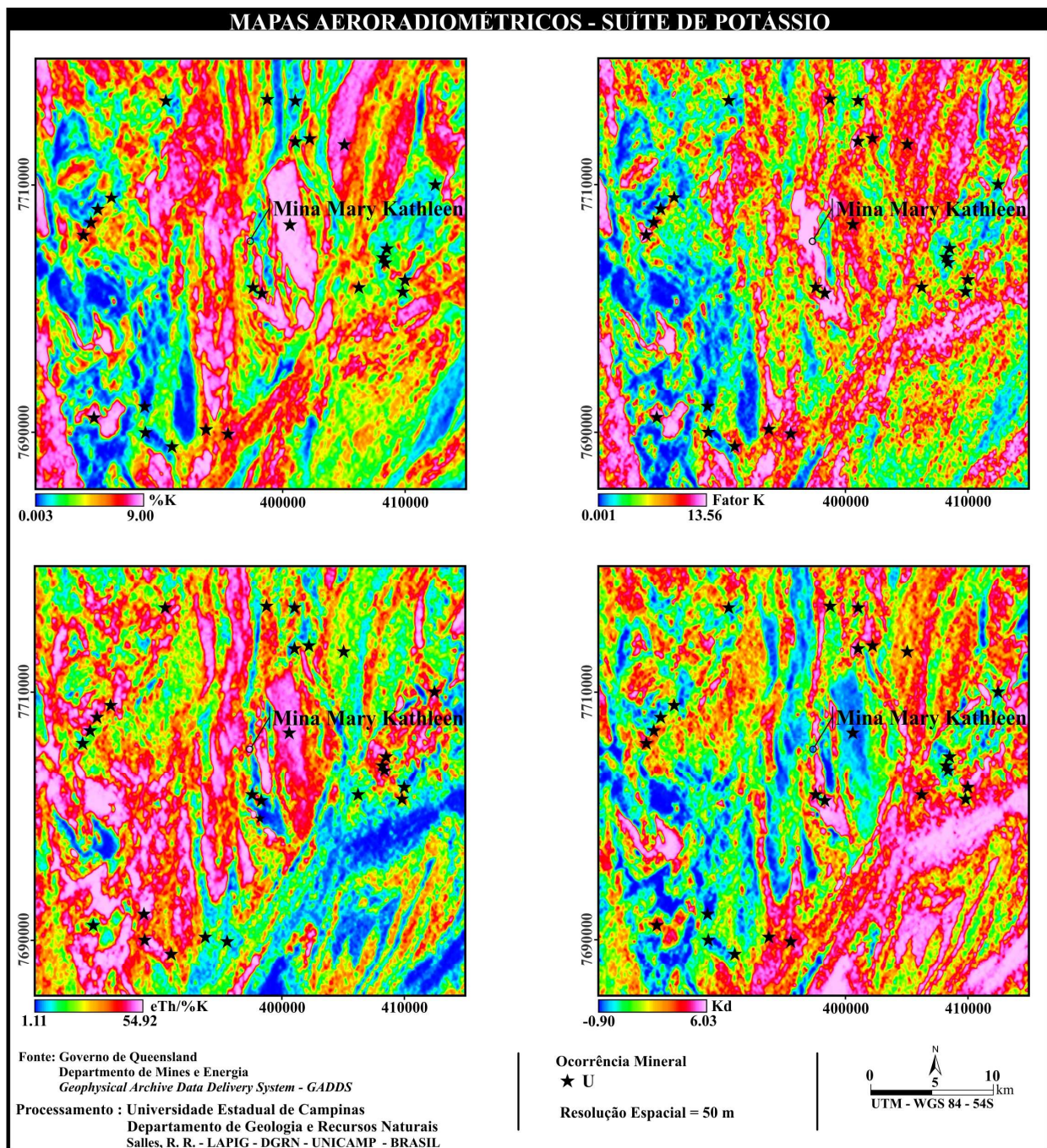


Figura 7. Conjunto de mapas para o canal %K. As ocorrências de urânio não apresentam um padrão, ou seja, ocorrem associadas a valores baixos, intermediários e altos.

Para os radioelementos eTh e eU não foram observados valores positivos discrepantes do conjunto de dados. No entanto, os valores mínimos negativos foram de -1.22%, -8.01 e -4.23 ppm, para os respectivos canais de %K, eTh e eU. Com o intuito de suprimir os valores negativos, aplicou-se a **Equação 13**:

$$X = n + |m| + 0.01; \forall n = |m|, \quad X = 0.01 \quad (13)$$

onde,

X = radioelementos %K, eTh ou eU;

n = variável que representa a concentração dos canais eU, eTh e %K;

m = mínimo negativo de cada radioelemento;

Com isso, após a adição do valor absoluto mínimo aos canais eU, eTh e %K, o menor valor para cada radioelemento passou a ser 0,01. Esta equação foi aplicada de modo que os valores originais fossem alterados de forma tênue.

A estatística descritiva para os canais eU, eTh e %K, e as respectivas razões eTh/%K, eU/eTh, eU/%K encontram-se documentadas na **Tabela 3**.

Tabela 3. Estatística descritiva anterior à interpolação dos radioelementos e após a correção dos valores espúrios.

	eU	eTh	%K	eU/eTh	eTh/%K	eU/%K
μ	6.471	14.390	2.862	0.497	5.415	2.537
Md	6.040	13.030	2.780	0.464	4.836	2.245
Min $\{x_i\}=X_l$	0.32**	0.27**	0.07**	0.047	0.226	0.241
Max $\{x_i\}=X_n$	139.640	78.770	10.990	9.45	112.944	47.071
S^2	8.254	58.156	1.372	0.042	7.018	1.818
σ	2.873	7.626	1.171	0.206	2.649	1.348
CV (%)	44.399	52.993	42.134	44.396	54.776	60.044
SKEWNESS	6.372	2.511	0.585	5.713	4.705	5.181
KURTOSIS	154.840	9.511	0.661	146.330	83.780	80.257

** A equação (13) empregada para corrigir os valores negativos gerou o menor valor esperado (0,01). Entretanto, ao realizar as razões entre os canais eU, eTh e %K observou que este valor, ao dividir concentrações maiores, retornou valores discrepantes para menos de 0,5% dos dados. Assim, a concentração 0,01 ppm foi novamente corrigida por meio da média aritmética dos seus vizinhos mais próximos.

Para evidenciar a dispersão de todo o conjunto, representado pelos elementos eU, eTh e %K, utilizou-se como critério as funções de Variância (S^2), Desvio Padrão (σ) e Coeficiente de Variabilidade (CV%). Este último é dado pela função $CV=\sigma/\mu$.

Dentre os radioelementos, o conjunto eTh apresentou a maior variância (58.156), seguido do eU (8.254). A dispersão linear (σ) seguiu o mesmo padrão. Enquanto analisada com base nas funções S^2 e σ , a razão eU/eTh apresenta baixa dispersão no conjunto de dados. Entretanto, o cálculo do CV retornou valores imprevistos para todos os radioelementos e suas razões, compreendidos entre 42.134% a 60.044%, o que indica que a análise de dispersão não pode ser resumida apenas com as funções: S^2 e σ (Rao 1973, Bussab & Morettin 1987, Walpole *et al.* 2007).

Variáveis com alto CV implicam em baixo grau de simetria, ou seja, são inversamente proporcionais à Distribuição Normal. Esta função fornece uma boa idéia acerca da lei de distribuição dos dados. Segundo Koch e Link (1971), o conjunto de dados geoquímicos é governado pela Lei da Distribuição Normal quando estes apresentam CV menor que 30%. Valores superiores a 80% são considerados assimétricos. No entanto, os valores compreendidos no intervalo definido entre 40% a 70% não permitem qualquer conclusão. Devido a este fato, optou-se por adicionar as funções sintetizadas abaixo.

As distribuições de frequências não diferem apenas quanto ao valor médio e a variabilidade, mas também pela geometria da curva relativa ao conjunto de dados. Assim, a função *Skweness* é uma medida para quantificar a simetria da distribuição dos dados. Evidentemente, se a distribuição for normal, a função *Skweness* retornará valor nulo, algo não verificado para nenhum dos conjuntos de dados nesse estudo. A *Kurtosis* mede o achatamento da Curva Normal. Para os conjuntos de eU, eU/eTh, eTh/%K e eU/%K, as populações se mostraram mais concentradas, enquanto que as curvas para dos radioelementos %K e eTh se apresentaram mais achatadas.

7.2. MODELAGEM ESTATÍSTICA DAS OCORRÊNCIAS DE URÂNIO

Conhecer o conjunto de dados assim como as relações destes com as principais ocorrências de U na área de estudo é fundamental para determinar pertinências *fuzzy* coerentes para cada tipo de dado. Isso também implica na tomada de decisão quanto aos métodos e técnicas de manipulação de dados a serem empregados a fim de evidenciar possíveis anomalias. A seguir, é descrita a estratégia para aprofundar o conhecimento quanto à estatística quantitativa do canal eU em relação às ocorrências uraníferas da área de estudo.

Para selecionar os subconjuntos contidos no mapa de eU, levou-se em consideração as concentrações de U acima de 10 ppm, mensuradas a partir da análise geoquímica de amostras do tipo *rock chip* (Tabela 4). Deste modo, foram selecionadas 17 áreas, além da área da Mina *Mary Kathleen* (MK), totalizando 18 áreas para análise estatística. Cada área compreende uma matriz quadrada de 19 *pixels* x 19 *pixels*, totalizando 361 *pixels* para cada subconjunto. Este procedimento foi adotado de modo que cada ocorrências de U selecionada ocupasse o centro desta matriz. Assim, foram utilizados um total de 6498 *pixels* para análise estatística básica.

Após delimitar as áreas referentes aos subconjuntos, extraiu-se do mapa de eU os valores em ppm correspondente a cada *pixel*. Cada subconjunto ficou composto por 361 valores de concentração de eU para compor a análise de estatística descritiva (Tabela 4).

Tabela 4. Atributos de posição e dispersão dos subconjuntos definidos no mapa de eU em relação às ocorrências de U.

	ROCK CHIP	MÉDIA	MEDIANA	MIN	MAX	S ²	σ	SKEWNESS	CV (%)
MK*		26.130	23.031	3.012	91.794	422.459	20.554	1.133	78.66
S01	20 ppm	7.558	7.699	5.184	9.315	1.058	1.029	-0.309	13.61
S02	20 ppm	6.185	5.966	3.744	11.615	2.027	1.424	1.454	23.02
S03	18 ppm	7.695	7.575	4.660	12.026	2.120	1.456	0.500	18.92
S04	26 ppm	5.929	5.981	3.469	8.333	1.169	1.081	-0.124	18.24
S05	85 ppm	6.474	6.814	3.060	9.230	2.503	1.582	-0.353	24.44
S06	540 ppm	5.690	5.696	4.150	7.628	0.452	0.672	0.188	11.81
S07	25 ppm	7.451	7.791	4.280	10.489	1.735	1.317	-0.470	17.68
S08	45 ppm	5.836	5.850	4.131	7.605	0.672	0.820	-0.072	14.05
S09	15 ppm	7.278	6.768	5.730	11.514	1.833	1.354	1.613	18.60
S10	20 ppm	8.072	7.831	6.323	12.246	1.239	1.113	1.645	13.79
S11	150 ppm	7.414	7.536	4.635	9.729	1.722	1.312	-0.331	17.70
S12	25 ppm	14.789	14.860	11.500	17.362	1.437	1.199	-0.263	8.11
S13	64 ppm	7.141	6.789	4.768	12.109	2.372	1.540	1.364	21.57
S14	1000 ppm	6.749	6.646	5.443	10.981	0.714	0.845	1.569	12.52
S15	120 ppm	4.516	4.364	2.331	7.770	1.232	1.110	0.877	24.58
S16	420 ppm	5.789	5.714	4.345	7.883	0.538	0.733	0.508	12.67
S17	55 ppm	5.451	5.453	4.094	7.119	0.408	0.639	0.481	11.72

*MK = Depósito de U-ETR *Mary Kathleen*.

Ao analisar as variáveis básicas de média, mediana, valores mínimos e máximos pouco, se conclui quanto a característica simétrica e/ou assimétrica dos subconjuntos. Assim, o estudo de variabilidade foi complementada com as medidas de Variância (S²) e Desvio Padrão (σ).

A medida de dispersão S² para o subconjunto MK retornou um valor (433.459) discrepante quando comparado aos subconjuntos S01 a S17. Os valores de S² e σ foram baixos, sugerindo Distribuição Gaussiana. Entretanto, quando comparados ao subconjunto MK, nota-se uma tendência não-linear.

O Coeficiente de Variabilidade (CV) também foi calculado para os 18 subconjuntos. O subconjunto MK apresentou um CV maior que 70%, refletindo baixa simetria. Os CVs obtidos para os demais subconjuntos são menores que 30%, indicando uma tendência dos mesmos à Distribuição Normal. Não foram observados valores de CV no intervalo 30%-70% para qualquer subconjunto. No entanto, nota-se uma tendência discreta de alguns subconjuntos à assimetria considerando os valores de CV para S02 (23.02%), S05 (24.44%) e S13 (24.58%).

Para complementar a análise estatística e dar maior consistência ao estudo de distribuição, optou-se pela análise gráfica *Probability-Probability Plot (P-P plot)* (**Figura 8**).

No *P-P plot*, a Distribuição Cumulativa observada foi plotada contra um modelo teórico de função de distribuição (*Cumulative Distribution Function*), a fim de avaliar o ajuste dos subconjuntos ao modelo teórico de Distribuição Normal. Para que isto possa ser realizado, deve existir uma tendência linear, onde cada subconjunto se correlaciona integralmente à reta diagonal do gráfico. Existindo linearidade, conclui-se que os dados aproximam-se do modelo teórico de distribuição normalizado.

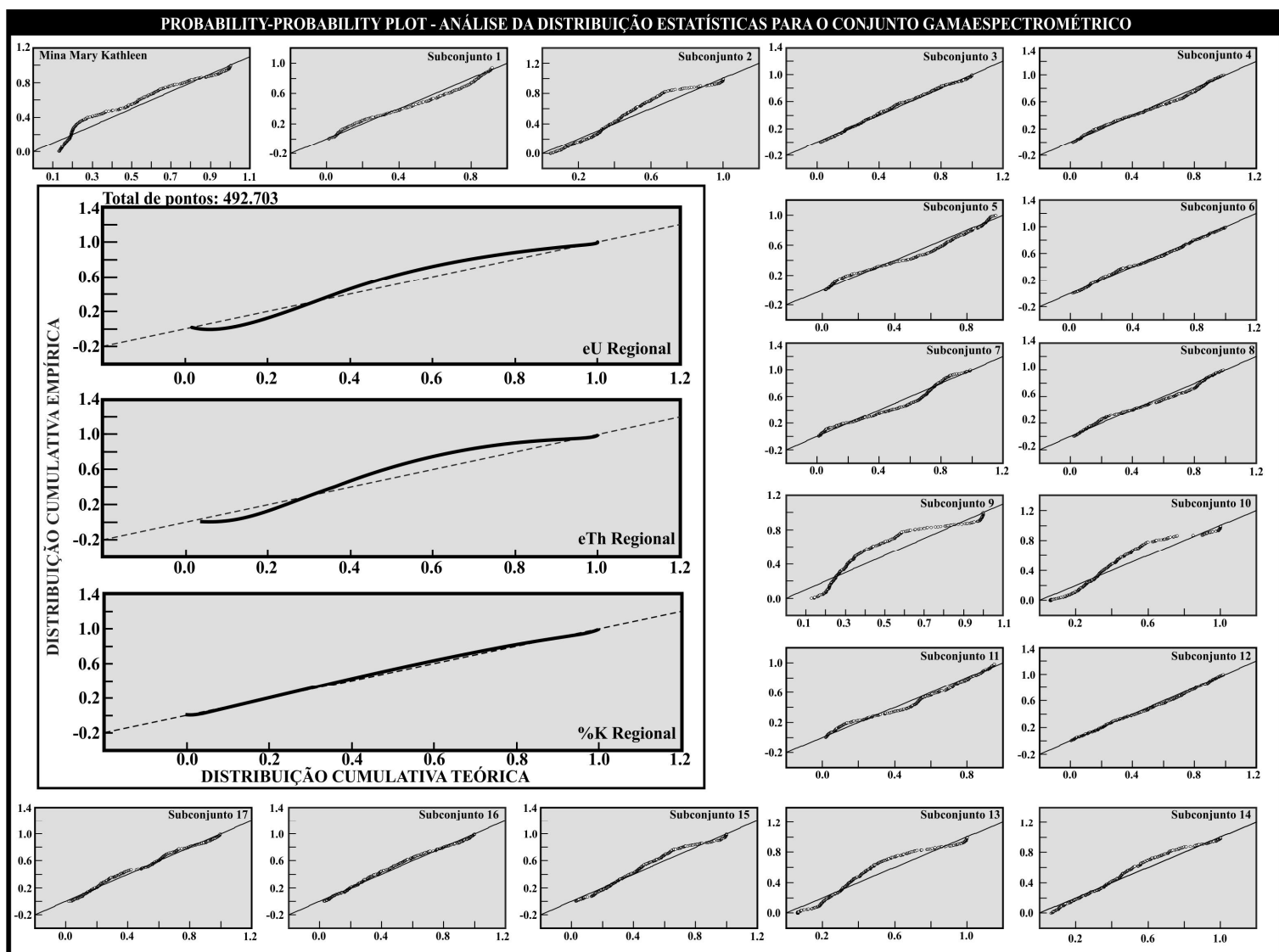


Figura 8. A análise das distribuições estatísticas, por meio do gráfico *P-P plot*, para os radioelementos eU, eTh e %K, além dos 18 subconjuntos do mapa de eU, incluindo a área da *Mina Mary Kathleen*. Algumas distribuições próximas da normal (maior correlação com a reta diagonal) mostram, de forma sutil, outras populações de dados.

A análise do gráfico *P-P plot* evidenciou assimetria para os canais de eU e eTh. O canal de %K apresentou tendências simétricas. Os subconjuntos S03 (18 ppm), S04 (26 ppm), S06 (540 ppm), S12 (25 ppm), S16 (420 ppm) e S17 (55 pm) mostram simetria satisfatória, pois o ajuste ao modelo linear teórico foi maior que 80%. Os restantes dos subconjuntos não honram efetivamente o modelo gaussiano, pois indicam de forma discreta, outras populações de dados. Ao comparar os subconjuntos assimétricos, nota-se relação cruzada com o subconjunto MK. Assim, os gráficos S02 (20 ppm), S10 (20 ppm), S13 (64 ppm) e S15 (120 ppm) apresentaram correlação com o gráfico do mapa de eU, enquanto S09 (15 ppm) apresentou características estatísticas similares ao subconjunto MK. Logo, este estudo completa a análise estatística descritiva, proporcionando uma melhor compreensão da distribuição de frequência dos radioelementos eU, eTh e %K.

7.3. PROSPECÇÃO GEOQUÍMICA REGIONAL

A primeira abordagem quantitativa aplicada para o canal de eU e mapas derivados para realce do U (Hawkes & Webb 1962) foi dividida em três etapas de processamento no ambiente do programa ArcGIS®. Nestas etapas foram levados em consideração as concentrações em ppm dos radioelementos eU e eTh, e valores derivados da razão eU/eTh e dos índices Ud e F_U. Estes mapas foram selecionados devido à correlação com as principais ocorrências de U. Por meio das respectivas equações $\mu+\sigma$, $\mu+2*\sigma$ e $\mu+3*\sigma$ (Tabela 5) foram compilados cinco mapas referentes à “suposta” primeira, segunda e terceira anomalias. Por ser técnica de proposição restritiva, tentou-se delimitar áreas alvos para a prospecção mineral integrando os cinco mapas pelo operador booleano *AND*. Assim, as áreas de prospectividade para a pesquisa uranífera foram evidenciadas por meio da correlação entre os mapas anômalos e divididas em duas ordens de prioridade. Áreas de primeira e segunda prioridade foram definidas, respectivamente, pela correlação entre todos os mapas anômalos ou pela correlação de pelo menos três mapas anômalos.

Tabela 5. Valores referentes aos limiares anômalos com base na equação proposta por Hawkes & Webb (1962) para os mapas referentes ao realce do elemento U e Th.

	eU ppm	eTh ppm	eU/eTh	F _U	Ud
$\mu+\sigma$	9.344	22.016	0.703	60.22	0.43
$\mu+2*\sigma$	12.217	29.642	0.909	84.53	0.73
$\mu+3*\sigma$	15.09	37.268	1.115	108.84	1.03

O polígono de estudo perfaz uma área de 1225 km². Assim, as áreas anômalas mapeadas pelo primeiro limiar foram de 154.32 km² (eU), 144.76 km² (eTh), 194.63 km² (eU/eTh), 136.77 km² (F_U) e 232.53 km² (Ud). Não considerando a correlação entre os mapas, a área total foi de 436.18 km². O

segundo limiar mapeou áreas anômalas com 42.36 km² (eU), 59.45 km² (eTh), 54.88 km² (eU/eTh), 58.55 km² (F_U) e 61.77 km² (Ud), totalizando aproximadamente 139.40 km². O terceiro limiar restringiu as áreas mapeadas em 15.81 km² (eU), 34 km² (eTh), 22,28 km² (eU/eTh), 29.79 km² (F_U) e 23.34 km² (Ud), totalizando 63 km².

O cenário prospectivo traduzido pelos mapas anômalos do primeiro, segundo e terceiro limiar coincide com sítio ocupado pela Mina de U-ETR *Mary Kathleen*. Os litotipos correlatos com as áreas realçadas foram representados pelo nome da unidade e simbologia.

7.3.1. PRIMEIRO LIMIAR ANÔMALO

A análise integrada de todos os mapas referentes ao primeiro limiar ($\mu+\sigma$) possibilitou uma visão generalista do cenário prospectivo nas proximidades da Mina *Mary Kathleen* (**Figura 9A**).

Os principais litotipos correlatos à área mapeada pelo primeiro limiar para o canal de eU (9.344 ppm) foram Granito *Burstall* (PLgwb), riolitos porfiríticos da Formação *Argylla* (PLea/b), plutões e *stocks* referentes ao Granito *Wonga* (PLgw). Subordinadamente correlacionam-se aos metasiltitos da Formação *White Blow* (PLpw), quartzitos da unidade Quartzito *Deighton* (PLpd), riolitos da unidade Vulcânica *Leichhardt*, além de jaspelitos e calcários da unidade Jaspilito *Overhang*. Nas proximidades da Mina *Mary Kathleen* (buffer de 1000 m), correlacionam-se a este limiar os litotipos da Formação *Corella*, representados por calcários impuros, quartzitos micáceos, além de *skarns* – rocha hospedeira da mineralização uranífera. Subordinadamente, são correlatos as intrusões graníticas pertencentes ao Granito *Burstall*. O primeiro limiar para o canal eTh (22.016 ppm) e o F_U mapearam as mesmas unidades que o primeiro limiar para o canal eU, exceto os metasiltitos da Formação *White Blow*. No entanto, o mapa anômalo referente à F_U mapeou de forma mais extensiva os quartzitos feldspáticos e calcários da Formação *Corella*, quartzito micáceo da unidade Quartzito *Ballara*, leucogranitos porfirítico da unidade Microgranito *Tommy Creek* e os granitos e pegmatitos da unidade Granito *Naraku*.

O primeiro limiar anômalo para a razão eU/eTh (0.703 ppm) mapeou riolitos porfiríticos e tufos dacíticos da Formação *Argylla*, calcários, quartzito micáceo e *pods* hematíticos da Formação *Corella*, quartzito micáceo da unidade Quartzito *Ballara*, metabasaltos da unidade Metabasalto *Lime Creek*, doleritos e metassedimentos das unidades sem dominação formal, olivina-piroxênio gabro e biotita diorito da unidade Gabro *Lunch Creek*, leucogranito da unidade Microgranito *Tommy Creek*, quartzitos feldspáticos da unidade Quartzito *Mitakoodi*, metabasaltos da unidade *Cone Creek*, siltitos, calcários e marga da unidade *Timberoo*, metasiltitos e calcários da unidade Formação *White Blow*. Os litotipos próximos da Mina *Mary Kathleen* correlacionaram de forma mais efetiva com este mapa, principalmente

os *skarns* mineralizados. O primeiro limiar para o Ud (0.43) mapeou as mesmas unidades espacializadas pelo limiar de eU/eTh. Entretanto, o mapa anômalo Ud foi ligeiramente mais extensivo que o mapa anômalo de eU/eTh.

Das 26 ocorrências de U usadas para este estudo, as correlatas aos mapas anômalos definidos pelo primeiro limiar ($\mu+\sigma$) são descritas abaixo:

(a) canal eU ($\mu+\sigma = 9.344$ ppm): mapeou oito ocorrências com concentrações que variam de 6 a 150 ppm. Neste contexto, três ocorrências de 6, 9 e 18 ppm encontram-se nos riolitos da Formação *Argylla*; uma ocorrência de 12 ppm nos doleritos e metadoleritos; uma ocorrência de 20 ppm nos siltitos da Formação *White Blow*; uma ocorrência de 25 ppm nos granitos e granodioritos do Granito *Burstall* e duas ocorrências de 25 e 150 ppm nos quartzitos micáceos da Formação *Corella*. Destas oito ocorrências, as concentrações que se correlacionam ao primeiro limiar do eTh (22.016 ppm), são de 6, 9, 25 e 12 ppm, além de uma ocorrência de 8 ppm correlata aos quartzitos da Formação *Corella*;

(b) razão eU/eTh ($\mu+\sigma = 0.703$): mostrou-se um excelente indicador de áreas enriquecidas em U ao mapear onze ocorrências de U. Dentre estas, destacam-se as ocorrências de 4, 10, 15, 18, 25, 45, 420 e 1000 ppm, as quais restringem-se aos litotipos da unidade Formação *Corella* e ocorrem associados aos calcários, quartzitos feldspáticos, metasiltitos e *pods* hematíticos. Duas ocorrências de 20 ppm correlacionam-se aos siltitos da unidade Formação *White Blow* e uma ocorrência de 26 ppm aos quartzitos feldspáticos da unidade Quartzito *Deighton*;

(c) fator F_U ($\mu+\sigma = 60.22$): mapeou cinco ocorrências com concentrações de 8, 25 e 64 ppm. Estas ocorrências são correlatas aos quartzitos micáceos e calcários da Formação *Corella*. Uma ocorrência de 12 ppm encontra-se nos metadoleritos (Unidade informais) e outra, de 25 ppm, associa-se aos granitos e granodioritos da unidade Granito *Burstall*.

Alvos de Primeira Prioridade (**Figura 9B**) e Segunda Prioridade (**Figura 9C**) foram definidos pela interseção dos mapas anômalos de eU, eTh, eU/eTh, Ud, F_U e eU, eU/eTh, F_U , Ud. Os litotipos correlatos a esses alvos correspondem às unidades Granito *Wonga*, formações *Argylla* e *Corella*, além da Formação *White Blow*.

7.3.2. SEGUNDO E TERCEIRO LIMIARES ANÔMALOS

A partir do segundo limiar ($\mu+2*\sigma$), as áreas anômalas ficam mais restritas (**Figura 10A**), de forma que, somente valores de maior concentração ficam evidentes. As áreas realçadas não indicam necessariamente áreas com anomalia uranífera significativa. Entretanto, considerar a correlação entre os

mapas referentes ao segundo limiar pode ser uma estratégia importante para delimitar alvos para a pesquisa mineral.

Os mapas anômalos compilados a partir do segundo limiar para eU (12.217 ppm) e eTh (29.642 ppm) se correlacionaram aos litotipos das unidades Granito *Burstall*, Granito *Wonga*, Formação *Argylla* e Formação *Corella*. O segundo limiar para a razão eU/eTh (0.909) e para Ud (0.73) mapeou áreas análogas. Os principais litotipos correlatos a esse limiar correspondem às unidades: Metabasalto *Lime Creek*, Formação *Argylla*, Formação *Corella*, Jaspilito *Overhang*, Gabro *Lunch Creek*, Granito *Naraku*, Metabasalto *Cone Creek*.

Correlatas ao segundo limiar para F_U (84.53) encontram-se as unidades Granitos *Burstall* e *Wonga* no domínio central da área de estudo. Subordinadamente, também se correlacionam a este limiar as unidades Formação *Corella*, Formação *Argylla* e Quartzito *Ballara*.

As ocorrências de U mapeadas pelo segundo limiar ($\mu+2*\sigma$) são sumarizadas abaixo:

- (a) canal eU ($\mu+2*\sigma = 12.217$): duas ocorrências de 18 e 25 ppm encontram-se contidas no domínio da Formação *Corella* e do Granito *Burstall*;
- (b) canal eTh ($\mu+2*\sigma = 29.642$): as áreas delimitadas por este limiar correlacionam-se às ocorrências de 12 e 25 ppm, referentes às unidades informais e Granito *Burstall*;
- (c) razão eU/eTh ($\mu+2*\sigma = 0.909$) e Ud ($\mu+2*\sigma = 0.73$): correlatas a estes mapas encontram-se as ocorrências de 18, 25 e 45 ppm mensuradas na Formação *Corella*. Além destas, uma ocorrência de 20 ppm referente a Formação *White Blow* foi mapeada pelo limiar Ud.
- (d) fator F_U ($\mu+2*\sigma = 84.53$): duas ocorrências de 25 e 64 ppm, referentes ao Granito *Burstall* e à Formação *Corella* se correlacionam aos mapas definidos por este limiar.

As áreas de Primeira Prioridade (**Figura 10 B**), compiladas a partir da interseção entre os mapas do segundo limiar anômalo para eU, eTh, eU/eTh, F_U e Ud, restringiu a pesquisa mineral aos litotipos das formações *Argylla* e *Corella*, próximos a Mina *Mary Kathleen*. A interseção derivada dos mapas de limiares para eU, eTh e F_U foram definidas como áreas de Segunda Prioridade (**Figura 10 C**). Esses resultados são corroborados pela existência de duas ocorrências de U, de 18 e 25 ppm.

A sobreposição das áreas anômalas derivadas do terceiro limiar ($\mu+3*\sigma$) encerra os Granitos *Burstall* e *Wonga*, além da Formação *Argylla* (**Figura 11 A**). As áreas de Primeira Prioridade (**Figura 11 B**), delimitadas pela interseção dos mapas anômalos de eU (15.09 ppm), eTh (37.268), eU/eTh (1.115), F_U (108.84) e Ud (1.03), encontram-se nas proximidades de *Mary Kathleen*. Áreas de Segunda Prioridade (**Figura 11 C**), definidas pela interseção dos mapas anômalos de eU (15.09 ppm), eTh (37.268 ppm) e F_U (108,84), corroboram com uma ocorrência de U de 25 ppm circunscrita ao Granito *Burstall*. Os mapas de limiares para eU/eTh (1.115) e Ud (1.03) correlacionam-se a uma ocorrência de 45 ppm mensurada na Formação *Corella*.

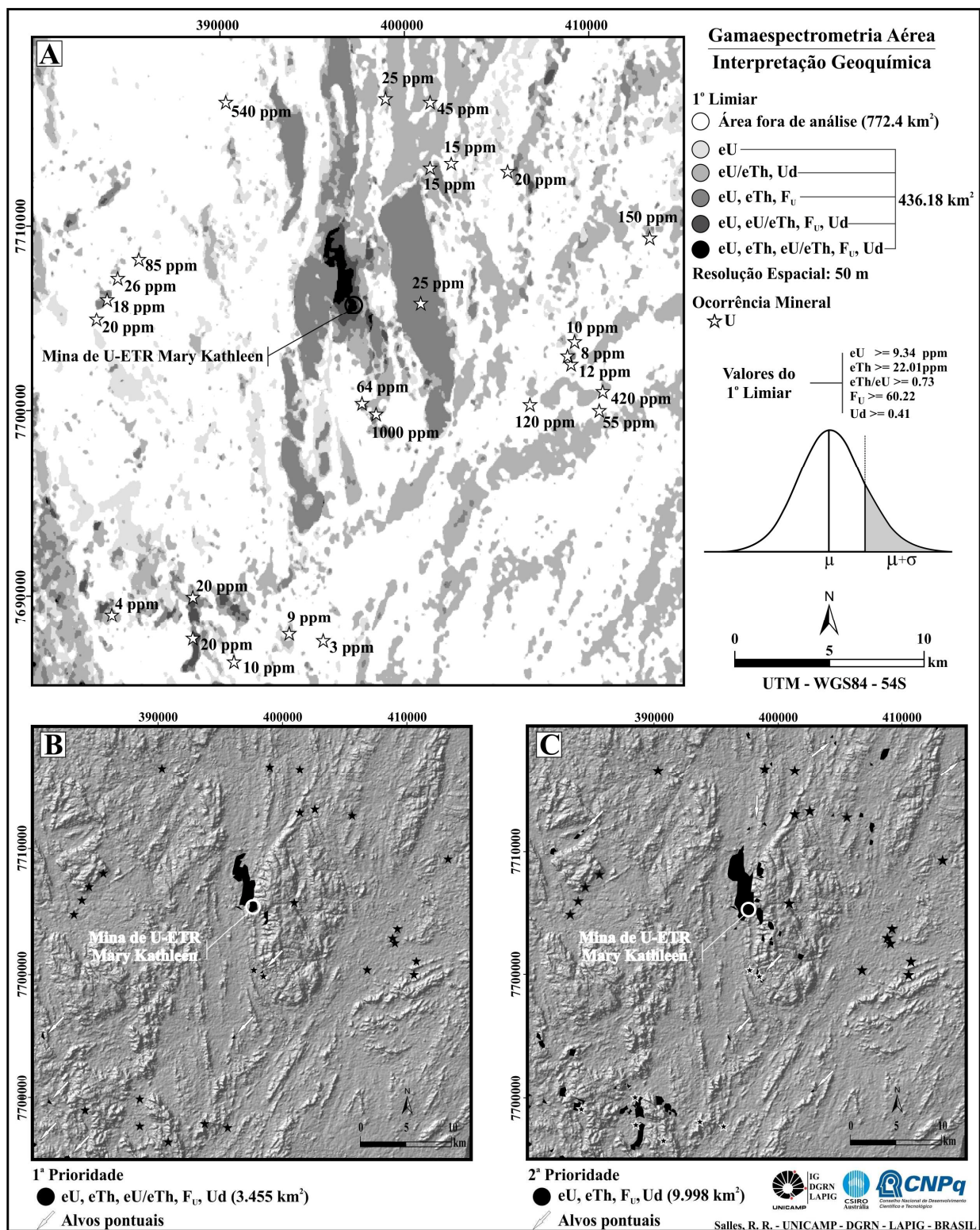


Figura 9. (A) Sobreposição dos primeiros limiares ($\mu + \sigma$) de eU, eTh, eU/eTh, F_U e Ud. Áreas definidas como de Primeira Prioridade (B) e Segunda Prioridade (C) para a pesquisa mineral. O mapa de Primeira Prioridade, compilado a partir da interseção dos mapas anômalos de eU, eTh, eU/eTh, F_U e Ud, se mostrou mais restritivo em relação ao mapa de Segunda Prioridade, compilado a partir da interseção dos mapas anômalos de eU, eU/eTh, F_U e Ud.

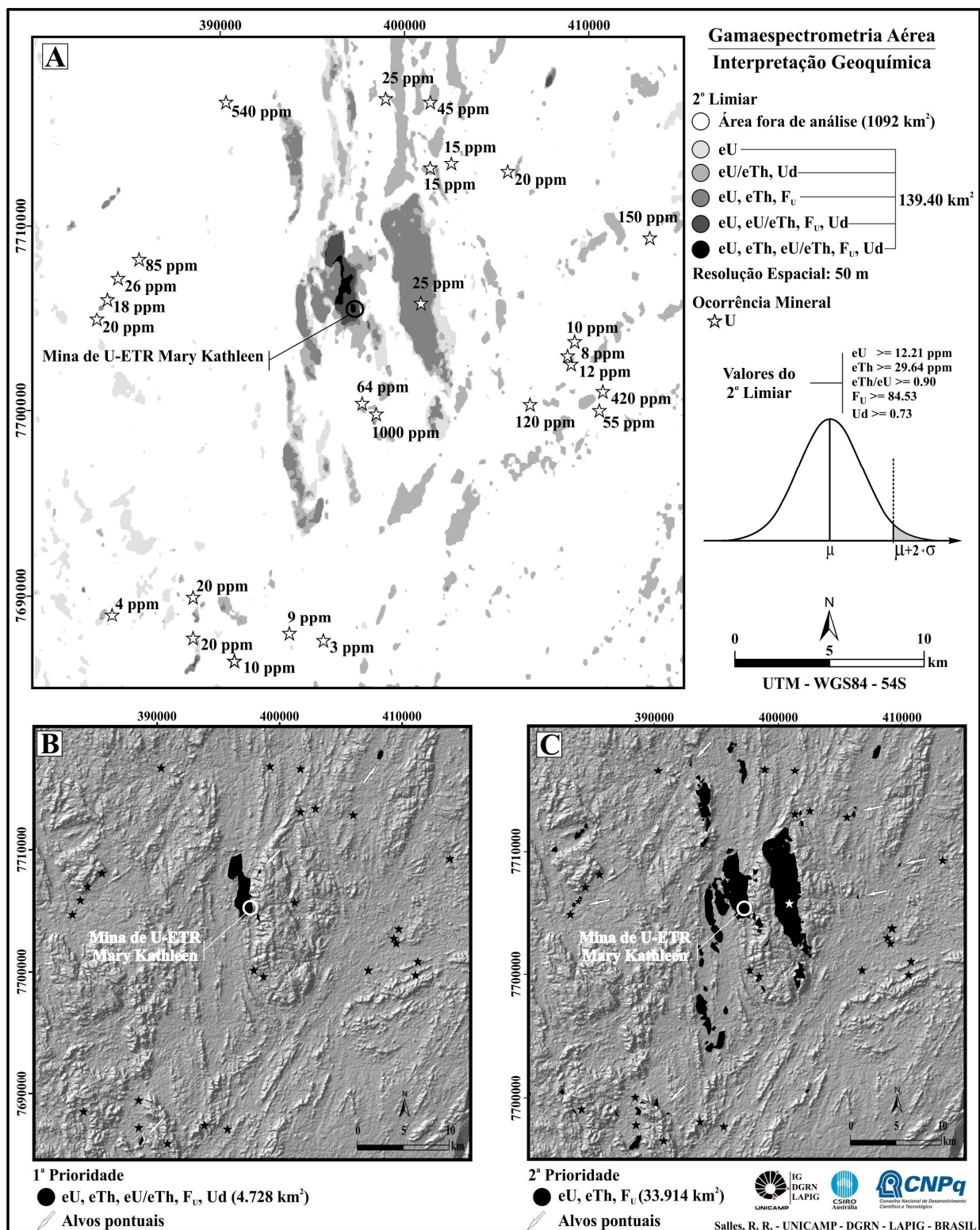
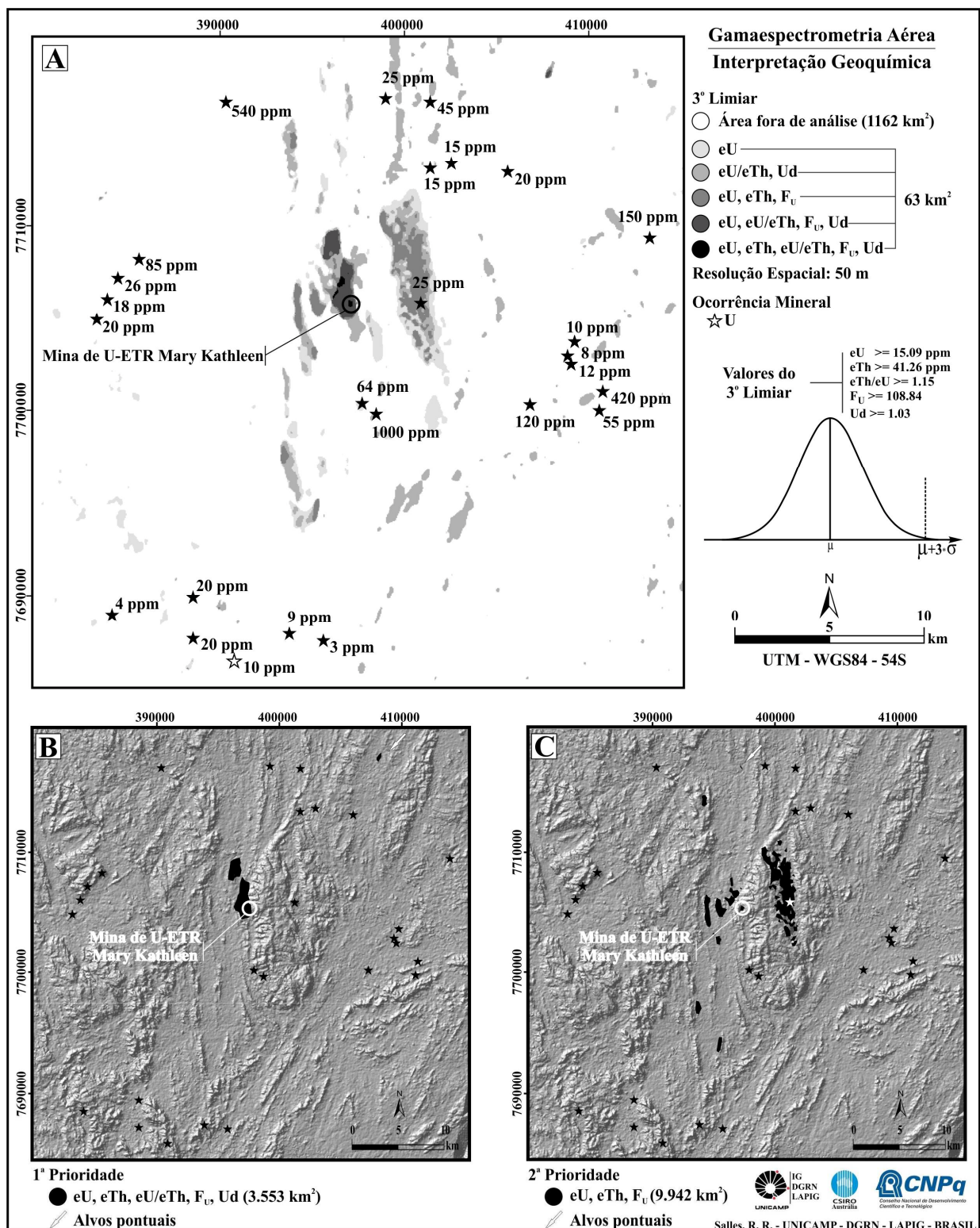


Figura 10. (A) Sobreposição dos mapas referente ao segundo limiar ($\mu+2\sigma$) para eU, eTh, eU/eTh, F_U e Ud. (B) O mapa de Primeira Prioridade, compilado pela interseção dos mapas anômalos de eU, eTh, eU/eTh, F_U e Ud, restringiu a pesquisa mineral aos litotipos próximos da Mina *Mary Kathleen*. (C) Áreas de Segunda Prioridade foram estabelecidas pela interseção dos mapas anômalos de eU, eTh e F_U. Áreas mais representativas ocorrem no domínio central da área de estudo.



7.4. MODELAGEM FUZZY

As pertinências ($\mu_c(x)$) para as Suítes de Urânio (**Figura 12**) e Potássio (**Figura 13**) foram definidas pelas funções *Fuzzy Large* e *Small*, e posteriormente, integrados pelos operadores *Fuzzy*. Assim, ficou estabelecido para as variáveis de espalhamento ($f1$) e *midpoint* ($f2$) os valores listados na **Tabela 6**.

Tabela 6. Valores de pertinência definidos para as Suítes de Urânio e Potássio.

Suíte de Urânio			Suíte de Potássio		
Mapas	Espalhamento ($f1$)	<i>Midpoint</i> ($f2$)	Mapas	Espalhamento ($f1$)	<i>Midpoint</i> ($f2$)
eU	10	9.17	%K	10	2.68
eTh	10	13.13	eTh/%K	10	5.49
eU/eTh	10	0.50	F _K	10	1.34
eU/%K	10	2.5	Kd	10	0.60
F _U	10	175.73			
Ud	8	0.75			

Segundo Shives *et al.* (2000) as baixas razões eTh/%K estão associadas a zonas de alteração potássica. O mapa derivado desta razão foi utilizado para distinguir variações normais de potássio de zonas potencialmente alteradas nas proximidades de vários tipos de depósitos no Canadá. Logo, os menores valores desta razão receberam as maiores pertinências *fuzzy* pelo operador *Fuzzy Small*.

Selecionar o valor de espalhamento apropriado é um processo subjetivo. Esta tarefa depende do intervalo de valores do conjunto de dados a ser fuzzificado. Destaca-se que o número de classes *fuzzy* é inversamente proporcional aos valores do espalhamento. Entretanto, é possível definir valores de espalhamentos coerentes. Para isso, este estudo fez uso (i) da análise conjunta das ocorrências de U, (ii) da correlação dessas ocorrências a valores aeroradiométricos específicos e (iii) da análise sistemática da estatística descritiva para os canais eU, eTh e %K.

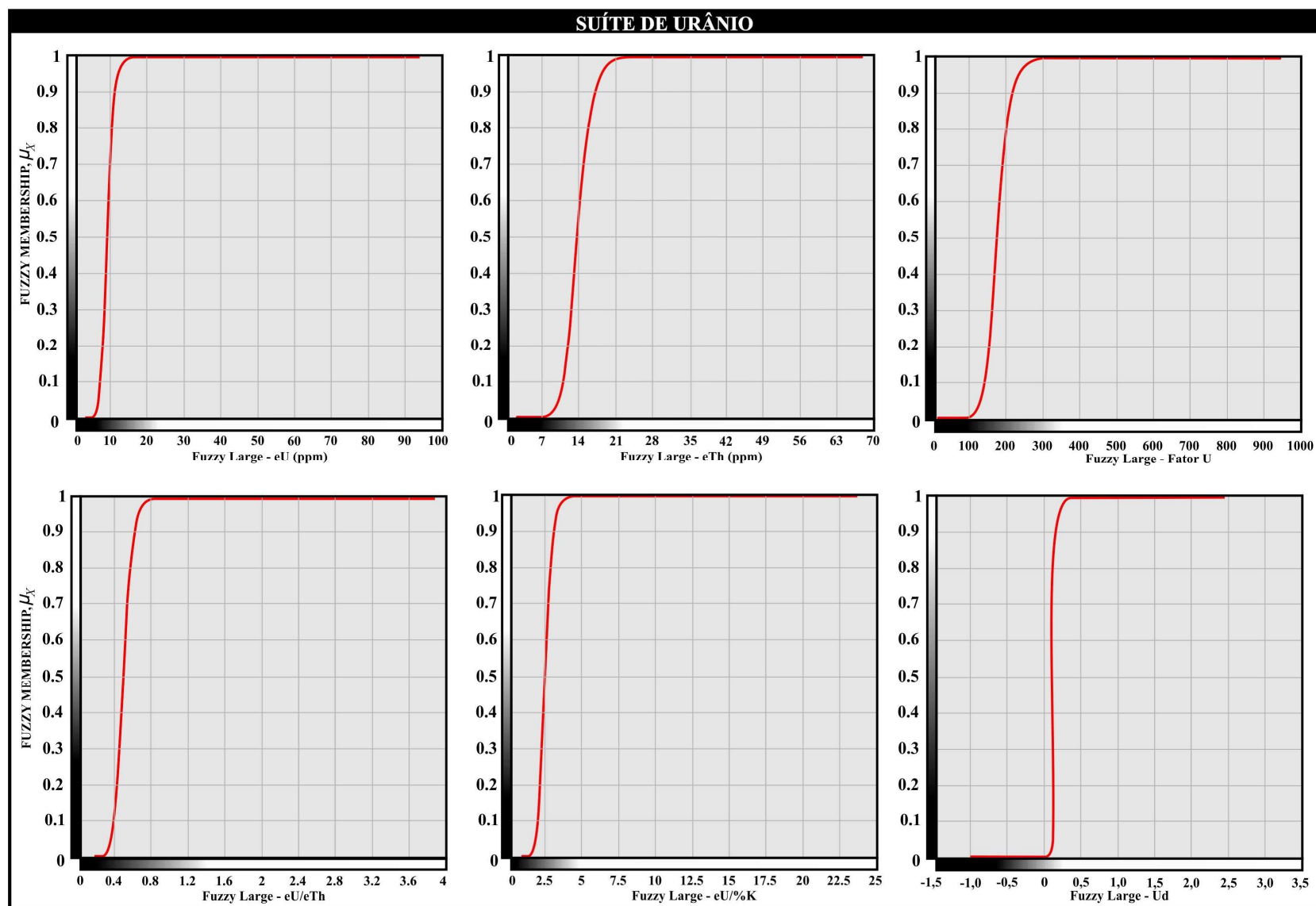


Figura 12. Fuzzificação do conjunto de dados definido como Suíte de Urânio. Para o radioelemento eU e para as razões e índices derivados dos dados aeroradiométricos foi utilizada a função de pertinência *Fuzzy Large* do programa ArcSDM. As curvas foram compiladas no programa Matlab.

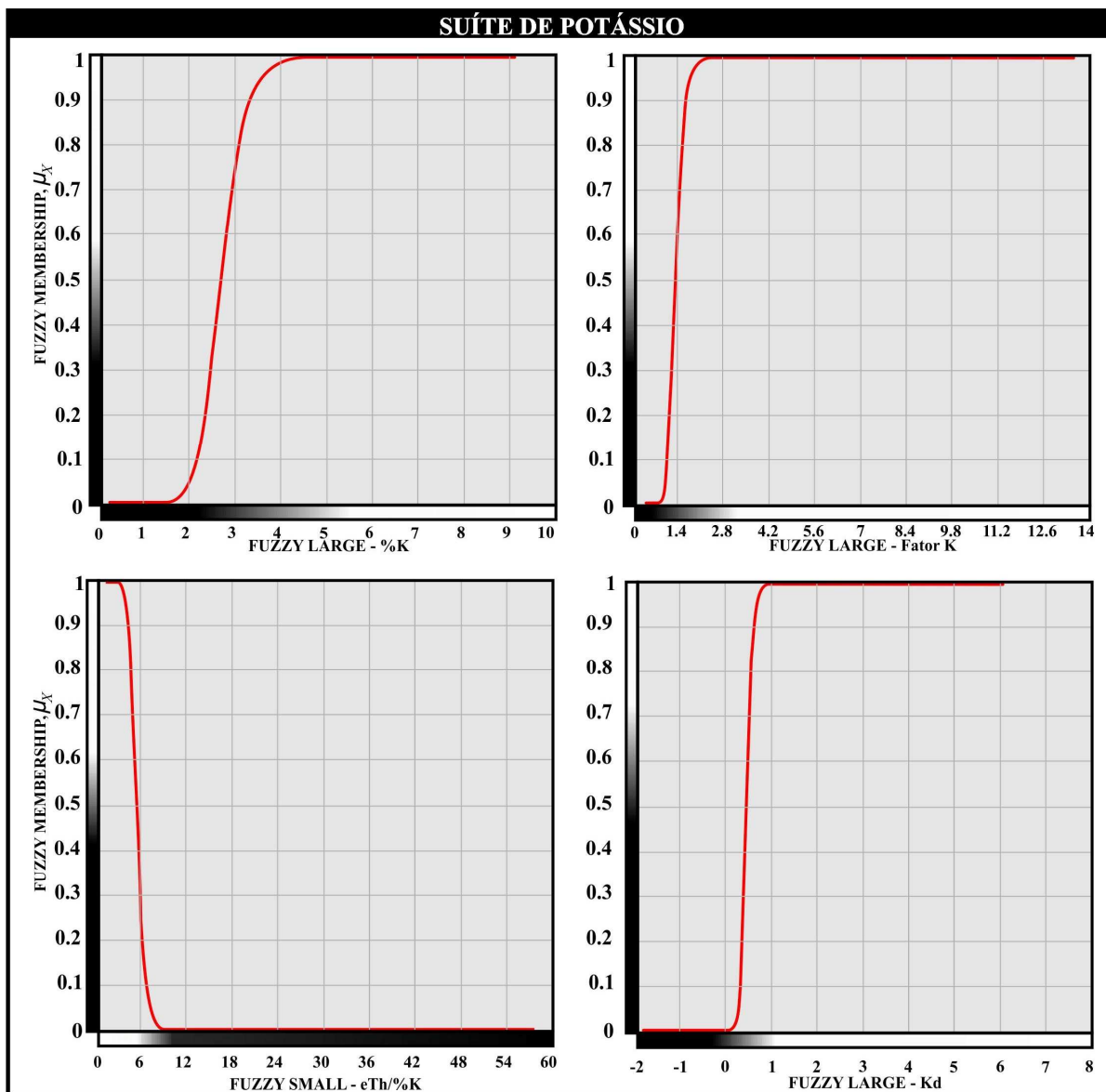


Figura 13. Fuzzificação da Suíte de Potássio. As pertinências da razão eTh/%K foram definidas por meio da função *Fuzzy Small* visto a associação dos menores valores desta razão a zonas com alteração potássica (Shives *et al.* 2000). Para os mapas %K, Fator F_K e Kd foi utilizada a função *Fuzzy Large*.

7.4.1. ÁREAS ANÔMALAS EM URÂNIO

O mapa compilado pelo operador *Fuzzy Product* para a Suíte de Urânio resultou em áreas aqui definidas como áreas de anomalias uraníferas (**Figura 14 A**). Este mapa apresentou um panorama bastante oportuno para as atividades de pesquisa mineral, pois novos alvos foram identificados. Destaca-se o domínio central, onde o *Fuzzy Product* realçou um cenário prospectivo ao longo de um *trend* N-S com valores de maior pertinência, concomitante aos limites da Suíte Granítica Wonga (PLgw) e a maior

parte da Suíte Granítica *Burstall* (PLgwb). Subordinadamente, correlacionam-se a este mapa os litotipos das formações *Argylla* (PLea/b) e *Corella* (PLkc), principalmente entorno da Mina *Mary Kathleen*. Aproximadamente a 20 km para SW de *Mary Kathleen*, observam-se áreas de alta prospectividade.

Nota-se correlação direta com o sítio da Mina *Mary Kathleen* aos maiores valores de pertinência *fuzzy*. Também, uma ocorrência de 25 ppm, mensurada nos domínios da Suíte Granítica *Burstall*, se correlaciona aos valores de maior pertinência. Outras áreas próximas a ocorrências de U conhecidas (**Figura 14 B, C e D**) foram realçadas com boa precisão.

7.4.2. ÁREAS ANÔMALAS EM POTÁSSIO

Com o propósito de caracterizar assinaturas de alteração hidrotermal potássica, além da possibilidade de correlacionar este mapa com as ocorrências de U existente e a Mina de U-ETR *Mary Kathleen*, o mapa de %K e outros mapas que integram a Suíte Potássio foram integrados pelo operador *Fuzzy Product*. O mapa derivado dessa operação (**Figura 15**) mostra que as Suítes Graníticas *Wonga* e *Burstall* se correlacionam à áreas de menor pertinência *fuzzy* para K, sugerindo um empobrecimento desse elemento. Os litotipos da Formação *Corella* e do Jaspilito *Overhang* afloram correlacionam-se a áreas de alta pertinência *fuzzy*. A Formação *Argylla* e a Formação *White Blow* corroboram ao intervalo de valores de pertinência intermediários a altos. Os *skarns*, enriquecidos em U, se correlacionam a valores *fuzzy* baixos. Subordinadamente ocorrem domínios isolados deste litotipo em áreas com alta pertinência *fuzzy*. Este fato pode está associado à restrição espacial dos *skarns*.

Com relação às ocorrências de U, 16 ocorrências correlacionam-se ao mapa de possibilidade *fuzzy* para a Suíte de Potássio, das quais 8 ocorrências corroboram às maiores pertinências.

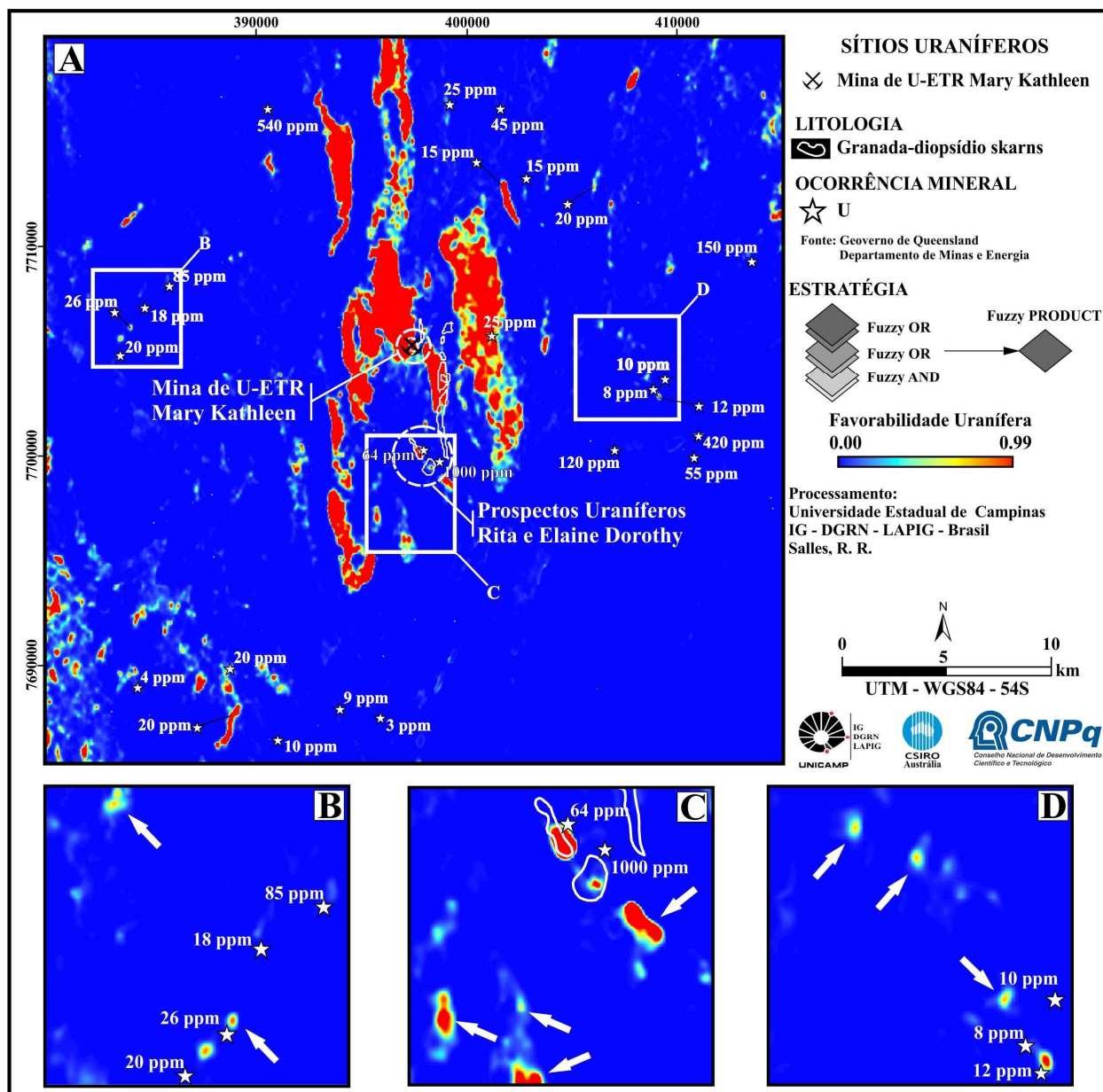


Figura 14. (A) Áreas anômalas em U realçadas pelo operador *Fuzzy Product* - 12 ocorrências de U correlacionam-se as áreas anômalas realçadas. Os detalhes A, B e C exibem a correlação de áreas anômalas em U em relação a alvos previamente conhecidos, além de novos alvos com potencial prospectivo.

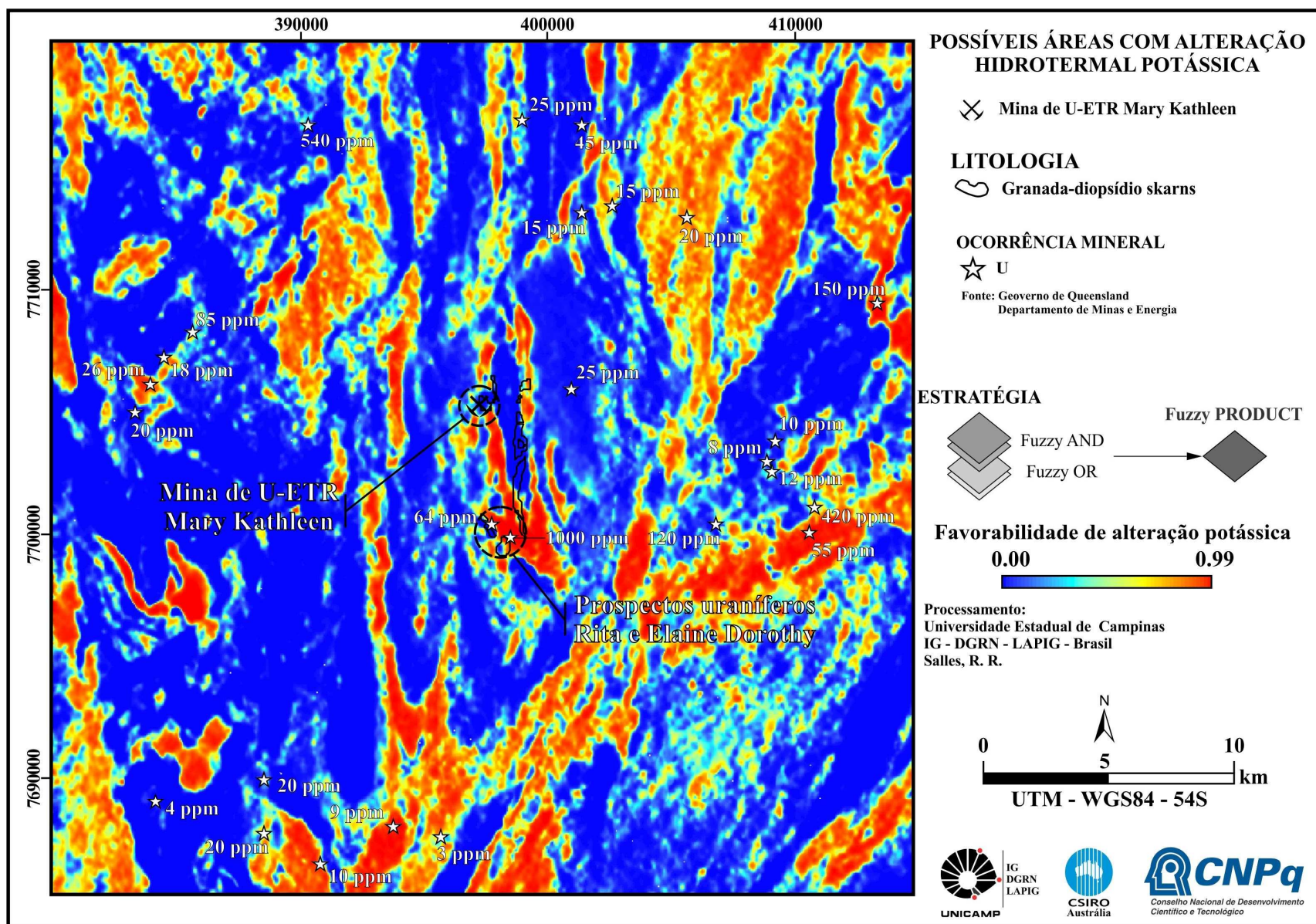


Figura 15. Áreas anômalas em Potássio. Das 27 ocorrências de U, 12 se correlacionam às maiores pertinências.

7.4.3. MAPA DE PROSPECTIVIDADE URANÍFERA

O mapa de Prospectividade Uranífera para a área da Mina de U-ETR *Mary Kathleen* (**Figura 16**) foi compilado pela integração dos mapas de Urânio Anômalo e Potássio Anômalo a partir do operador *Fuzzy Gamma*. A fim de compilar um mapa “conservador”, ou seja, com áreas anômalas restritas no cenário prospectivo de *Mary Kathleen*, o valor γ utilizado foi de 0.5. A escolha desse valor determinou um cenário prospectivo com tendências para o termo *Fuzzy Algebraic PRODUCT*.

Os intervalos de pertinência *fuzzy* variaram de 0.00 a 0.96. Posteriormente, este mapa foi classificado em quatro classes semânticas, definidas como: baixa (0.00 – 0.25), média (0.26 – 0.47), alta (0.48 – 0.72) e altíssima prospectividade (≥ 0.73). A maioria das células resultantes da operação *Fuzzy Gamma* definiu áreas não prospectivas classificadas como de baixa prospectividade. Estas áreas compreendem cerca de ~95% da área de estudo. Entretanto, é importante considerar as ocorrências correlatas a esta classe. As classes de média a altíssima prospectividade perfazem ~4.6% da área de estudo.

O cenário resultante deste processamento, ao encerrar treze ocorrências de U, retrata o ambiente prospectivo de forma plausível. Neste contexto, a Mina de U-ETR *Mary Kathleen* corrobora com a classe de alta prospectividade, onde os valores *fuzzy* compreendem o intervalo de 0.48 a 0.72.

A capacidade preditiva da Lógica *Fuzzy* é demonstrada de fato nas classes definidas como de alta e altíssima prospectividade. A prova disto é a correlação da Mina *Mary Kathleen* a esta classe. No entanto, áreas classificadas no final do intervalo da classe média não devem ser descartadas, pois podem revelar metalotectos interessantes para a pesquisa uranífera.

O modelo possibilístico evidenciou um cenário de alta prospectividade uranífera no domínio central da área de estudo. Outros sítios de interesse para a pesquisa mineral foram realçados. Visto que o segmento mineral, assim como os investimentos nesse setor é muito seletivo, a restrição espacial das áreas de alta e altíssima prospectividade atribuíram a este mapa especial relação com outras atividades da pesquisa mineral, tornando viável a expedição de campo e o incremento de programas de prospecção geoquímica focados nas áreas previamente estabelecidas.

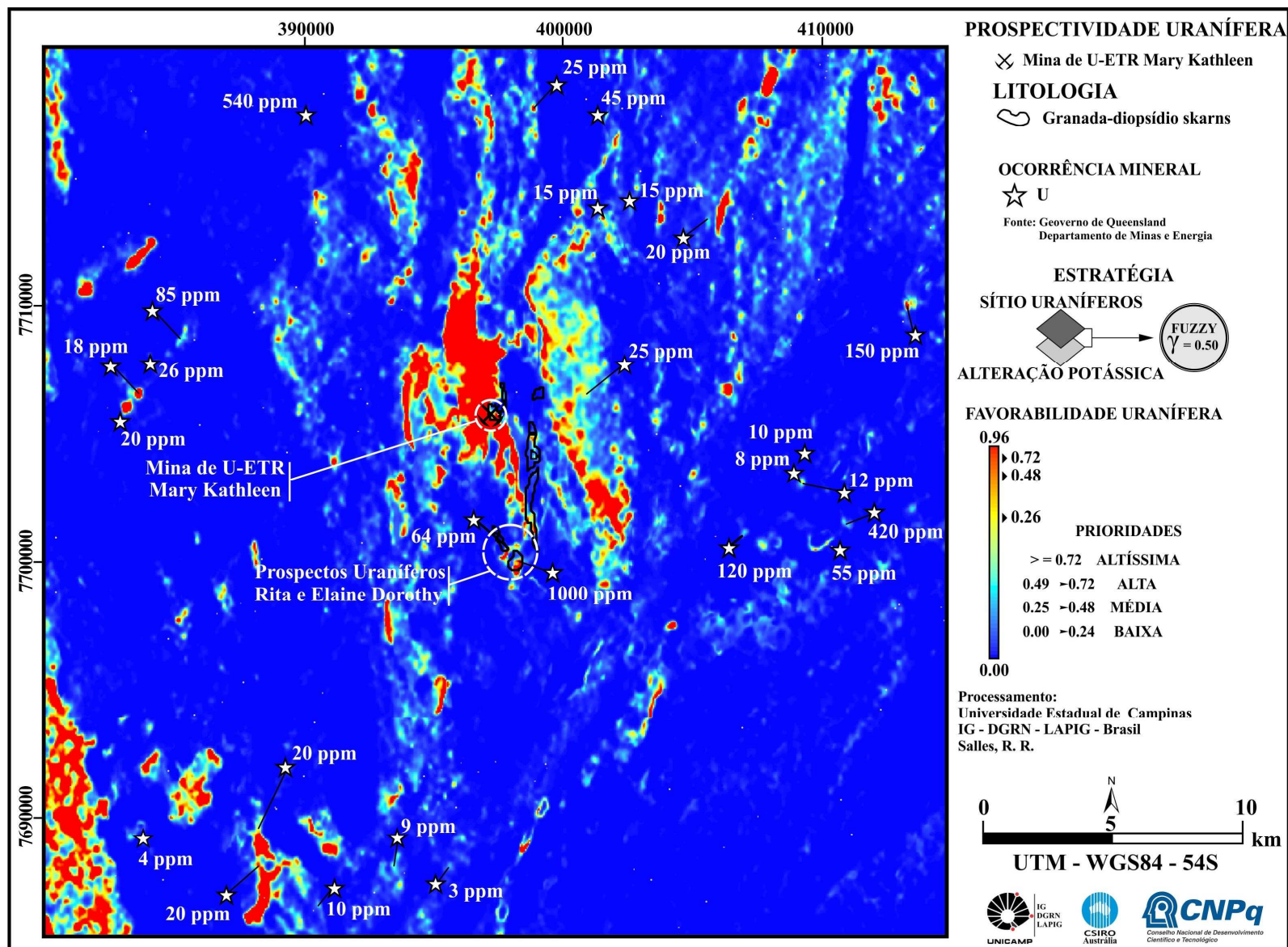


Figura 16. Áreas de prospectividade uranífera evidenciadas a partir da integração dos mapas de Urânio Anômalo (Fuzzy Product) e Potássio Anômalo (Fuzzy Product). O valor γ definido para a fuzzificação foi 0,5.

8. CONCLUSÕES

Os métodos quantitativos de análise e integração aqui discutidos revelaram ser ferramentas muito úteis para manipular dados aeroradiométricos em ambiente SIG.

A geoestatística descritiva, juntamente com o recurso visual PP-Plot, foram úteis para o estudo da variabilidade dos canais eTh e %K, em especial o canal eU onde foram selecionadas áreas específicas para os estudos estatístico. Por meio da análise gráfica notou-se padrões de distribuições gerais e particulares para os subconjuntos definidos para canal eU. Como os canais gamaespectrométricos foram tratados aqui como dados geoquímicos, a modelagem PP-Plot também se mostrou eficaz em aferir o método de interpolação mínima curvatura, pois dados geoquímicos raramente obedecem às regras de Distribuição Gaussiana. Dentro desse contexto, foi possível estimar valores de concentração (ppm) que melhor representam valores anômalos no entorno da Mina de U-ETR *Mary Kathleen*.

O rigor dos mapas prospectivos derivados dos limiares $\mu + \sigma$, $\mu + 2\sigma$ e $\mu + 3\sigma$ foi uma característica adversa, não permitindo graduar as áreas cartografadas em níveis hierárquicos de interesse prospectivo. A sobreposição dos mapas anômalos de eU, eTh, eU/eTh, F_U e U_d para os respectivos limiares mapeou de forma extensiva a área de estudo. Isso inviabilizou o uso conjunto desses mapas para tomada de decisão quanto a estratégias prospectivas para a pesquisa uranífera. Porém, a interseção desses mapas pelo operador booleano *AND* flexibilizou essa rigidez. Diante disso foi possível definir áreas aqui rotuladas como de Primeira e Segunda Prioridade para os três limiares anômalos. Este método, por se tratar de uma aplicação do tipo *Crisp*, onde 0 é falso e 1 verdadeiro, quando aplicado apenas para um único conjunto de dado, não traz informações substanciais para o especialista em prospecção mineral, inviabilizando a tomada de decisões.

Um recurso interessante intrínseco a Lógica *Fuzzy* foi a rapidez da integração para compilar mapas preditivos, permitindo a experimentação de valores evidenciais. A análise estatística auxiliou na determinação dos valores mais coerentes para esta modelagem.

O mapa derivado do modelo *Fuzzy Product* para a Suíte de Urânio gerou um cenário prospectivo bastante satisfatório - 12 ocorrências de U mostraram-se espacialmente coincidentes com as áreas anômalas, incluindo a Mina de U-ETR *Mary Kathleen*. Nota-se boa correlação dos *skarns* enriquecidos em U-ETR aos altos valores *fuzzy* compreendidos entre o intervalo [0.50 – 0.99]. A Suíte de Potássio apresentou um mapa generalista ao realçar áreas anômalas de forma extensiva. Todavia, 14 ocorrências de U se correlacionam ao intervalo de pertinência *fuzzy* [0.45 – 0.99].

Ao comparar as áreas da Mina *Mary Kathleen* e dos prospectos uraníferos *Rita* e *Elaine Dhoroty* correlatas ao mapa derivado da integração da Suíte de Potássio, nota-se que *Rita* e *Elaine Dhoroty* podem ser *endmembers* diferentes de *Mary Kathleen*.

A Lógica Fuzzy permitiu compilar dois mapas bastante interessantes para a atividade de pesquisa mineral para urânio. O primeiro mapa, intitulado de Sítios Uraníferos (**Figura 14**), foi derivado da integração apenas de mapas gamaespectrométricos que realçasse o U, enquanto que para o mapa de Prospectividade Uranífera foi considerado também os mapas da Suíte de Potássio. Ambos delimitaram área de interesse prospectivo.

O mapa de Prospectividade Uranífera, compilado pelo operador *Fuzzy Gamma*, realçou alvos onde se sugere a pesquisa mineral de detalhe, além do empenho da indústria mineira para aplicar outras técnicas prospectivas nessas áreas. As principais ocorrências de urânio, a Mina U-ETR *Mary Kathleen* e os prospectos uraníferos *Rita* e *Elaine Dorothy* corroboram o modelo possibilístico *Fuzzy*.

Como premissa básica na integração de dados com foco na prospecção mineral, os dois métodos aqui abordados identificaram áreas com ocorrências de U já conhecidas. Considerando tal concordância, se os mesmos métodos e técnicas de pesquisa aqui abordados fossem aplicados na década de 1950, aliados posteriormente ao trabalho de prospecção geoquímica de detalhe, a Mina de U-ETR *Mary Kathleen* teria sido descoberta de sucesso.

Como os mapas de prospectividade uranífera foram derivados de uma única fonte - a aerogamaespectrometria - a adição de novos dados prospectivos, como litogeoquímicos, litoestruturais, dentre outros - podem contribuir de forma positiva na construção de um cenário prospectivo mais robusto para a área da Mina de U-ETR *Mary Kathleen*.

Ao avaliar previamente a favorabilidade uranífera da área de estudo, estes métodos apresentaram vantagens competitivas sobre outros métodos e técnicas convencionais ou clássicas. Assim, esta estratégia deve ser introduzida nas atividades de pesquisa mineral, em especial a uranífera, como ferramenta de suporte a tomada de decisões. A dependência do sucesso dessas abordagens estará diretamente ligada ao grau de conhecimento a respeito do modelo empírico-conceitual considerado. Entretanto, o “grau de liberdade” oferecido pela Lógica *Fuzzy* é uma característica singular e permite um contínuo aperfeiçoamento do modelo possibilístico.

Os mapas prospectivos, derivados dos métodos dos limiares $\mu+\sigma$, $\mu+2*\sigma$ e $\mu+3*\sigma$ e Lógica *Fuzzy*, ao se correlacionarem com o sítio da Mina de U-ETR *Mary Kathleen* e a ocorrências de U previamente conhecidas, demonstraram consistência e são matematicamente plausíveis.

Vale comentar que este estudo simula a realidade prospectiva de muitos países, em especial áreas remotas no Brasil, como a Amazônia, onde nem sempre é possível ter acesso a informações geológicas que contribuam para a construção de mapas de favorabilidade mineral.

Acknowledgements

This research was supported by the *Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico* (CNPq – Brazil) and *Australian* Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO – Australia). We would like to thank BETTS, P.G. (Monash University, Australia), BLENKINSOP, T.G. (James Cook University, Australia), OLIVER, N. H., HIDAKA, H., XAVIER, C. (Department of Mines and Energy – Queensland) for providing both prompt answers to our questions and relevant papers. Also, we would like to thank MAL, J. and TANG, J. of the Geological Survey of Queensland for providing a wealth of geologic, geophysical and geochemical data.

Referências Bibliográficas

- Adshead-Bell, N. H. 1998. Evolution of the Starra and Selwyn high-strain zones, Eastern fold belt, Mount Isa Inlier; implications for Au-Cu mineralization. ***Economic Geology***, v. 93:1450–1462.
- American Geological Institute. 2007. Glossary of Geology. <http://www.agiweb.org/pubs/glossary/>. Acesso em: 09/2009. 03:00 AM.
- An, P. ; Moon, W. M. ; Rencz, A. 1991. Application of fuzzy set theory to integrated mineral exploration. ***Canadian Journal of Exploration Geophysics***. v.27:1–11.
- Asfahani, J. ; Aissa, M. ; Al-Hent, R. 2005. Statistical factor analysis of aerial spectrometric data, Al-Awabed area, Syria: a useful guide for phosphate and uranium exploration. ***Applied Radiation and Isotopes***, v.62:649–661.
- Asfahani, J. ; Aissa, M. ; Al-Hent, R. 2009. Uranium statistical and geological evaluation of airborne spectrometric data in the Al-Awabed region and its surroundings (Area-3), Northern Palmyrides, Syria. ***Applied Radiation and Isotopes***, v.67:654–663.
- Austin, J. R. ; Blenkinsop, T. G. 2008. The Cloncurry Lineament: Geophysical and geological evidence for a deep crustal structure in the Eastern Succession of the Mount Isa Inlier. ***Precambrian Research***, v.168:50–68.
- Barreto Neto, A. A. ; Souza Filho, C. R. 2008. Application of fuzzy logic to the evaluation of runoff in a tropical watershed. ***Environmental Modelling & Programa***, v.23:1–12.
- Best, M. G. 2007. ***Igneous and Metamorphic petrology***. Blackwell Scienc. 2nd ed., pp. 430 e 465.
- Betts, P. G. ; Lister, G. S. ; O’Dea, M. G. 1998. Asymmetric extension of the Middle Proterozoic lithosphere, Mount Isa terrane, Queensland, Australia. ***Tectonophysics***, v.296:293–316.
- Betts, P. G. ; Giles, D. ; Mark, G. ; Lister, G. S. ; Goleby, B. R. ; Aillères, L. 2006. Synthesis of the Proterozoic evolution of the Mt Isa Inlier. ***Australian Journal of Earth Sciences***, v.53:187–211.
- Betts, P.G. ; Goleby, B. R. 2006. Mt Isa tectonics. ***Australian Journal of Earth Sciences***, v.52:1–3.
- Bierlein, F. P. ; Black, L. P. ; Hergt, J. ; Mark, G. 2008. Evolution of Pre-1.8 Ga basement rocks in the western Mt Isa Inlier, northeastern Australia—Insights from SHRIMP U–Pb dating and *in-situ* Lu–Hf analysis of zircons. ***Precambrian Research***, v.163:159–173.
- Blenkinsop, T. G. ; Huddleston-Holmes, C. R. ; Foster, D. R. W. ; Edmiston, M. A. ; Lepong, P. ; Mark, G. ; Austin, J. R. ; Murphy, F. C. ; Ford, A. ; Rubenach, M. J. 2007. The crustal scale architecture of the Eastern Succession, Mount Isa: The influence of inversion. ***Precambrian Research***, v.163:31–49.
- BOM, Berau of Meteorology. 2009. Australia Government. Disponível em: www.bom.gov.au. Acessado em 20 fev 2009.

- Bonham-Carter, G. F. 1996. **Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS**. Pergamon, Ontario, 1st. ed., 391 p.
- Budd, A. R. ; Wyborn, L. A. I. ; Bastrakova, I. V. 2001. The Metallogenic Potential of Australian Proterozoic Granites, Record 2001/12. Australian Government - Geoscience Australia. http://www.ga.gov.au/about/corporate/ga_authors/prot_granites/province_reports.jsp. Acesso em: 10/2008. 2h PM
- Bussab, P. A. ; Morettin, W. O. **Estatística Básica: Métodos Quantitativos**. 4.^a ed. São Paulo: Atual Editora. 321 p.
- Carranza, E. J. M. 2009. **Geochemical Anomaly and Mineral Prospectivity Mapping in GIS – Handbook of exploration and Environmental Geochemistry**. Amsterdam: Elsevier, v.11, 347 p.
- de Smith, M. J. ; Goodchild, M. F. ; Longley, P. A. 2007. **Geospatial Analysis: A Comprehensive Guide to Principles, Techniques, Programs tools**. 1st. ed., Matador (Troubador Publishing Ltd), London, 394 p.
- D’Ercole, C. ; Groves, D. I. ; Knox-Robinson, C. M. 2000. Using fuzzy logic in a Geographic Information System environment to enhance conceptually based prospectivity analysis of Mississippi Valley-type mineralization. **Australian Journal of Earth Sciences**, v.47:913–927.
- Demicco, R. V. ; Klir, G. 2003. **Fuzzy Logic in Geology**. California : Elsevier Academic Press, 366 p.
- Davis, J. C. 1986. **Statistics and data analysis in geology**. John Wiley & Sons. 2nd, 615 pg.
- Dickson, B. L. ; Scott, K. M. 1997. Interpretation of aerial gamma-ray surveys – adding the geochemical factors. **Journal of Australian Geology & Geophysics**, v.17:187–200.
- Duncan, R. J. ; Wilde, A. R. ; Bassano, K. ; Maas, R. 2006. Geochronological constraints on tourmaline formation in the Western Fold Belt of the Mount Isa Inlier, Australia: Evidence for large-scale metamorphism at 1.57 Ga?. **Precambrian Research**, v.146: 120–137
- Durrance, E. M. 1986. **Radioactivity in Geology: principles and applications**. England: John Wiley & Sons, Ellis Horwood series in geology, 432 p.
- Einaudi, M. T. ; Burt, M. D. 1982. Introduction-Terminology, Classification, and Composition of Skarn Deposits. **Economic Geology**, v.77:745–754.
- Efimov, A. V. 1978. Multiplikativniy pokazatel dlja vydeleniya endogennykh rud aerogamma-spectrometricheskimi dannymi, in *Metody rudnoj geofiziki*: Lenigrad, Nauchno-proizvodstvennoye obiedinenie Geofizika Ed., p. 59–68.
- Foster, D. R. W. ; Austin, J. R. 2008. The 1800–1610 Ma stratigraphic and magmatic history of the Eastern Succession, Mount Isa Inlier, and correlations with adjacent Paleoproterozoic terranes. **Precambrian Research**, v.163:7–30.
- Ford, A. ; Blenkinsop, T. G. 2008a. Evaluating geological complexity and complexity gradients as controls on copper mineralisation, Mt Isa Inlier. **Australian Journal of Earth Sciences**, v.55:13–23.

- Ford, A. ; Blenkinsop, T. G. 2008b. Combining fractal analysis of mineral deposit clustering with weights of evidence to evaluate patterns of mineralization: Application to copper deposits of the Mount Isa Inlier, NW Queensland, Australia. **Ore Geology Reviews**, v.33:435– 450.
- Fu, B. ; Baker, T. ; Oliver, N. H. S. ; Williams, P. J. ; Ulrich, T. ; Mernagh, T. P. ; van Achterbergh, E. ; Ryan, C. G. ; Marshall, L. J. ; Rubenach, M. J. ; Mark, G. ; Yardley, B. W. D. 2004. Regional fluid compositions of the Mount Isa Eastern Succession, NW Queensland, Australia. *in* Barnicoat, A.C. and Korsch, R.J. editors, 2004. **Predictive Mineral Discovery Cooperative Research Centre – Extended Abstracts** from the June 2004 Conference. Geoscience Australia, Record 2004/09, p. 63–66.
- Guilbert, M. J. ; Charles, F. P. Jr. 1996. **The geology of ore deposits**. USA:W.H. Freeman and Company, 5th. ed., 947p.
- Hamed, S. ; El Nabi, A. 1995. Statistical evaluation of airborne Gamma-ray spectrometric data from the Magal-Gabriel area, Sout Desert, Egypt. **Journal of Applied Geophysics**, v.34:47–54.
- Harris, J. R. ; Wilkinson, L. ; Heather, K. ; Fumerton, S. ; Bernier, M. A. ; Ayer, J. ; Dahn, R. 2001. Application of GIS processing techniques for producing mineral prospectivity maps – A case study: Mesothermal Au in the Swayze Greenstone Belt, Ontario, Canada. *Natural Resource Research*, v.10:91–124.
- Hawkes, E. H. ; Webb, J.S. 1962. *Geochemistry in Mineral Exploration*. London: Academic Press, 1st. ed., p. 30.
- Heffernan, V. 2007. Uranium Exploration: A guide for the uninitiated. **Geosoft Earth Explorer** *in* www.earthexplorer.com, p. 12–13.
- Jackson, M. J. ; Scott, D. L. ; Rawlings, D. J. 2000. Stratigraphic framework for the Leichhardt and Calvert Superbasins: review and correlations of the pre-1700 Ma successions between Mt Isa and McArthur River. **Australian Journal of Earth Sciences**, v47: 381–403.
- Jayawardhana, P. M. ; Sheard, S. N. 2000. The use of airborne gamma-ray spectrometry – A case study from Mount Isa inlier, northwest Queensland, Australia. **Geophysics**, v.65:1993–2000.
- Jianping, C. ; Gongwen, W. ; Changbo, H. 2005. Quantitative prediction and evaluation of mineral resource base on GIS: A case study in Sanjiang Region, Southwestern China. **Natural Resources Research**, v.14:285–294.
- Kirkham, R.V. ; Sinclair, W.D. ; Thorpe, R.I. ; Duke, J. M. 1993. **Mineral Deposit Modeling**. Geological Asscoiation of Canada. Special Paper 40. 798 p.
- Knox-Robinson, C. M. 2000. Vectorial fuzzy logic: a novel technique for enhanced mineral prospectivity mapping, with reference to the orogenic gold mineralization potencial of the Kalgoorlie Terrane, Weteren Australia. **Australian Journal of Earth Sciences**, v.47:929–941.
- Koch, Jr., G.S. ; Link, R.F. 1971. **Statistical analysis of geological data**. New York: John Willey & Sons Inc.

- Krumbein, C. W. ; Graybill, A. F. 1965. **An Introduction to Statistical model in geology**. International series in the earth sciences. McGraw-Hill, p. 89–115.
- Laznicka, P. 2006. **Giant Metallic Deposits. Future Sources of Industrial Metal**. New York: Springer Berlin Heidelberg, 736 p.
- Lambert, I. ; Jaireth, S. ; McKay, A. ; Mieztis, Y. 2005. **Why Australia has so much Uranium**. AUSGEO, Issue 80.
- Lenz, D. R. 1998. Mineralized intrusion-related skarn systems. Québec: Mineralogical Association of Canada. Short Course Series, v.26:475–581.
- Licht, O. A. B. 1998. **Prospecção Geoquímica: princípios, técnicas, e métodos**. Rio de Janeiro: CPRM, 236 p.
- Luo, X. ; Dimitrakopoulos, R. 2003. Data-driven fuzzy analysis in quantitative mineral resource assessment. **Computers & Geosciences**, v.29:3–13.
- Maas, R. ; McCulloch, M. T. ; Campbell, H. I. 1987. Sm-Nd Isotope Systematics in Uranium-Rare Earth Element Mineralization at the Mary Kathleen Uranium Mine, Queensland. **Economic Geology**, v. 82:1805–1826.
- Mao, J. ; Bierlein, F. P. 2005. **Mineral Deposit Research: Meeting the global challenge**. Beijing: Springer. Proceeding of the Eighth Biennial SGA Meeting, v.1, 894p.
- Mark, G. ; Foster, D. R. W. 2000. Magmatic-hydrothermal albite-actinolite-apatite-rich rocks form the Cloncurry district, NW Queensland, Australia. **Lithos**, v.51:223–225.
- Mark, G. ; Foster, D. R. W. ; Pollard, P. J. ; Williams, J. P. ; Tolman, J. ; Darvall, M. ; Blake, L. K. 2004. Stable isotope evidence for magmatic fluid input during large-scale Na-Ca alteration in the Cloncurry Fe oxide Cu-Au district, NW Queensland, Australia. **Terra Nova**, v.16:54–61.
- Marshall, L. J. ; Oliver, N. H. S. 2008. Constraints on hydrothermal fluid pathways within Mary Kathleen Group stratigraphy of the Cloncurry iron-oxide-copper-gold District, Australia. **Precambrian Research**, v.163:151–158.
- Masterton, W. L. ; Slowinski, E. J. ; Stanitski, L. C. 1990. **Princípios de Química**. Rio de Janeiro: LTC, 6th ed., p.178.
- Matheson, R. S. ; Searl, R. A. 1956. Mary Kathleen Uranium Deposit, Mount Isa-Cloncurry District, Queensland, Australia. **Economic Geology**, v.51:528–540.
- McDonald, G. D. ; Collerson, K. D. ; Kinny, P. D. 1997. Late Archean and Early Proterozoic crustal evolution of the Mount Isa block, northwest Queensland, Australia. **Geology**, v. 25:1095–1098.
- McKay, A. D. ; Mieztis, Y. 2001. **Australia's uranium resources, geology and development of deposits**. AGSO – Geoscience Australia, Mineral Resource Report 1, 196 p.
- McLaren, S. ; Sandiford, M. ; Powell, R. 2005. Contrasting styles of Proterozoic crustal evolution: A hot-plate tectonic model for Australian terranes. **Geology**, v.33:673–682.

- McLellan, J. G. ; Oliver, N. H. S. 2008. Discrete element modelling applied to mineral prospectivity analysis in the eastern Mount Isa Inlier. **Precambrian Research**, v.163:174–188.
- Meinert, L. D. 1993. Igneous petrogenesis and skarn deposits, *in* Kirkham, R.V., Kirkham, R.V., Sinclair, W.D., Thorpe, R.I., Duke, J.M. **Mineral Deposit Modeling: Geological Association of Canada**, Special Paper 40, p.569–583.
- Meinert, L. D. ; Lentz, D. R. ; Newberry, R. 2000. A Special Issue Devoted to Skarn Deposit. Introduction. **Economic Geology**, v.95: 1183–1184.
- Moon, W. M. 1998. Integration and fusion of geological exploration data: a theoretical review of fuzzy logic approach. **Geoscience Journal**, v.2:175–183.
- Oliver, N. H. S. ; Pearson, P. J. ; Holcombe, R. J. 1985. Chronology of Magmatism, Skarn Formation, and Uranium Mineralization, Mary Kathleen, Queensland, Australia – A Discussion. **Economic Geology**, v.80:513–520.
- Oliver, N. H. S. ; Cleverley, J. S. ; Mark, G. ; Pollard, P. J. ; Fu, B. ; Marshall, L. M. ; Rubenach, M. J. ; Williams, P. J. ; Baker, T. 2004. Modeling the Role of Sodic Alteration in the Genesis of Iron Oxide-Copper-Gold Deposits, Eastern Mount Isa Block, Australia. **Economic Geology**, v.99:1145–1176.
- Oliver, N. H. S. ; Butera, K. M. ; Rubenach, M. J. ; Marshall, L. J. ; Cleverley, J. S. ; Mark, G. ; Tullemans, F. ; Esser, D. 2008. The protracted hydrothermal evolution of the Mount Isa Eastern Succession: A review and tectonic implications. **Precambrian Research**, v.163:108–130.
- Page, R. W. 1983. Chronology of Magmatism, Skarn Formation, and Uranium Mineralization, Mary Kathleen, Queensland, Australia. **Economic Geology**, v.78:838–853.
- Page, R. W. ; Williams, I. S. 1988. Age of the Barramundi Orogeny in northern Australia by means of ion microprobe and conventional U–Pb zircon studies. **Precambrian Research**, 40 – 41, pg. 21 – 36.
- Pirajno, F. ; Bagas, L. 2008. A review of Australia's Proterozoic mineral systems and genetic models. **Precambrian Research**, 166: 54–80.
- Pires, A. C. B. 1995. Identificação geofísica de áreas de alteração hidrotermal, Crixás-Guarinos, Goiás. **Revista Brasileira de Geociências**, v.25:61–68.
- Ray, E. G. ; Dawson, M. K. 1997. Mineralized Skarn in the Canadian Cordillera. *in* Lenz, D.R. 1998. **Mineralized intrusion-related skarn systems**. Québec:Mineralogical Association of Canada. Short Course Series, c.14, 475 p.
- Rayan, G. R. 1979. The Genesis of Proterozoic Uranium Deposits in Australia. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, Vol. 291, No. 1381, **Theoretical and Practical Aspects of Uranium Geology**, pp. 339–353.
- Rao, C. R. 1973. **Linear Statistical Inference and its Applications**. USA:John Wiley & Sons. 2nd, p. 112.
- Reimann, C. ; Filzmoser, P. ; Garret, G. R. 2005. Background and threshold: critical comparison of methods of determination. **Science of the Total Environment**, v.346:1–16.

- Robb, L. 2008. **Introduction to ore-forming process**. Singapore:Blackwell Publishing, 368 p.
- Roquin, C. ; Zeegers, H. 1987. Improving anomaly selection by statistical estimation of background variations in regional geochemical prospecting. **Journal Geochemical Exploration**, v.29:295–316.
- Rose, W. A. ; Hawkes, E. H. ; Webb, J.S. 1979. **Geochemistry in Mineral Exploration**. London: Academic Press, 2nd. ed., p. 36.
- Rubenach, M. J. ; Lewthwaite, K. A. 2002. Metasomatic albitites and related biotite-rich shists form a low-pressure, polymetamorphic terrane, Snake Creek anticline, Mount Isa Inlier, north-eastern Australia: microstructures and P-T-d paths. 2002. **J. Metamorphic Geol.** v20:191– 200.
- Sayab, M. 2006. Decompression through clockwise P–T path: implications for early N–S shortening orogenesis in the Mesoproterozoic Mt Isa Inlier (NE Australia). **J. Metamorphic Geol.**, v.24:89–105.
- Sayab, M. 2008. Correlating multiple deformation events across the Mesoproterozoic NE Australia using foliation intersection axes (FIA) preserved within porphyroblasts. **Gondwana Research**, v.13:331–351.
- Saunders, D. F. ; Burson, R. K. ; Branch, F. J. ; Thompson, K. C. 1993. Relation of thorium-normalized surface and aerial radiometric data to subsurface petroleum accumulations. **Geophysics**, v.58:1417–1427.
- Saunders, D. F. ; Branch, F. J. ; Thompson, K. C. 1994. Tests of Australian aerial radiometric data for use in petroleum reconnaissance. **Geophysics**, v.59:411–419.
- Sawatzky, D. L. ; Raines, G. L. ; Bonham-Carter, G. F. ; Looney, C. G. 2007. Spatial Data Modeller (SDM): ArcMAP 9.2 geoprocessing tools for spatial data modeling using weights of evidence, logistic regression, fuzzy logic and neural networks. Disponível em: <http://www.ige.unicamp.br/sdm/ArcSDM31/>. Acesso em: 10 março 2008. 10h PM.
- SDM, Spatial Data Modeller for ArcGis 9.1. 2010. Softwares FreeWare http://www.ige.unicamp.br/sdm/ArcSDM31/default_e.htm.
- Shives, R. B. K. ; Charbonneau, B. W. ; Ford, L. 2000. The detection of potassic alteration by gamma-ray spectrometry — Recognition of alteration related to mineralization. **Geophysics**, v.65:2001–2011.
- Spikings, R. A. ; Foster, D. A. ; Kohn, B. P. ; Lister, G. S. 2001. Post-orogenic (<1500 Ma) thermal history of the Proterozoic Eastern Fold Belt, Mount Isa Inlier, Australia. **Precambrian Research**, v.109:103–144.
- Tsoukalas, L. H.; Uhrig, R. E. 1997. **Fuzzy and neural approaches in engineering**. New York: John Wiley and Sons, Inc., 587 p.
- Tukey, J. W. 1977. **Exploration Data Analysis**. Massachusetts:Addison-Wesley, Reading, 688 p .
- Walpole, R. E. ; Myers, R. H. ; Myers, S. L. ; Ye, K. 2007. **Probability & Statistics for Engineers & Scientists**. Pearson Education International. 8th ed., 823 p.

- Walters, S. ; Bailey, A. 1998. Geology and Mineralization of the Cannington Ag-Pb-Zn Deposit: An Example of Broken Hill-Type Mineralization in the Eastern Succession, Mount Isa Inlier, Australia. **Economic Geology**, v.93:1307–1329.
- Ward, S. H. 1998. Gamma-ray spectrometry in geologic mapping and uranium exploration in Skinner. **Economic geology**, 70th Anniversary Volume-1905-1980: Econ. Geol. Publ. Co. 840–849.
- Zadeh, L. A. 1965. **Fuzzy Sets**. Information and Control, v.8, p.338-353. Disponível em: <https://www-bisc.cs.berkeley.edu/BISCProgram/default.htm> . Acesso em: 07/2009. 10h.

**APLICAÇÕES DO SCANNER HIPERESPECTRAL HyMap COMO SUPORTE À
PROSPECÇÃO URANÍFERA: ESTUDO DE CASO NA ÁREA DO DEPÓSITO
METAMÓRFICO-HIDROTHERMAL DE U-ETR *MARY KATHLEEN*, NW
QUEENSLAND, AUSTRÁLIA**

Rodrigo dos Reis Salles^{1,2}, Carlos Roberto de Souza Filho², Thomas Cudahy³

¹AngloGold Ashanti Córrego do Sítio SA – Brasil
Gerência de Projetos e Crescimento – Projetos Step Change
sallesgeologia@yahoo.com.br

²Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP/IG
Caixa Postal 6152 – 13083-970 – Campinas-SP, Brasil
beto@ige.unicamp.br

³Mineral Mapping Technology Group
CSIRO Division of Exploration and Mining
thomas.cudahy@csiro.au

RESUMO

O sensoriamento remoto hiperespectral tem sido um importante veículo na geração de mapas aplicados à prospecção mineral de diversas *commodities*. O advento do *scanner* hiperespectral HyMap trouxe dinamismo e sucesso para diversos programas de pesquisa mineral, especialmente na Austrália. O HyMap é um *scanner* aerotransportado e comercial, composto por 126 bandas na faixa espectral VNIR-SWIR [0.4 μm – 2.5 μm], capaz de proporcionar uma combinação de altas resoluções espacial e espectral com alta relação da razão sinal-ruído. Entretanto, existe carência de material que documente os métodos de processamento digital de imagem usado para identificar, classificar e mapear minerais vetores da *commodity* U. Assim, esta pesquisa objetiva caracterizar assinaturas hiperespectrais, nos intervalos entre 0.45 μm a 1.39 μm (VNIR) e 2.0 μm a 2.45 μm , que possam ser utilizadas como vetores de mineralizações de U, considerando como modelo as feições do depósito de U-REE de Mary Kathleen, localizado na região NW de Queensland, Austrália. Formada por terrenos Paleoproterozóicos da Província Metamórfica *Mount Isa*, os litotipos predominantes na área de pesquisa estão representados por rochas intrusivas e seqüências metasedimentares e metavulcanicas metamorfisadas entre as fácies xisto-verde e anfibolito. O mineral de minério uraninita ocorre associado a *skarns* cálcicos enriquecidos principalmente em allanita, andradita, hornblenda, epidoto e diopsídio. O guia de procedimentos para a classificação hiperespectral aqui desenvolvido mostrou ser uma poderosa ferramenta para a prospecção uranífera. Os seguintes métodos foram experimentados: (i) o algoritmo *Reed-Xiaoli Detector* permitiu delimitar *pixels* estatisticamente diferenciados do *background*; (ii) o algoritmo *EFFORT Polishing* realçou feições de absorção correspondente aos minerais primários (epidoto, calcita, hornblenda, andradita e escapolita) e produtos de alteração intempérica (caulinita, montmorillonita e goethita); (iii) a função linear MMF segregou eficientemente as informações relacionadas ao ruído das imagens HyMap, reduzindo a necessidade de cálculos de *software* e *hardware*; (iv) os espectros da goethita e montmorillonita foram comparados aos espectros do *dataset* por meio da classificação supervisionada SAM e (v) o classificador MTMF proporcionou o mapeamento inequívoco dos minerais andradita, epidoto, hornblenda, escapolita, calcita e caulinita. O mapa de abundância de goethita realçou áreas oxidadas a sul da cava da mina. Esta classificação apresentou satisfatória correlação espacial com os resquícios das atividades mineiras da Mina de U-ETR *Mary Kathleen*. As imagens *Rule* e *Ms Score* resultantes dos classificadores SAM e MTMF, quando adicionadas ao espaço de cores RGB, individualizaram áreas com domínios e misturas de minerais cálcio-silicáticos. Os mapas derivados desta classificação apresentaram resultados coerentes com as descrições geológicas, além de situar este estudo na fronteira das aplicações hiperespectrais para prospecção mineral.

Palavras Chave: Urânio, hiperespectral, HyMap, Mina Mary Kathleen, *skarn*, SAM, MTMF

ABSTRACT

Hyperspectral remote sensing has been an important tool for generating maps for mineral exploration of numerous commodities. The advent of the HyMap airborne hyperspectral scanner has brought dynamism and success for several mineral exploration programs, especially in Australia. The HyMap scanner comprises 126 spectral bands in the VNIR-SWIR range [$0.4\ \mu\text{m} - 2.5\ \mu\text{m}$] able to provide a combination of high spatial and spectral resolutions with high signal-to-noise ratio. However, there is an apparent lack in the literature of methods required to identify, classify and remotely map minerals associated to U deposits. Thus, this work aims to characterize hyperspectral signatures in the VNIR [$0.45 - 1.39\ \mu\text{m}$] and SWIR [$2.0\ \mu\text{m} - 2.45\ \mu\text{m}$] wavelengths that can be used to potentially vectorize U mineralizations considering the U-REE Mary Kathleen Deposit, NW, Australia, as a control. The geology within and around the mine comprises Paleoproterozoic rocks of the Mount Isa Province, including granitoids, volcanics and sedimentary sequences metamorphosed at green-schist to amphibolite facies. At Mary Kathleen, uraninite ore occurs in association with skarns and mineral parageneses is allanite+andradite+uraninite. The potential for prospecting uranium in the study area is based on the mineral occurrences of U, Cu and Au, besides the Mary Kathleen Mine, which is currently depleted. The following methods were experimented: (i) the algorithm *Reed-Xiaoli Detector* delimited areas statistically dissimilar; (ii) the EFFORT Polishing enhanced absorption features in the VNIR and SWIR range; (iii) the MNF function segregated the signal from the noise in the HyMap dataset, reducing the spectral dimensionality of the data, thus minimizing the computational requirements for further data processing. (iv) goethite and montmorillonite were mapped unambiguously through the SAM algorithm; (v) the MTMF classifier provided accurate mapping of andradite, epidote, hornblende, scapolite, calcite and kaolinite, and also allowed the enhancement of sites comprising mixtures among these minerals. The goethite abundance map enhanced areas south of the open pit mine. This classification shown the guidelines developed here for extraction of relevant information from the HyMap hyperspectral imagery proved to be a powerful tool for U mineral exploration. This classification showed satisfactory spatial correlation with the remnants of mining activities of Mary Kathleen Mine. The Rule and Ms Score image resulting from classifiers SAM and MTMF, when added to the RGB color space, individualized areas with mixtures of calc-silicate minerals. The maps derived from this classification showed results consistent with the geological descriptions, besides locating the boundary of this study hyperspectral application for mineral exploration.

Key Words: Uranium, hyperspectral, HyMap, Mary Kathleen Mine, skarn, SAM, MTMF

1. INTRODUÇÃO

A partir da década de 1970, após o declínio da taxa de crescimento econômico mundial, e conseqüente escassez de investimentos, os programas de prospecção de várias *commodities* minerais ficaram estagnados até meados da década de 1990. Como legado desta fase, às futuras gerações de geólogos restou uma série de obstáculos relativos à exploração de U (**Figura 1**), principalmente no que diz respeito ao entendimento da gênese, distribuição e forma dessas ocorrências (**Heffernan 2007**). Hoje, a pesquisa mineral, em especial a uranífera, ocupa importante posição nos principais programas de prospecção de recursos naturais no mundo. Portanto, elucidar a gênese dos depósitos de U e encontrar novas ocorrências de viabilidade econômica tem sido desafio efetivo para a prospecção mineral. Aliados a esta difícil tarefa, além das técnicas tradicionais de pesquisa mineral, é preciso um domínio maior dos novos métodos e técnicas de mapeamento indireto, pois estas técnicas permitem discriminar áreas mineralizadas de áreas estéreis de forma rápida e eficiente.

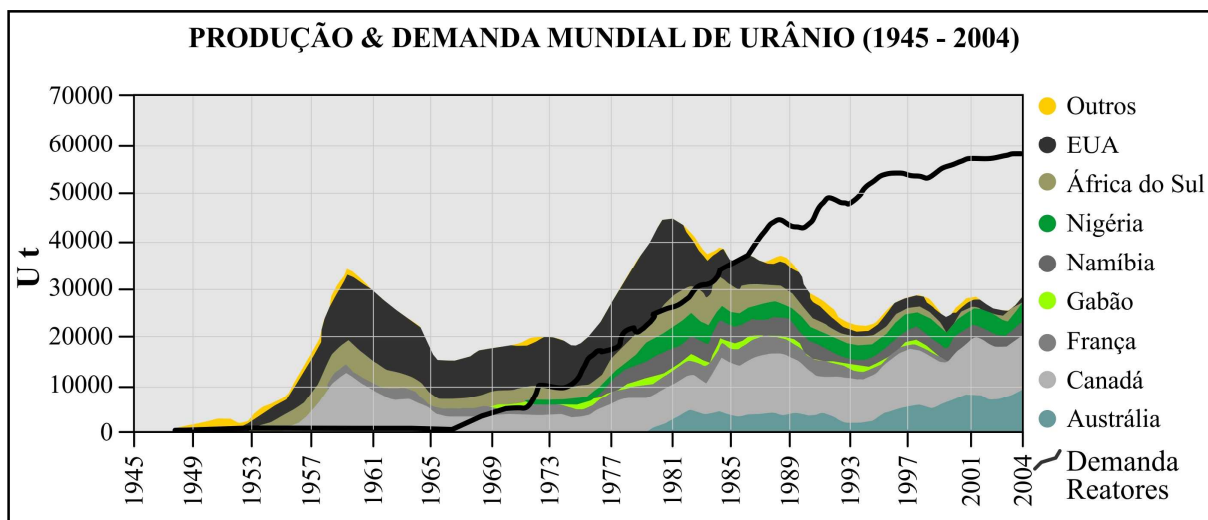


Figura 1. (A) A partir de 2003, com a ascensão do preço do U no mercado internacional, a retomada de antigos projetos e a descobertas de novas jazidas contribuíram para o aumento da produção uranífera. Ainda assim, há um estrangulamento entre a oferta e a demanda dessa commodity. A *World Nuclear Association* (WNA) estima que em 2015 a demanda seja de aproximadamente 77000 t, ampliando a necessidade de novas descobertas. **(B)** O Cazaquistão atualmente é o maior produtor mundial de U (27%), acompanhado pelo Canadá (20%) e Austrália (16%) (**Modificado de: WNA 2010**).

A ascensão da *commodity* U no mercado internacional trouxe a retomada de antigos projetos de prospecção de U na Austrália, dentre os quais, destacam-se o estudo das assinaturas hiperespectrais dos minerais vetores da mineralização uranífera. Nesse sentido, a Mina *Mary Kathleen* (Austrália) compreende um excelente laboratório para o estudo das feições hiperespectrais em *skarns* mineralizados em U-ETR.

O advento do *scanner* aerotransportado HyMap (Hyperspectral Mapper) tem incrementado os segmentos de prospecção mineral australiano. Dados do HyMap são utilizados na compilação de (i) mapas geológicos e estruturais; (ii) mapas de abundância mineral envolvendo desde minerais silicatados a minerais de alterações hidrotermais e supérgenas, incluindo os filossilicatos e hidróxidos de Fe; e (iii) mapas com informações do quimismo mineral (Bierwirth *et al.* 2002, Ellis & Scott 2004, Cudahy *et al.* 2005, 2008). O interesse particular no sensoriamento remoto hiperespectral por geólogos vinculados à atividade de prospecção mineral, em especial aos dados do HyMap, encontra-se no somatório de seus atributos, como altas resoluções espectral (126 bandas espectrais) e espacial (4,5 m), e alta relação da razão sinal-ruído.

Este *scanner*, desenvolvido e construído pela *Integrated Spectronics Proprietary Limited* (ISPL) (www.intspec.com), é operado comercialmente pela *HyVista Corporation* (www.hyvista.com). O instrumento cobre as faixas espectrais do visível-infravermelho próximo com 64 bandas e o infravermelho de ondas curtas com 62 bandas (item 5).

As regiões do espectro eletromagnético investigadas compreendem os intervalos 0.45 μm – 1.39 μm (VNIR – visible and near infrared) e 2.00 μm – 2.49 μm (SWIR – shortwave infrared). A faixa do visível-infravermelho próximo (VNIR) proporciona a detecção e discriminação de diversos minerais com conteúdo de Fe^{2+} e Fe^{3+} em seu retículo cristalino, tais como aqueles presentes em *gossans*, minerais cálcio-silicáticos e secundários. A faixa do infravermelho de ondas curtas (SWIR) apresenta feições de absorção diagnósticas de minerais contendo ligações covalentes coordenadas do tipo Al–OH, Mg–OH, Fe–OH e X–CO₃, presente na estrutura cristalina dos filossilicatos, silicatos hidroxilados, sulfatos, carbonatos e etc. (Pontual *et al.* 1997). O reconhecimento desses espécimes minerais é fundamental para o progresso da prospecção mineral de uma série de *commodities*, inclusive U.

No contexto da pesquisa prospectiva para U, este estudo apresenta um conjunto de métodos de processamento voltados para o uso das imagens hiperespectrais do *scanner* HyMap no mapeamento remoto dos minerais-guia do depósito metamórfico-hidrotermal de U-ETR *Mary Kathleen*.

Especificamente, objetiva-se caracterizar nas proximidades da Mina *Mary Kathleen* e na frente de lavra da mesma, assinaturas hiperespectrais diagnósticas de minerais cálcio-silicáticos vetores dos *skarns* mineralizados em U-ETR. Além da ocorrência de minerais derivados da alteração cálcio-silicática, serão realizados esforços para o mapeamento remoto de outros espécimes minerais que possam vir a contribuir para a prospecção uranífera na área de estudo. Como referência, serão adotados alguns metalotectos documentados principalmente por Matheson & Searl (1956) e Oliver *et al.* (1999).

A imagem usada nesta pesquisa faz parte de uma série de levantamentos geofísicos e de sensoriamento remoto hiperespectral feitos sob encomenda pelo Departamento de Minas e Energia da Província de *Queensland* no ano de 2008, com interveniência do *Australian Commonwealth Scientific*

and Industrial Research Organisation (CSIRO). Estes levantamentos foram denominados localmente de Estágio 1: *Mount Isa*.

2. O SCANNER HIPERESPECTRAL HyMap & CARACTERÍSTICAS DOS DADOS

As características físicas deste sistema sensor estão sintetizadas na Tabela 1.

Tabela 1. Principais características do *scanner* aerotransportado HyMap.

Sensores	Intervalo Espectral	Bandwidth across module	Average spectral sampling interval	Relação sinal:ruído	IFOV	FOV
VIS	0.45 μm - 0.89 μm	15 nm – 16 nm	15 nm	> 500:1	2,5 mr along track/ 2,0 mr across track	61.3 degrees (512 pixels)
NIR	0.89 μm - 1.35 μm	15 nm – 16 nm	15 nm			
SWIR 1	1.40 μm - 1.80 μm	15 nm – 16 nm	13 nm			
SWIR 2	1.95 μm - 2.48 μm	18 nm – 20 nm	17 nm			

Este *scanner*, composto por 128 bandas com comprimentos de ondas específicos, detecta, com alta resolução, as principais feições de absorção de interesse geológico nas regiões do VNIR e SWIR. As posições destas feições fornecem informações a respeito da composição mineral (**Figura 2**), particularmente dos minerais que apresentam os compostos sintetizados na Tabela 2. Durante o processamento de correção dos dados, duas bandas são subtraídas, restando apenas 126. As imagens disponibilizadas para este estudo foram adquiridas na resolução espacial de 4.5 metros.

A base *raster* total disponível para a região do depósito de Mary Kathleen compreende 10 cenas HyMap, com direção de linha de vôo NNE-SSW. Após a etapa de georreferenciamento, cada cena HyMap foi convertida para um arquivo com 28 Gb. Somente parte da cena que abrange a Mina Mary Kathleen, formada por 552 colunas e 632 linhas, foi utilizada nessa pesquisa.

Tabela 2. Comprimentos de ondas e principais feições de absorção indicativas da presença dos cátions Fe^{2+} e Fe^{3+} , compostos hidroxilados e X-CO_3 na estrutura cristalina dos minerais.

Compostos	Bandas	Sensores	Comprimento de onda (μm)
Fe^{2+} , Fe^{3+}	15, 29 – 34	VNIR	~ 0.6593, 0.8595 – 0.9214
OH	63, 64 e 74	SWIR 1	~ 1.3904, 1.4053 e 1.5465
H_2O	63 e 64	SWIR 1	~ 1.3904 e 1.4053
Al-OH	106 – 110	SWIR 2	~ 2.1580 – 2.2299
Fe-OH	110 – 114	SWIR 2	~ 2.2299 – 2.2988
Mg-OH	114 – 118	SWIR 2	~ 2.2988 – 2.3661
X-CO_3	114 – 117	SWIR 2	~ 2.2988 – 2.3497

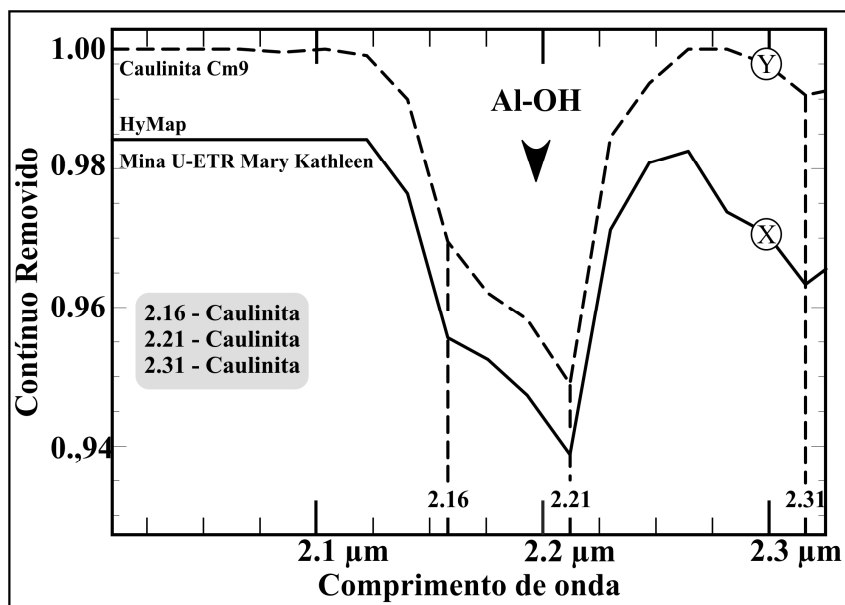


Figura 2. Comparação entre as assinaturas espectrais típicas da caulinita. Os espectros (X) e (Y) foram extraídos, respectivamente, de *pixel* referente à frente de lavra da Mina U-ETR *Mary Kathleen* e da biblioteca espectral do *United States Geological Survey* (USGS). O espectro da caulinita (USGS) refere-se à amostra *Kaolinite CM9*.

3. LOCALIZAÇÃO & CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

A área de estudo localiza-se a noroeste de *Queensland* (Austrália), a aproximadamente 1500 km da capital *Brisbane* (**Figura 3**). As cidades *Mount Isa* e *Cloncurry* situam-se, respectivamente, a 55 km a W e a 62 km a E da Mina de U-ETR *Mary Kathleen*. Essas cidades encontram-se circunscritas num importante distrito mineiro da Austrália, com potencial metalogenético representado por inúmeras ocorrências de Au, Cu-Au, Zn-Pb, além de U (**Ford & Blenkinsop 2008a**).

A geologia do distrito da Mina *Mary Kathleen* engloba o arcabouço Paleoproterozóico da Província Metamórfica *Mount Isa* (PMMI) – uma das regiões mais prospectivas do mundo para depósitos metálicos. A PMMI está compartimentada em três domínios tectono-metamórficos segundo orientação N-S denominadas, de oeste para leste, de Cinturão de Dobramentos *Western* (CDW), Faixa *Kalkadoon–Ewen* (FKE) e Cinturão de Dobramentos *Eastern* (CDE) (**Figura 3B**). Estes terrenos são constituídos por extensas áreas de embasamento, onde existem registros de uma complexa e periódica história de sedimentação, magmatismo, tectonismo, metamorfismo, metassomatismo regional, fluxo de fluidos e mineralizações (**Betts et al. 2006, Sayab 2006, Blenkinsop et al. 2007, Ford & Blenkinsop 2008, Sayab 2008,**).

As três unidades tectônicas CDW, FKE e CDE estão segmentadas em oito subunidades metamórficas, das quais três, denominadas, de oeste para leste, de Bloco *Kalkadoon-Leichhardt*, Zona Metamórfica *Mary Kathleen* e Zona Metamórfica *Quamby-Malbon*, estão compreendidas na área de estudo (**Figura 3C**). A ocorrência de rochas granitóides (granodiorito, leucogranito e etc.) e rochas

metassedimentares (calcário, folhelho e etc. – Formação *Corella*) metamorfisadas entre as fácies xisto-verde à anfibolito superior, são comuns nas três subunidades.

A litoestratigrafia da PMMI é formada por sucessões de unidades litológicas das quais, (i) na sequência de base ocorrem vulcânicas máficas e félsicas associadas a rochas granitóides (pré-1880 Ma) restritos à FKE; (ii) na parte intermediária ocorrem calcários, evaporitos e vulcânicas máficas (1800 – 1740 Ma) (CDW); e (iii) no topo, além de calcários, ocorrem vulcânicas subordinadas características de sistema de rifte intracontinental, caracterizando o CDE (Jackson *et al.* 2000, Foster & Austin 2008).

Fatores determinantes na gênese dos depósitos minerais na PMMI, especialmente as ocorrências nas proximidades da Mina *Mary Kathleen*, geralmente estão associados a (i) episódios de extensiva alteração Na-Ca durante os intervalos 1750-1730 Ma, 1670-1610 Ma, 1610-1500 Ma e pós-1500 Ma; (ii) encurtamento crustal e posicionamento dos granitos *Williams-Naraku* por volta de 1530 Ma durante o Evento *Isan* (1610-1500 Ma); e (iii) fluxo de fluidos hipersalinos com temperaturas compreendidas entre 300°-650°C (Mark & Foster 2000, Betts *et al.* 2006, Oliver *et al.* 2008, Marshall & Oliver 2008).

3.1. GEOLOGIA DA MINA DE U-ETR MARY KATHLEEN

A Mina de U-ETR *Mary Kathleen*, atualmente exaurida, está localizada na Zona Metamórfica homônima. Nas proximidades da mina, ocorrem litotipos das unidades intrusivas Granito *Burstall* (granodiorito, pegmatito, etc) e o Gabro *Lunch Creek* (olivina-piroxênio gabro, biotita diorito, etc). As rochas metassedimentares estão agrupadas na unidade litoestratigráfica denominada Formação *Corella* (1780 – 1760 Ma), e são representadas por calcários impuros, onde subordinadamente ocorrem folhelhos, quartzitos feldspáticos e granofels.

Este depósito de U-ETR, classificado como metamórfico-hidrotermal (Maas *et al.* 1987, Oliver *et al.* 1999), ocorre no flanco ocidental da estrutural sinclinal *Mary Kathleen* (estrutura D₂). Segundo Oliver *et al.* (1999), o corpo de minério está associado à zona de cisalhamento denominada *Mary Kathleen*, que trunca localmente o plano axial do sinclinal e os *skarns*, mas não os corpos de minério. Esta zona de cisalhamento apresenta geometria curvilínea e se estende por uma estreita faixa de aproximadamente por 30 m (Oliver 1995). O mineral de minério uraninita (U₃O) ocorre disseminado em *skarns* cálcicos da Formação *Corella*. Oliver *et al.* (1999) sugerem uma história de alteração cálcio-silicática polifásica para o processo mineralizante da Mina *Mary Kathleen*. Neste contexto, a gênese e a mineralização dos *skarns* estão intrinsecamente relacionadas a dois episódios, um período de metassomatismo de contato e adição de fluidos magmáticos derivados das intrusões do Granito *Burstall* (1ª Fase – ~1740 Ma) e um período de mineralização durante o metamorfismo regional denominado *Isan* (2ª Fase – ~1550 Ma) (Tabela 3).

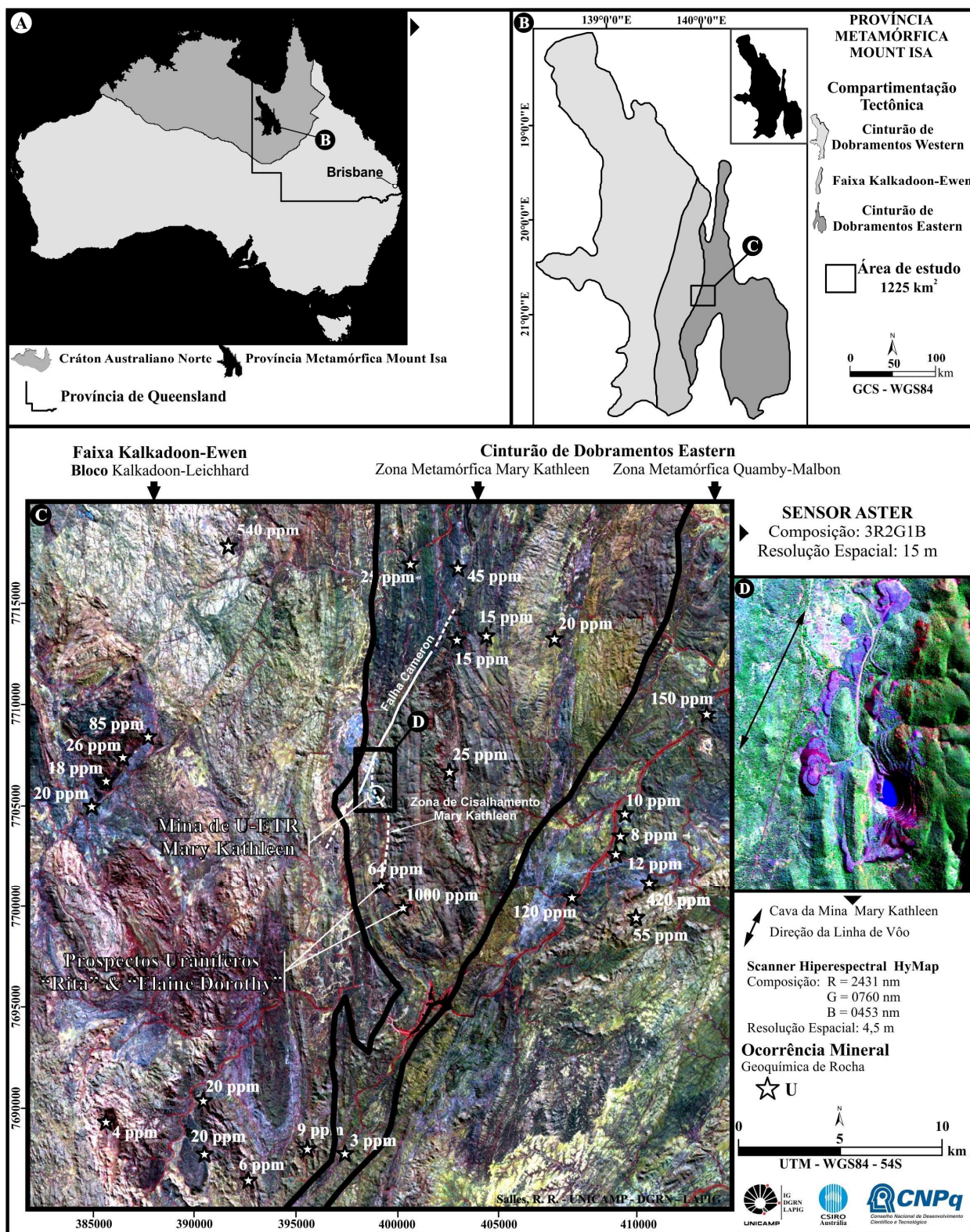


Figura 3. (A) Contexto tectônico regional. (B) Compartimentação morfotectônica da Província Metamórfica Mount Isa. (C) Área de estudo representada por composição colorida 321 falsa-cor. (D) Área do pit da Mina de U-ETR Mary Kathleen ilustrada em composição colorida falsa-cor de bandas (2431 nm, 760 nm, 453 nm) (RGB) do scanner HyMap.

Tabela 3. Síntese dos eventos magmáticos e metamórficos responsáveis pela gênese e mineralização da rocha hospedeira da Mina *Mary Kathleen*.

	Período / Evento	Hidrotermalismo	Características	Referências
Eventos Metamórficos – Hidrotermais	Posicionamento dos Batólitos <i>Williams</i> e <i>Naraku</i> ~1550 – 1500 Ma Orogenia Isan 1610 – 1500 Ma	Intensa alteração Na-Ca (300° – 500°C), escapolitização, albitização e granatização	Remobilização do U (1550 Ma, U-Pb e Sm-Nd) e consequente mineralização dos <i>skarns</i> (1750- 1730 Ma), Cu–Au e <i>IOCG</i> . Tectônica caracterizada por encurtamento crustal (E-W). Intrusões de composição intermediária. Vulcanismo bimodal, múltiplos estágios de deformação e brechação. <i>Skarns</i> mineralizados em U-ETR ocorrem na Zona Metamórfica <i>Mary Kathleen</i> .	Page 1983, Maas et al. 1987, Oliver et al. 1999, Spikings et al. 2001, Sayab & Rubenach 2004, Betts et al. 2006, Sayab 2006, 2008, Oliver et al. 2008
	1750 – 1730 Ma	Altas temperaturas, alteração Na-Ca, escapolitização, albitização, granatização e paragenese cálcio-silicática	Controle estrutural, intrusões de rochas granitóides (Granito <i>Burstall</i>) e posicionamento do Batólito <i>Wonga</i> . Gênese de <i>skarns</i> (Zona Metamórfica <i>Mary Kathleen</i>), rocha encaixante: calcário da Formação <i>Corella</i> .	Maas et al. 1987, Oliver et al. 1999, Betts et al. 2006, Giles et al. 2006, Pirajno & Bagas 2008

Uma paragenese retrógrada é caracterizada pela presença de clorita, calcita, sericita, epidoto e escapolita.

Historicamente, o ano de 1956 marca o início das atividades de exploração da Mina de U-ETR *Mary Kathleen*, divididas em duas fases. A primeira fase de exploração durou até 1963, quando, por questões ambientais, a exploração foi paralisada por mais de uma década. Em 1976 deu-se início à segunda fase de exploração, que se estendeu até 1982. Neste segundo período, foram produzidos 4802 t U₃O₈ (4702 t U). Juntas, essas duas fases somaram um total de 8882 t U₃O₈ (7532 t U) explotados. O restante do recurso, ou seja, 1200 t U₃O₈, encontra-se abaixo do teor de corte, o que não justificou a continuidade das atividades mineiras (McKay & Mieзитis 2001).

4. MODELO DESCRITIVO: SUPORTE PARA O MAPEAMENTO REMOTO DOS MINERAIS SATÉLITES

Na Mina de U-ETR *Mary Kathleen* a rocha encaixante é um calcário impuro intrudido por rochas de composição ácida e intermediária associadas ao Granito *Burstall* (Matheson & Searl 1956, Oliver et al. 1985). A adição de grandes quantidades de sílica no processo de formação dos *skarns* (~1750 Ma) resultou na gênese das assembléias minerais cálcio-silicatadas sumarizadas na **Tabela 4**.

Segundo Matheson & Searl (1956), a mineralização é considerada epigenética e possui especial relação com halos de alteração formados por minerais cálcio-silicatados representados pela paragenese

mineral allanita+andradita+uraninita (Matheson & Searl 1956, Oliver *et al.* 1985, 1999). A Figura 4 ilustra as principais características da Mina de U-ETR Mary Kathleen.

Tabela 4. Relação dos minerais metassomáticos diagnósticos dos *skarns* na Mina de U-ETR Mary Kathleen (Oliver *et al.* 1985, Oliver *et al.* 1999). O sistema de alteração cálcio-silicático está condicionado à variação de temperatura e evolução do fluido magmático, distal ou proximal às intrusões ígneas (Robb 2008).

Rochas	Paragêneses Minerais	T (°C)	 Decréscimo de Temperatura	Fases de Alteração	
Diques e veios; Alteração do <i>skarn</i> preexistente	escapolita+albita+epidoto+titanita; epidoto+albita+prehnita+hematita+granada*; calcita+clorita+tremolita/actinolita+epidoto(+apatita+hematita+prehnita)	300°–350°		Orogenia Isan (1610–1500 Ma)	2ª Fase Metamórfico-Hidrotermal, Posicionamento dos Batólitos <i>Williams</i> e <i>Naraku</i> ~1550–1500 Ma; Cálcio-silicáticos secundários
<i>Skarn</i> mineralizado em U-ETR	allanita+andradita+uraninita escapolita+apatita+quartzo (+anfíbólio+calcita+epidoto) ±calcopirita±hematita	400°–550°			
Granofels enriquecidos em granada	granada*+escapolita+salita/ferrosilita+ (microclínio+plagioclásio+quartzo)	500°–650°		1ª Fase Magmático-Hidrotermal ~1750–1730 Ma; Cálcio-silicáticos primários	
<i>Skarn</i> enriquecido em granadas	granada+escapolita+diopsídio/ ferrosilita +calcita+quartzo				

*granatização fase andradita–grossulária

4.1. MINERAIS CÁLCIO-SILICÁTICOS PRIMÁRIOS, ÓXIDOS & CARBONATO DE CÁLCIO

Os minerais cálcio-silicáticos relevantes para este estudo estão representados pelo grupo da granada, anfíbólio, piroxênio, plagioclásio, epidoto, escapolita, além de carbonato de cálcio (Matheson & Searl 1956, Oliver *et al.* 1999). Dentre os minerais cálcio-silicáticos primários, serão concentrados esforços para mapear, pela técnica aqui sintetizada, a andradita ($\text{Ca}_3\text{Fe}_2(\text{SiO}_4)_3$), epidoto ($\text{Ca}_2(\text{Fe,Al})_3(\text{SiO}_4)_3(\text{OH})$) e hornblenda ($\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe})_4\text{Al}_2\text{Si}_7\text{O}_{22}(\text{OH})_2$).

Na Mina Mary Kathleen ocorre intensa granatização dominada por andradita-grossulária. Próximo às zonas mineralizadas, ocorre andradita que é comumente substituída por uraninita (UO_2).

Os minerais sulfetados estão representados por calcopirita (CuFeS_2). Subordinadamente, ocorrem pirrotita (FeS), pirita (FeS_2) e galena (PbS) (Oliver *et al.* 1999). Entretanto, esses minerais não são mapeáveis por sensores remotos, assim sendo iremos nos concentrar nos produtos de alteração, como a goethita.

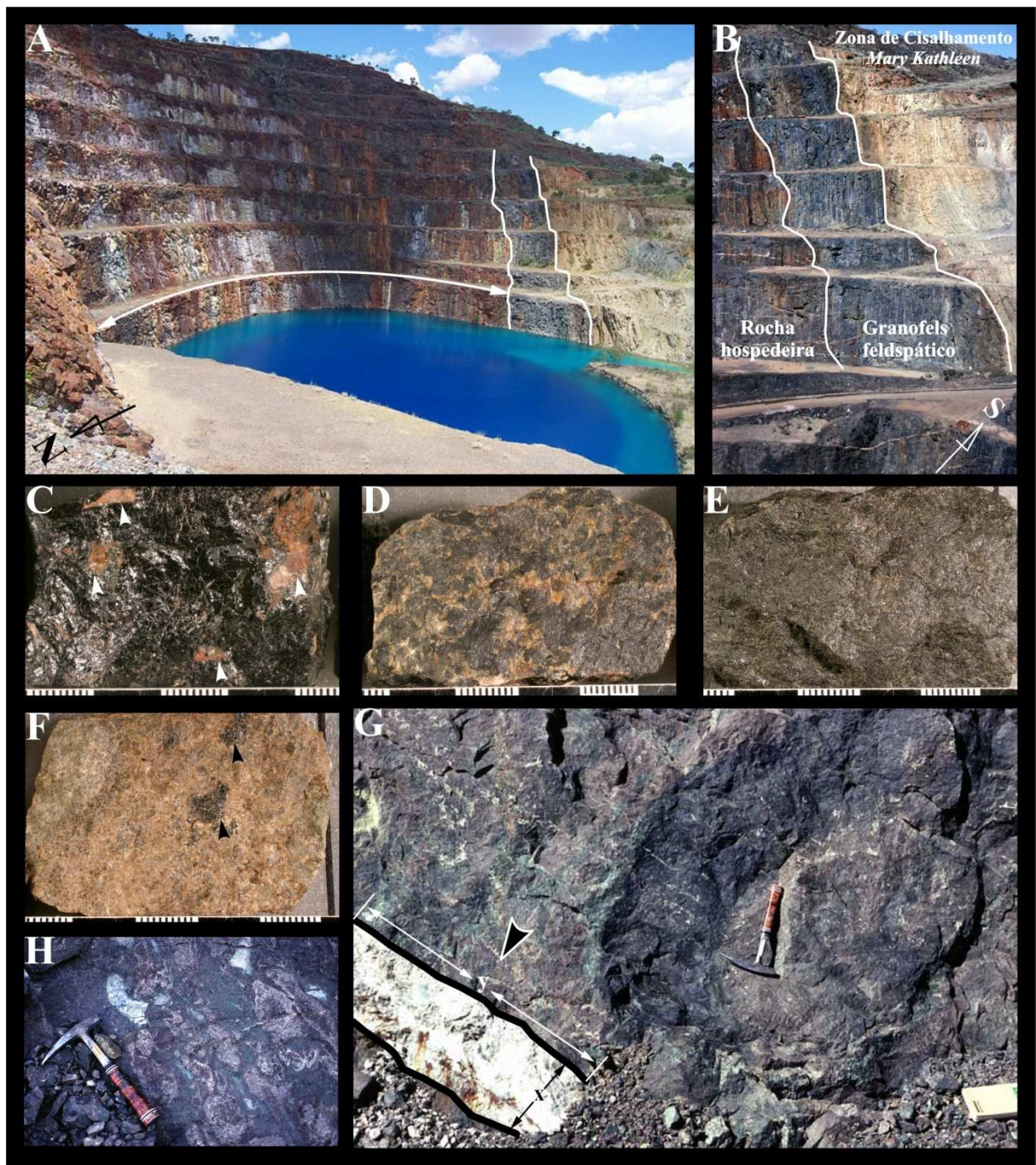


Figura 4. (A) Frente de lavra da Mina de U-ETR *Mary Kathleen* (Picasaweb 2010). A seta indica parte da frente de lavra mais enriquecida em minerais cálcio-silicáticos, em especial andradita. (B) Observa-se na bancada da mina, o contato entre os litotipos da Zona de Cisalhamento *Mary Kathleen* (cor bege), à esquerda ocorre granofels com bandamentos feldspáticos e rochas enriquecidas em granada mineralizadas em U-ETR (cor cinza). (C) Allanita uranífera com xenocristais de pegmatito microclínico (seta branca). (D) Allanita-andradita uranífera. (E) Granofels enriquecido em anfibólio e allanita-uraninita. (F) Leucogranito com cristais de allanita (seta preta). (G) Veio de calcita com dimensão centimétrica (eixo x) a métrica (eixo y) alojado em rocha enriquecida em granada-diopsídio. (H) Brecha de textura ígnea com clastos de material feldspático em meio à matriz de composição feldspato+diopsídio, sulfetos e granadas disseminados (<http://www.datametallogenica.com>).

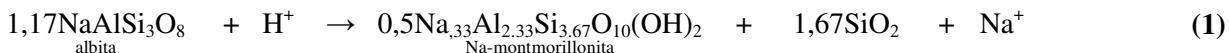
A calcita (CaCO_3) ocorre na fase de metamorfismo (~1750 Ma) e no processo mineralizante (~1550 Ma) do *skarn*. Este mineral apresenta boa assinatura espectral na região do SWIR e discernir áreas de abundância na superfície é de grande importância para a pesquisa uranífera na região visto a natureza calcítica dos *skarns* mineralizados em U-ETR.

4.2. MINERAIS DE ALTERAÇÃO HIDROTERMAL DETECTÁVEIS POR

A exposição dos minerais cálcio-silicáticos e sulfetos às reações de hidrólise, hidratação-desidratação, silicificação, silicação e redox (Gilbert & Park 1996) podem alterar essas paragêneses pretéritas e formar áreas com abundância de filossilicatos, óxidos, hidróxidos, sulfatos, dentre outros tornando agora viável a detecção remota. Assim, a partir dos minerais existente vamos inferir a formação de possíveis minerais de alteração que podem integrar a biblioteca hiperespectral deste estudo.

A hidratação por fluidos hidrotermais ácidos é um processo transformador de paragênese anídrica em hídrica.

No sistema $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$, com aumento do pH, a albita altera para montmorillonita (**Reação 1**) (**Pirajno 2008**). Este filossilicato apresenta feições de absorção bem definidas na faixa espectral do SWIR do *scanner* HyMap. Ademais, este mineral ocorre em muitos depósitos de classe mundial. Porém, não foram encontradas descrições que associasse este argilomineral à zonas mineralizadas em *Mary Kathleen*.



BANDAS DE ABSORÇÃO DA MONTMORILLONITA → 2.20 μm – 2.21 μm

A paragênese allanita+andradita+uraninita, além dos minerais calcita, epidoto, hornblenda, apatita e quartzo estão associados a zonas mineralizadas em *Mary Kathleen*. Como principais minerais de ganga, a calcita e a andradita possuem diversas implicações na prospectividade uranífera para a área de estudo, como por exemplo, discriminar sítios mineralizadas daqueles estéreis.

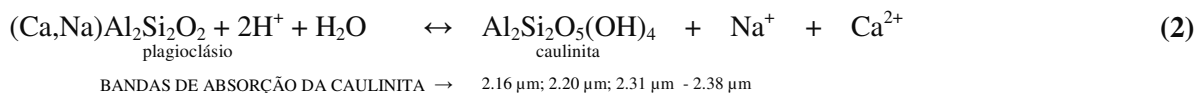
A grossulária, quando sujeita a desilificação-silicificação, processo comum em muitos *skarns*, forma calcita e caulinita, enquanto que a andradita forma calcita e hematita (Gilbert & Park 1996).

Quanto às reações redox, Oliver *et al.* (1999), por meio de análises químicas de minerais e petrografia, sugerem a possibilidade de ocorrência de frentes de alteração redox no controle da mineralização na Mina *Mary Kathleen*.

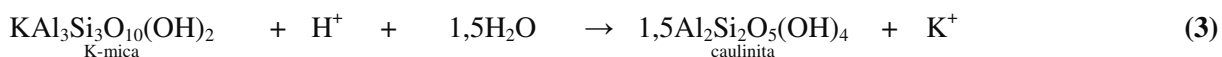
4.2.1. ALTERAÇÕES SUPÉRGENAS

Nesse ambiente, a oxidação é o processo de alteração dominante. As alterações supérgenas dos depósitos minerais dependerão da natureza das assembléias minerais primárias e, por conseguinte, da susceptibilidade de serem mais ou menos intemperizadas.

Visto a ocorrência de rochas ácidas, pegmatitos e minerais feldspáticos nas proximidades e na Mina de U-ETR *Mary Kathleen*, é provável que as condições físico-químicas favorecessem a formação de caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$). A meteorização de feldspatos, feldspatóides e outros silicatos, além das condições não alcalinas são essenciais para a formação de caulinita. A **Reação 2** descreve o processo de hidrólise do plagioclásio (Robb 2008).

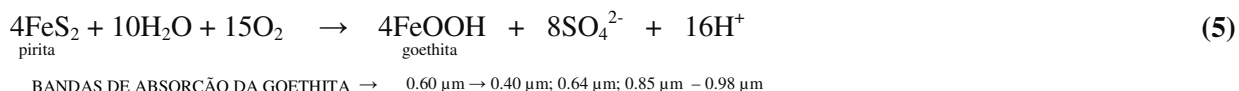
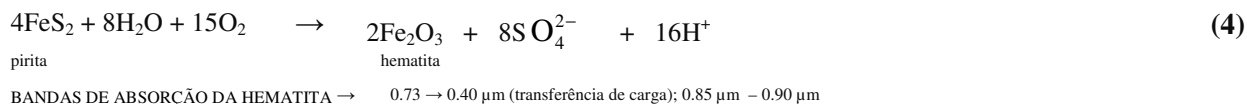


Os filossilicatos formados outrora e a ação de fluidos meteóricos converte mica para o argilomineral caulinita (**Reação 3**).

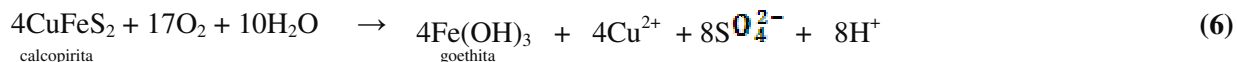


Os minerais cálcio-silicáticos com presença de Fe no arranjo cristalino, tais como hornblenda, andradita, epidoto e fases sulfetadas tendem a alterar mais facilmente no ambiente supérgeno. O Fe é o elemento oxidado mais comum no ambiente supérgeno, o qual é convertido de Fe-ferroso para Fe-férrico (e.g. $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{e}^-$) (Robb 2008, Masterton *et al.* 1999).

Durante os processos supérgenos de alteração, as condições físico-químicas (Eh-pH) das reações redox controlam e precipitam os cátions Fe^{2+} e Fe^{3+} . Esse processo forma superfícies enriquecidas em óxidos e hidróxidos de Fe. Por exemplo, a oxidação de fases sulfetadas é acompanhada de formação de fluídos ácidos que contribuem para a formação de hematita (**Reação 4**) e goethita (**Reação 5**) (Pirajno 2008):



Outra possibilidade para formação de goethita é a oxidação da calcopirita (**Reação 6**).



Matheson & Searl (1956), descreveram a ocorrência de forte oxidação a uma profundidade aproximada de 15.24 m da superfície. Sotoposto, aproximadamente a 35.57 m, ocorrem zonas semi-oxidadas com uraninita e sulfetos maciços observados em amostras macroscópicas. Abaixo desta zona ocorrem uraninita inalterada, além de halos de sílica amorfa, fluorita (CaF_2), apatita ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH},\text{F},\text{Cl})$), calcita (CaCO_3), pirita (FeS_2) e arrojadita ($(\text{Na}_2\text{Ca})(\text{Fe},\text{Mn})_2\text{PO}_4$). Estas zonas oxidadas e semi-oxidadas ocorrem a profundidades relativamente superficiais dominadas pelo dinamismo dos processos supérgenos. Tais processos são transformadores competentes dos depósitos minerais, em especial os uraníferos, pois podem empobrecer ou enriquecer depósitos e ocorrências pré-existent (Durrance 1986). Visto que as zonas oxidadas descritas por Matheson & Searl (1956) tendem a diminuir com o aumento da profundidade, logo, é provável que ocorressem *gossans* enriquecidos em elementos traço, tais como U e ETR no cenário prospectivo pretérito deste depósito.

As informações sintetizadas acima potencializam a detecção desses minerais por meio do *scanner* HyMap.

5. MÉTODOS & TÉCNICAS DE PESQUISA

A reflectância dos materiais superficiais depende de uma série de fatores, dentre eles, os que mais influenciam as feições de absorção são: o espalhamento atmosférico, a vegetação e a composição mineral dominante no solo e na rocha. Em terrenos áridos, como o caso da Mina de U-ETR *Mary Kathleen*, os espectros são compostos principalmente por misturas minerais superficiais derivadas das rochas *in loco*, assim como os produtos de seu intemperismo.

Atualmente a pesquisa uranífera carece de aplicações recentes documentadas na área de sensoriamento remoto e processamento digital de imagem. Logo, com o advento de novos sensores mais voltados para aplicações geológicas, como o ASTER e o HyMap, surgem uma gama de novas possibilidades para o mapeamento de áreas com abundâncias de minerais diagnósticas das ocorrências uraníferas. Assim, com o propósito de documentar os espectros e as respectivas feições de absorção dos principais minerais cálcio-silicáticos associados aos *skarns*, compilou-se a **Tabela 5**. As principais feições

de absorção encontram-se posicionadas nos comprimentos de ondas entre os intervalos 0.45 μm a 1.35 μm (VNIR) e 2.00 μm a 2.48 μm (SWIR).

O VNIR permite discriminar superfícies enriquecidas em íons ferroso (Fe^{2+}) e férrico (Fe^{3+}), como goethita (Fe^{3+}OOH), hematita ($\text{Fe}_2^{3+}\text{O}_3$), ilmenita ($\text{Fe}^{+2}\text{TiO}_3$) e/ou jarosita ($\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$). Normalmente, o mecanismo de transferência de carga Fe–O na região do espectro azul dá origem à importante feição diagnóstica destes minerais. Feições de absorção entre os comprimentos de ondas 0.84 μm a 0.90 μm e 0.90 μm a 1.10 μm permitem dissociar superfícies enriquecidas em hematita e goethita (Hunt & Ashley 1979, Souza Filho & Drury 1998, Wenk & Bulakh 2008). A arquitetura do *scanner* HyMap lhe atribui especial relação com o mapeamento desses óxidos, pois é composto por 63 bandas espectrais na faixa do VNIR, com intervalo de comprimentos de onda entre 0.45 μm – 1.35 μm .

A vibração transicional das moléculas NH_4 , Al–OH (2.22 μm), Fe–OH (2.25 μm), Mg–OH (2.33 μm) e X– CO_3 (2.33 μm – 2.35 μm), produzem feições de absorção simples e múltiplas no espectro eletromagnético na faixa do SWIR. A janela atmosférica compreendida entre o intervalo 2.00 μm – 2.45 μm apresenta importantes feições diagnósticas de aluminossilicatos (Al–OH), silicatos hidroxilados, como os dos grupos do clinoanfíbólio e do epidoto, respectivamente atribuídos à presença das ligações (Mg,Fe)–OH e (Fe,Al)–OH. Moléculas de Al–OH são partes integrantes da estrutura cristalina dos filossilicatos, tais como minerais do grupo da caulinita (caulinita, dickita, aloesita e nacrita), sulfatos (alunita, jarosita e gipsium), carbonatos e minerais contendo NH_4 (Hunt & Ashley 1979, Pontual *et al.* 1997).

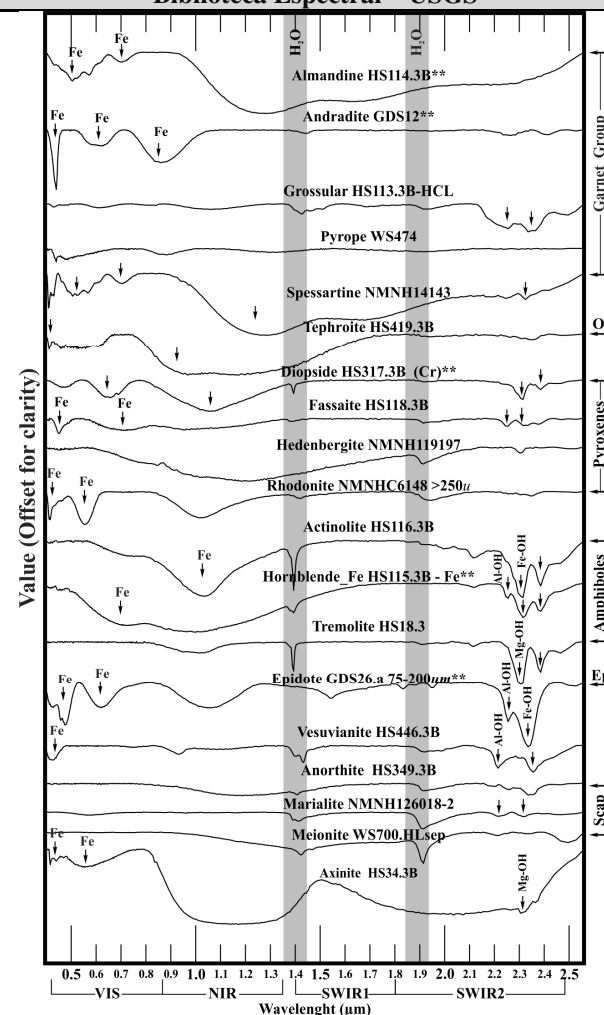
O *scanner* HyMap é composto por 62 bandas na região do SWIR, sendo que 28 bandas deste conjunto cobrem a janela atmosférica compreendida entre o intervalo 2.00 μm – 2.45 μm , onde concentram-se as principais feições de absorção dos minerais a serem classificados nesta pesquisa.

Tabela 5. Características mineralógicas e espectrais das paragêneses minerais cálcio-silicáticas relacionadas aos *skarns*. Em *Mary Kathleen*, os minerais dos grupos da granada (Gr e Ad), clinopiroxênio (Di), clinoanfíbólio (Hb), epidoto (All e Ep) e escapolita possuem especial relação com a mineralização uranífera (**Modificado de: Meinert 1992, 1993**).

Biblioteca Espectral – USGS			
Grupo	Mineral	Composição	
Nesosilicato	Granada (Gt)	Almandina (Al)	Fe ₃ Al ₂ (SiO ₄) ₃
		Andradita (Ad)**	Ca ₃ (Fe, Ti) ₂ (SiO ₄) ₃
		Espessartina (Sp)	Mn ₃ Al ₂ (SiO ₄) ₃
		Grossulária (Gr)**	Ca ₃ Al ₂ (SiO ₄) ₃
		Piropo (Py)	Mg ₃ Al ₂ (SiO ₄) ₃
	Olivina (Ol)	Forsterita (Fo)	Mg ₂ SiO ₄
		Faialita (Fa)	(Fe, Mn,) ₂ SiO ₄
		Tefroita	Mn ₂ SiO ₄
Inossilicato	Piroxênio		
	Clinopiroxênio	Diopsídio (Di)**	CaMgSi ₂ O ₆
		Fassaita (Fas)*	Ca(Mg, Fe, Al)(Si, Al) ₂ O ₆
		Hedenberguita (Hd)	CaFeSi ₂ O ₆
	Piroxenóide	Johannsenita (Jo)	Ca(Mn, Fe)Si ₂ O ₆
		Ferrosilita (Fs)**	FeSiO ₃
		Rodonita (Rd)	(Mn, Ca, Fe)SiO ₃
		Wollastonita (Wo)	CaSiO ₃
	Anfibólios		
	Clinoanfíbólios	Fe-actinolita (Ft)	Ca ₂ Fe ₃ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂
		Mn-actinolita (Ma)	Ca ₂ Mn ₅ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂
		Cumingtonita (Cm)	Mg ₂ (Mg, Fe) ₅ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂
		Grumerita (Gru)	Fe ₂ (Fe, Mg) ₅ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂
		Hornblenda (Hb)**	Ca ₂ (Mg, Fe) ₄ Al ₂ Si ₇ O ₂₂ (OH) ₂
		Pargasita (Pg)	NaCa ₂ (Mg, Fe) ₄ Al ₃ Si ₆ O ₂₂ (OH) ₂
		Tremolita (Tr)	Ca ₂ Mg ₅ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂
		Epidoto	
Sorossilicatos	Epidoto	Allanita (All)**	(Ca, REE) ₂ (Fe, Al) ₃ (SiO ₄) ₃ (OH)
		Clinozoisita (Cz)	Ca ₂ Al ₃ (SiO ₄) ₃ OH
		Epidoto (Ep)**	Ca ₂ (Fe, Al) ₃ (SiO ₄) ₃ (OH)
		Piemontita (Pm)	Ca ₂ (Mn, Fe, Al) ₃ (SiO ₄) ₃ (OH)
	Outros	Vesuvianita (Vs)	Ca ₁₀ (Mg, Fe, Mn) ₂ Al ₄ Si ₉ O ₃₄ (OH, Cl, F) ₄
Tectosilicatos	Grupo dos Feldspatos		
	Plagioclásio	Anortita (An)	CaAl ₂ Si ₂ O ₈
	Grupo da Escapolita (Sc)**		
	Marialita (Mi)	Na ₄ Al ₃ Si ₉ O ₂₄ (Cl, CO ₃ , OH, SO ₄)	
	Meionita (Me)	Ca ₄ Al ₃ Si ₆ O ₂₄ (CO ₃ , Cl, OH, SO ₄)	
Ciclossilicato	Axinita	Axinita (Ax)	(Ca, Mg, Mn, Fe) ₃ Al ₂ BSi ₄ O ₁₅ (OH)
Filossilicato	Clorita	Prehnita (Pr)**	Ca ₂ Al ₂ Si ₃ O ₁₀ (OH) ₂

Value (Offset for clarity)		Almandine HS114.3B**	Garnet Group
		Andradite GDS12**	
		Grossular HS113.3B-HCL	
		Pyrope WS474	
		Spessartine NMNH14143	
		Tephroite HS419.3B	
		Diopside HS317.3B (Cr)**	
		Fassaita HS118.3B	
		Hedenbergite NMNH119197	
		Rhodonite NMNHC6148 ~250μ	
		Actinolite HS116.3B	
		Hornblende Fe HS115.3B - Fe**	
		Tremolite HS18.3	
		Epidote GDS26.a 75-200μm**	
		Vesuvianite HS446.3B	
	Anorthite HS349.3B		
	Marialite NMNH126018-2		
	Meionite WS700.HLsep		
	Axinite HS34.3B		

*Fassaita = Variedade de augita com pouco conteúdo de ferro - ** Minerais e Grupo de minerais que ocorrem em *Mary Kathleen* (Matheson & Searl 1956, Oliver *et al.* 1985 e 1999, Kwak & Abeysinghe 1987).



5.1. ESPECTRORRADIOMETRIA

O espectrômetro utilizado neste estudo, o *FieldSpec High Resolution* (Analytical Spectral Devices), detecta a radiação eletromagnética no intervalo espectral entre 350 nm a 2500 nm, com 2151 canais espectrais. Esse instrumento foi utilizado particularmente para medir uma amostra macroscópica de escapolita. Apesar destes minerais serem encontrados na biblioteca espectral pública do USGS como marialita (NMNH126018-2) e meionita (WS700.HLsep e WS701), as feições de absorção encontram-se atenuadas quando comparadas às medições realizadas em amostra macroscópica de escapolita referente ao Depósito IOCG de Carajás. Diante deste fato, optamos por usar estas medições na classificação hiperespectral.

5.2. PRÉ-PROCESSAMENTO DAS IMAGENS HYMAP

Etapas de pré-processamento, como a correção atmosférica e o georreferenciamento, foram necessários para o progresso deste estudo. Os gases atmosféricos “mascarão” as feições espectrais de uma imagem, portanto a correção atmosférica visa atenuar os efeitos do vapor d’água e aerossóis consequentemente convertendo a imagem para reflectância aparente (Souza Filho *et al.* 2003). A empresa *Hyvista Corporation* disponibiliza os dados HyMap com correção atmosférica e convertidos para reflectância na superfície, além de arquivos para o georreferenciamento dos dados.

O georreferenciamento foi realizado no ENVI 4.6 (RSI 2003) pelo processo *Georeferencing from Input Geometry* (GLTs) a partir de arquivos de *input* no formato *bsq*. Cada arquivo GLT é composto por duas bandas onde estão registradas as informações geométricas de cada *pixel* da cena.

5.3. PROCEDIMENTOS PARA DETECÇÃO REMOTA DE MINERAIS

A detecção de anomalias minerais relacionadas a depósitos metálicos tem sido amplamente estudada (Harsanyi & Chang 1994, Chang 1998, Chang *et al.* 2000, Ren & Chang 2000, Schweizer & Moura 2000, Johnson 2003 e Kraut *et al.* 2005, Manolakis *et al.* 2003).

Nesse trabalho, um conjunto de procedimentos foi organizado e testado para a detecção dos minerais vetores da mineralização na Mina de U-ETR Mary Kathleen (item 5), os quais seguem sintetizados abaixo. Para esta tarefa foi utilizado o programa ENVI 4.6 (RSI 2003).

5.3.1. TRANSFORMAÇÃO *EMPIRICAL FLAT FIELD OPTIMAL REFLECTANCE* (EFFORT)

As imagens hiperespectrais, mesmo após a correção atmosférica e conseqüente conversão para reflectância aparente, ainda preservam ruídos artificiais, o que inibe a análise e a comparação dos mesmos com *endmembers* de referência. Neste caso, a função *Empirical Flat Field Optimal Reflectance Transformation* (EFFORT Polishing) aplica uma transformação linear de pouca intensidade para todas as bandas de uma única cena, a fim de atenuar feições denominadas *sawtooth* (denticuladas), que tipicamente aparecem nos espectros (Boardman 1997 e 1998, Kruse *et al.* 2008). Conseqüentemente, feições de absorção são realçadas. Nesta normalização o efeito do albedo é incorporado ao espectro.

5.3.2. *Reed-Xiaoli Anomaly Detection*

O *RX Anomaly Detection* é processado por meio do algoritmo *Reed-Xiaoli Detector* (RXD) e detecta anomalias espectrais sutis, intrínsecas ao *pixel* ou aos seus conjuntos, comparando os *pixels* vizinhos de uma única banda ou de todo *dataset*. Estas regiões anômalas são caracterizadas por diferença abrupta de cor e brilho. Portanto, estes alvos são espectralmente distintos do *background* da imagem. Este algoritmo é implementado por meio da Equação 3 abaixo.

$$\delta_{RXD}(r) = (r - \mu)^T K_{L \times L}^{-1} (r - \mu) \quad (3)$$

onde r é um vetor, μ é a média global da imagem e $K_{L \times L}$ representa a matriz de covariância desta imagem (Chang & Chiang 2002).

O algoritmo RXD é considerado uma operação inversa à Análise das Principais Componentes (APC), pois considera *pixels* com baixa probabilidade de ocorrência na imagem. A APC é a combinação linear das principais informações espectrais em um pequeno número de PCs (Principais Componentes) especificados pelos maiores autovalores derivados deste processamento. Isto desqualifica esta técnica para realçar e/ou classificar áreas de interesse quando aplicada de maneira isolada (Chang & Chiang 2002).

5.3.3. TRANSFORMAÇÃO *MINIMUM NOISE FRACTION* (MNF)

A transformação linear MNF (Green *et al.* 1998) tem por objetivo segregar o sinal e o ruído das imagens submetidas a este processo, reduzindo a necessidade de cálculos de *software* e *hardware*

(Boardman & Kruse 1994). Este método de análise é também similar a APC, mas com processamento extra. O MNF consiste em duas etapas sequenciais: (i) a primeira transformada, conhecida como *noise-whitening*, decorrelaciona e redimensiona o ruído do *dataset* em uma matriz de covariância; (ii) em um segundo processo, é aplicado o mesmo princípio da APC, mas com ruído suprimido. Assim, a dimensionalidade inerente aos dados é determinada ao examinar os autovalores e as imagens associadas. Após esta análise, o espaço de dados é dividido em duas partes, onde são verificados os maiores autovalores e imagens coerentes, e um complemento com autovalores e imagens com ruído dominante.

5.3.4. MIXTURE TUNED MATCHED FILTERING (MTMF)

Esta técnica de classificação hiperespectral faz uso sequencial dos algoritmos *Matched Filtering* (MF) (Chen & Reed 1987) e *Mixture Tuned* (MT) (Boardman 1998). O MF determina abundâncias de *endmembers* conhecidos em escala de sub-*pixel* na medida em que suprime respostas desconhecidas contidas no *background*. O MT utiliza um algoritmo para reduzir o número de falsos positivos encontrados no processamento do MF. O resultado deste processamento são duas imagens rotuladas de *MF Score* e *Image Infeasibility*, para cada *endmember* de entrada, plotados em um gráfico onde o eixo das abscissas é representado por valores *MF Score*, enquanto o eixo das ordenadas é representado por valores referentes a *Image Infeasibility*. Logo, *pixels* com valor *infeasibility* alto são susceptíveis de serem falsos positivos; *pixels* corretamente mapeados estarão representados por valores acima do *background* distribuídos próximos a zero e valor *infeasibility* baixo. Portanto, o MTMF é uma técnica rápida e eficiente para detectar alvos determinados por uma biblioteca espectral de referência.

5.3.5. CLASSIFICAÇÃO SUPERVISIONADA SPECTRAL ANGLE MAPPER (SAM)

O *Spectral Angle Mapper* (SAM) é um algoritmo que realiza a classificação de *pixels* em imagens com base na comparação entre espectros de referência e espectros do *dataset*. O espectro de referência pode ser coletado em campo, em laboratório ou ser extraído a partir da imagem de interesse. Esta função matemática (Equação 4), implementada por Kruse *et al.* (1993), trata os espectros no espaço vetorial (n -D), a fim de determinar e comparar o ângulo existente entre vetores. Quanto menor o ângulo, em radianos, maior será a similaridade espectral entre as áreas mapeadas e o espectro de referência (Figura 5).

$$\alpha = \cos^{-1} \frac{X \cdot R}{|X| \cdot |R|} = \cos^{-1} \frac{\sum_{i=1}^n x_i r_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n r_i^2}} \quad (4)$$

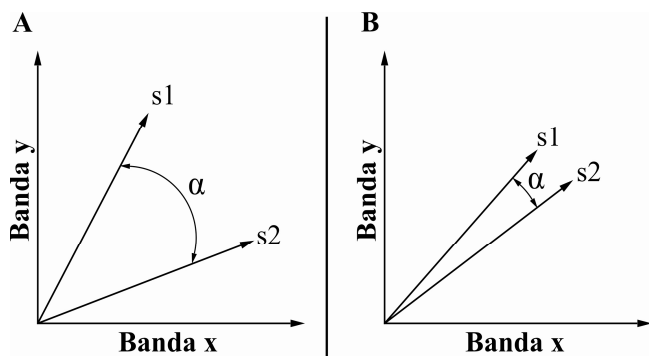


Figura 5. (A) Relações angulares entre os vetores que representam o espectro de referência (s1) e o espectro desconhecido (s2), considerando o espaço dimensional formado por duas bandas espectrais (x e y). (B) Quanto menor o ângulo entre os vetores espectrais (s1 e s2), maior será a possibilidade de semelhança dos mesmos.

O *output* deste processamento são imagens denominadas *Rules* e *Classification*. As imagens *Rules* preservam informações referentes ao ângulo entre os espectros comparados. Assim, os limiares para a classificação espectral são determinados a partir destas imagens.

Por ser uma função robusta para a classificação hiperespectral e visualmente atraente, o SAM foi utilizado para classificação dos dados com base nos espectros de referência derivados do método *Target Detection*.

6. ANÁLISE DE ASSINATURAS ESPECTRAIS DE MINERAIS NA RESOLUÇÃO ESPECTRAL DO SENSOR HYMAP

Alguns minerais, como a allanita e apatita ainda não são passíveis de detecção remota, mesmo considerando-se a alta resolução espectral do *scanner* hiperespectral HyMap. Assim, serão concentrados esforços nos minerais cálcio-silicáticos e hidroxilados (andradita, hornblenda e epidoto), minerais de alteração hidrotermal (escapolita), carbonatos (calcita) e minerais secundários (caulinita, montmorillonita e goethita). A identificação prévia dessas assinaturas é fundamental para a prospectividade uranífera na área de estudo.

Dois conjuntos de minerais, além da escapolita, foram considerados para compor uma biblioteca espectral especializada nas características do depósito *Mary Kathleen*.

O primeiro conjunto de minerais compreende a goethita, hematita e andradita ($\text{Ca}_3(\text{Fe,Ti})_2(\text{SiO}_4)_3$) (**Figura 6**). O elemento Fe na estrutura cristalina é uma característica comum entre

esses minerais. A faixa espectral utilizada para este conjunto compreende o intervalo de 0.453 μm a 1.390 μm (VNIR). As principais feições de absorção ocorrem nas bandas de 0.65 μm e 0.85 μm a 0.90 μm , além do processo eletrônico de transferência de carga (0.74 $\rightarrow$ 0.40 μm), característico nesses minerais, gerando forte absorção em direção ao comprimento de onda 0.40 μm (ultravioleta).

MINERAIS VETORES DA MINERALIZAÇÃO - FEIÇÕES DE ABSORÇÃO NA FAIXA DO VNIR

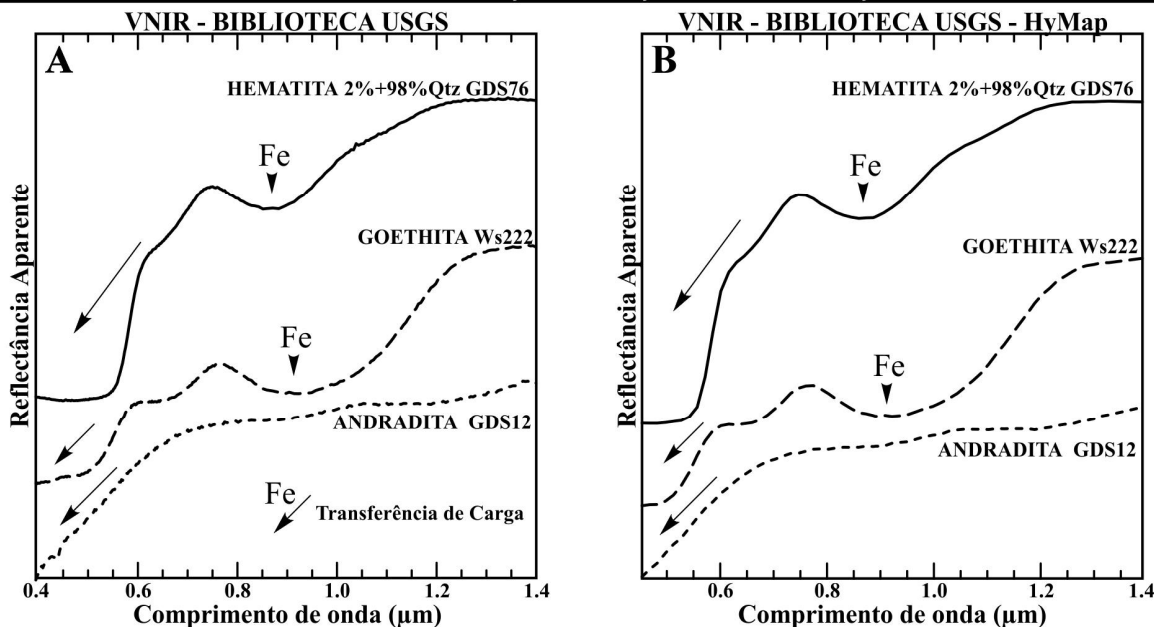


Figura 6. Os espectros encontram-se devidamente referenciados na Biblioteca USGS. (A) Grupo de minerais contendo Fe na estrutura cristalina e considerados vetores da mineralização uranífera (**Fonte: biblioteca espectral do USGS**). (B) Minerais da figura “A” re-amostrados para as 64 bandas espectrais na faixa do VNIR do *scanner* HyMap. As principais feições de transferência de carga e absorção continuam evidentes.

O segundo conjunto compreende minerais com assinaturas típicas nas bandas espectrais que cobrem a faixa do SWIR2 (**Figura 7**). Usualmente, as feições de absorção observadas nesse conjunto são decorrentes da ligação covalente coordenada entre o íon hidroxila (OH) e íons metálicos Al, Fe e Mg, entre os quais estão os silicatos hidroxilados, hornblenda e epidoto, além dos filossilicatos como muscovita, caulinita e montmorillonita. A origem da assinatura espectral da calcita é derivada da vibração molecular do composto $\text{X}-\text{CO}_3$. As principais feições de absorção deste grupo encontram-se nas bandas 2.15 μm , 2.26 μm , 2.31 μm , 2.33 μm , 2.34 μm e 2.38 μm .

Na biblioteca pública do USGS o espectro da escapolita não está disponível para análise. Sendo assim, o espectro usado neste trabalho foi mensurado de amostra macroscópica de escapolita (**Gentilmente cedida por: Monteiro 2009**) por meio do espectrorradiômetro FieldSpec. Esta amostra foi coletada nas proximidades do Depósito IOCG de Carajás, Brasil.

As feições de absorção da escapolita (**Figura 7C**) mostram a presença da ligação covalente coordenada Al–OH, em 2.19 μm e 2.21 μm e da molécula de X–CO₃ em 2.33 μm e 2.34 μm em seu retículo cristalino.

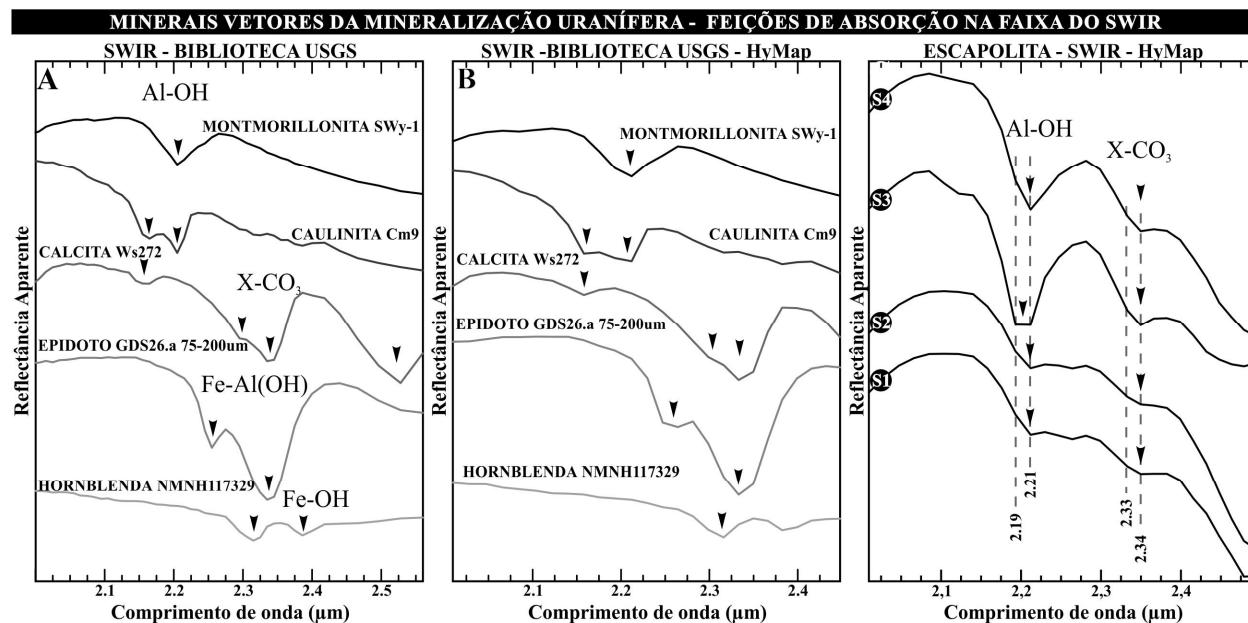


Figura 7. Os espectros encontram-se devidamente referenciados na Biblioteca do USGS. **(A)** Grupo de minerais (hidroxilados, carbonatados, etc) considerados vetores da mineralização uranífera (**Fonte: Biblioteca Hiperespectral USGS**). **(B)** Minerais da biblioteca do USGS re-amostrados para as 29 bandas espectrais do *scanner* HyMap na faixa do SWIR2. As principais feições de absorção espectral permanecem evidentes após a re-amostragem. **(C)** Espectros coletados por meio de espectrorradiômetro *FieldSpec High Resolution* (Analytical Spectral Devices) de amostra macroscópica com aproximadamente 40 cm de escapolita (**Monteiro 2009**). Os espectros forma re-amostrados para a faixa do SWIR2 do *scanner* HyMap. As siglas S1, S2, S3 e S4 referenciam o ponto de coleta na amostra de escapolita.

7. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os dados do *scanner* HyMap compreendem numerosas feições espectrais contendo efeitos residuais, o que dificulta o processo de análise e comparação com espectros de referência. Ao aplicar o algoritmo *EFFORT Polishing* as feições de absorção são realçadas. A **Figura 8** ilustra os resultados dessa aplicação, onde o espectro da Calcita Ws272 da biblioteca espectral USGS é comparado ao espectro da calcita coletado a partir de *pixels* compreendidos na frente de lavra da mina, sob as coordenadas (397410.6880;7705568.5000).

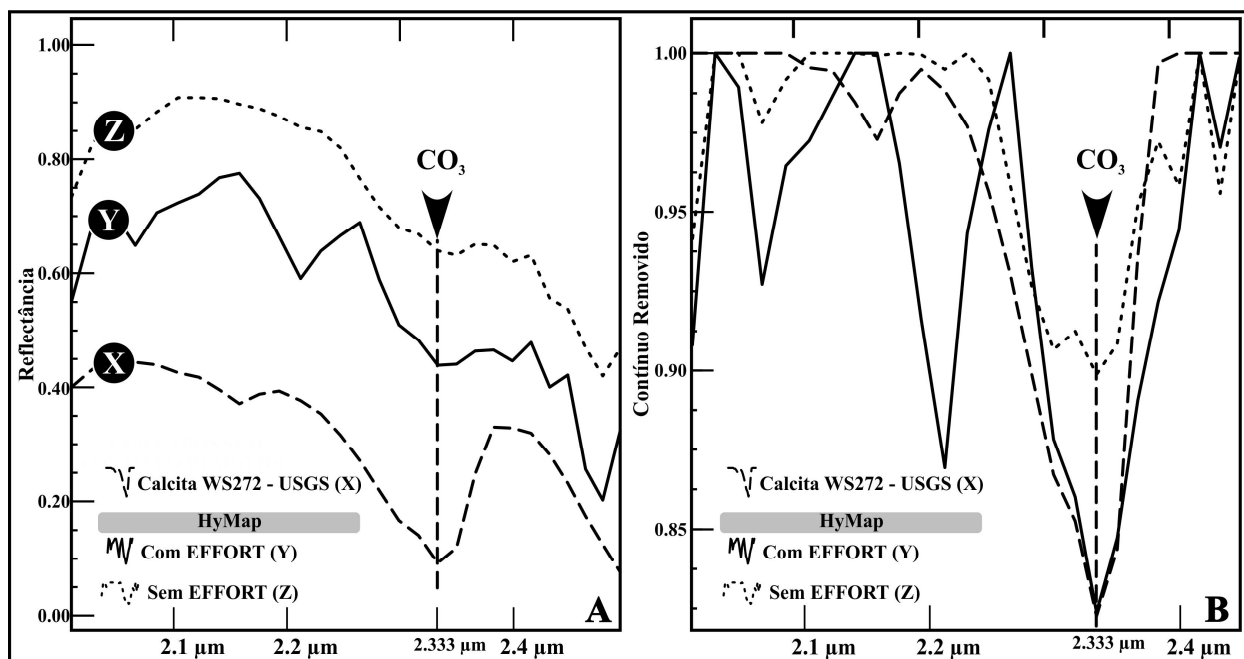


Figura 8. Comparação entre as feições de absorção da calcita. (A) Espectros SEM o contínuo removido. O espectro X representa o mineral puro de calcita (biblioteca espectral USGS). Os espectros Y e Z foram extraídos da frente de lava - Y representa o espectro realçado pelo EFFORT *Polishing* e Z o espectro antes do realce. (B) Após a remoção do contínuo nota-se que a feição de absorção diagnóstica da calcita, centrada no comprimento de onda 2.33 μm , ficou melhor definida.

7.1. ANOMALIAS ESPECTRAIS

O algoritmo *Reed-Xiaoli Detector* (RXD) (Chang & Chiang 2002) proporcionou um guia para coleta de *endmembers* ao realçar áreas onde as características espectrais e estatísticas diferem do *background*. Tais áreas, realçadas em *pixels* brilhantes, representam alvos potenciais de ocorrência de espécimes minerais (Figura 9).

Os espectros (Figura 9A) coletados na frente de lava da mina revelaram *pixels* com assinaturas características da andradita ($\text{Ca}_3(\text{Fe,Ti})_2(\text{SiO}_4)_3$), visto as feições espectrais derivadas da presença de Fe na estrutura cristalina. A riqueza de detalhes destas assinaturas a diferem da goethita e da hematita, pois apresentam absorções bastante atenuadas entre 0.65 μm e 0.90 μm . Outra característica notável é o gradiente acentuado do espectro em direção ao ultravioleta, feição esta derivada da transferência de carga do metal Fe. A análise espectral proporcionada por esta técnica de realce indica a possibilidade deste mineral ser mapeado pelo *scanner* HyMap.

Os espectros estampados na Figura 9B indicam feições de absorção centradas em 2.21 μm , na forma de um *doublet* sutil. Estas feições são características da presença da ligação covalente Al–OH na estrutura cristalina dos minerais. A geometria e profundidade destas assinaturas declaram a ocorrência de caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) nas proximidades da Mina *Mary Kathleen*, aproximadamente a 500 m.

Ademais, a caulinita apresenta grau de cristalinidade moderado, visto o desenvolvimento incipiente da feição do *doublet* em 2.16 μm . A área correspondente aos *pixels* realçados perfaz mais de 20 m^2 . Embora não tenham sido encontradas referências sobre a associação da caulinita às zonas mineralizadas na Mina de U-ETR *Mary Kathleen*, esse mineral pode ser produto de alteração intempérica de vários minerais primários descritos na mina.

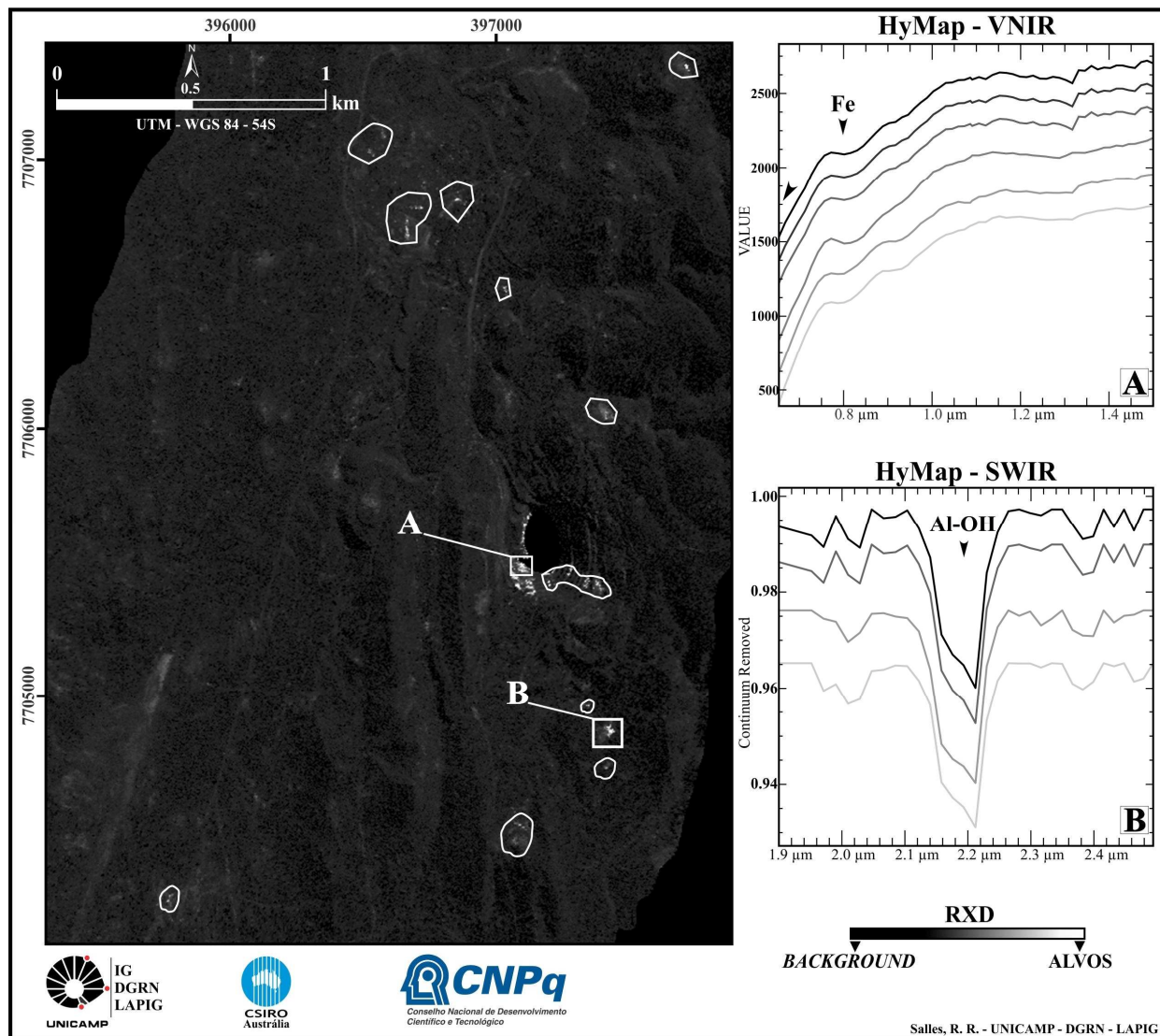


Figura 9. Imagem derivada do método RX *Anomaly Detection*. Os *pixels* mais brilhantes, delimitados por polígonos, correspondem a *pixels* potenciais para análise espectral e para trabalhos geológicos regionais. À sul, na frente de lavra da mina, os *pixels* se mostraram altamente diferenciados do *background*. As áreas “A” e “B” foram selecionadas para análise prévia das assinaturas espectrais. (A) Comporta espectros com feições indicativas de minerais contendo Fe-férrico em sua estrutura cristalina. (B) Revelou espectros com assinatura típica da caulinita.

7.2. MAPEAMENTO ESPECTRAL DE MINERAIS

O suporte fornecido pelo modelo descritivo do depósito de Mary Kathleen permitiu a definição dos *endmembers* a serem utilizados na classificação da imagem hiperespectral.

Inicialmente, os espectros de entrada extraídos da biblioteca espectral do USGS foram reamostrados para a resolução espectral do *scanner* HyMap. Diante das áreas previamente classificadas, os *endmembers* dos minerais primários e secundários extraídos da imagem HyMap foram comparados aos espectros de referência (USGS). Por fim duas bibliotecas espectrais com *endmembers* exclusivos da imagem HyMap foram construídas. O processo de classificação hiperespectral foi realizado individualmente para cada mineral (**Figura 10**).

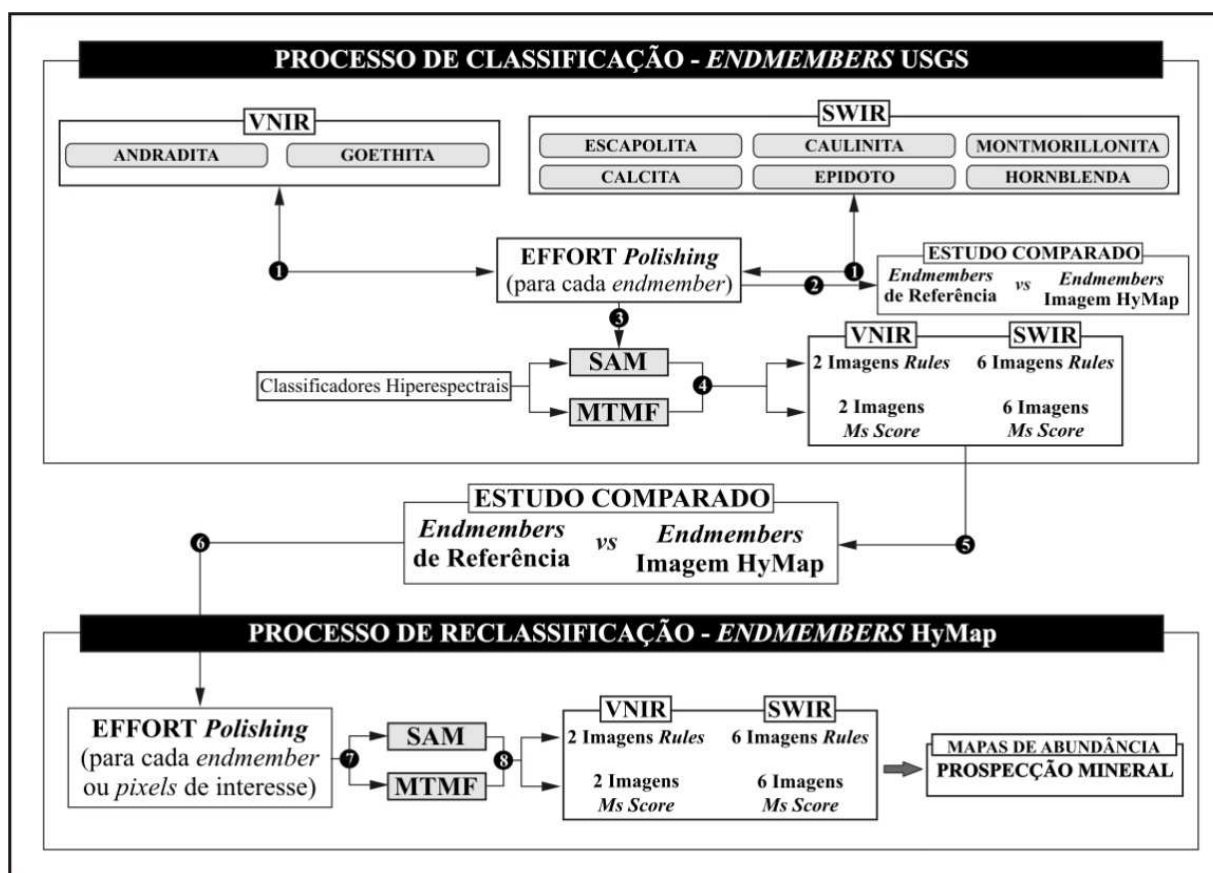


Figura 10. Os mapas de abundância mineral foram derivados da metodologia sintetizada neste diagrama.

As áreas de abundância mineral foram classificadas por meio dos métodos SAM e MTMF. Eles algoritmos foram alimentados com *endmembers* extraídos de *pixels* da imagem HyMap, cuja assinatura é comparável aos dos minerais de interesse contidos na biblioteca espectral. Após comparação visual entre as imagens *Ms Score* (MTMF) e *Rule* (SAM), os classificadores mais adequados para a determinação dos minerais vetores da mineralização uranífera da Mina *Mary Kathleen* foram selecionados (**Tabela 6**).

Tabela 6. Entrada de dados para a classificação supervisionada MTMF e SAM.

Minerais classificados	Classificadores	<i>Pixels</i> de entrada	Imagens resultantes
Andradita	MTMF	18	6 <i>Ms Score</i>
Epidoto		29	
Hornblenda		10	
Escapolita		127	
Calcita		467	
Caulinita		374	
Montmorillonita	SAM	06	2 <i>Rules</i>
Goethita		33	

7.2.1. TRANSFORMAÇÃO *MINIMUM NOISE FRACTION* (MNF)

Embutida no método MTMF, a transformada MNF foi implementada para as 64 bandas na faixa do VNIR (0.45 μm – 1.39 μm) e para as 29 bandas na faixa do SWIR2 (2.00 μm – 2.49 μm). Com o objetivo de exemplificar este método, os resultados aqui expostos compreendem a faixa do SWIR2 (**Figura 11**). Logo, aplica-se o mesmo raciocínio para a faixa do VNIR.

As três primeiras componentes concentram quase a totalidade dos *endmembers* de interesse, realçados por *pixels* de tons brilhantes. O ruído foi segregado para as últimas componentes correlatas aos menores autovalores. Dentre estas, as feições de ruído são observadas de forma mais sistemática a partir da componente MNF14. Diante destas informações, o limite entre as componentes relativas ao sinal e ao ruído pode ser determinado pela análise do gráfico de autovalores. A análise gráfica (**Figura 11**) mostra que a partir da componente MNF1 os autovalores tendem a decrescer até a MNF14, assumindo assim um patamar mais simétrico.

As áreas de realce da componente MNF1, onde se concentra a maior variância dos dados, apresenta coerência espacial com os resquícios das atividades mineiras da Mina *Mary Kathleen*. Também foram realçadas áreas com solos expostos e feições antrópicas. Observam-se áreas de realce correlatas nas MNF1, MNF2, MNF4, MNF7 e MNF8 a sul da cava da mina. As demais componentes, com limiar na MNF14, revelaram conjuntos de *pixels* em tons brilhantes dispersos pela área de estudo. Todas as feições derivadas mineração na Mina *Mary Kathleen* foram realçadas pelas componentes MNF1 a MNF14.

As componentes MNF15 a MNF29, dominadas pelo ruído e com textura típica “sal e pimenta”, foram eliminadas do processamento MTMF.

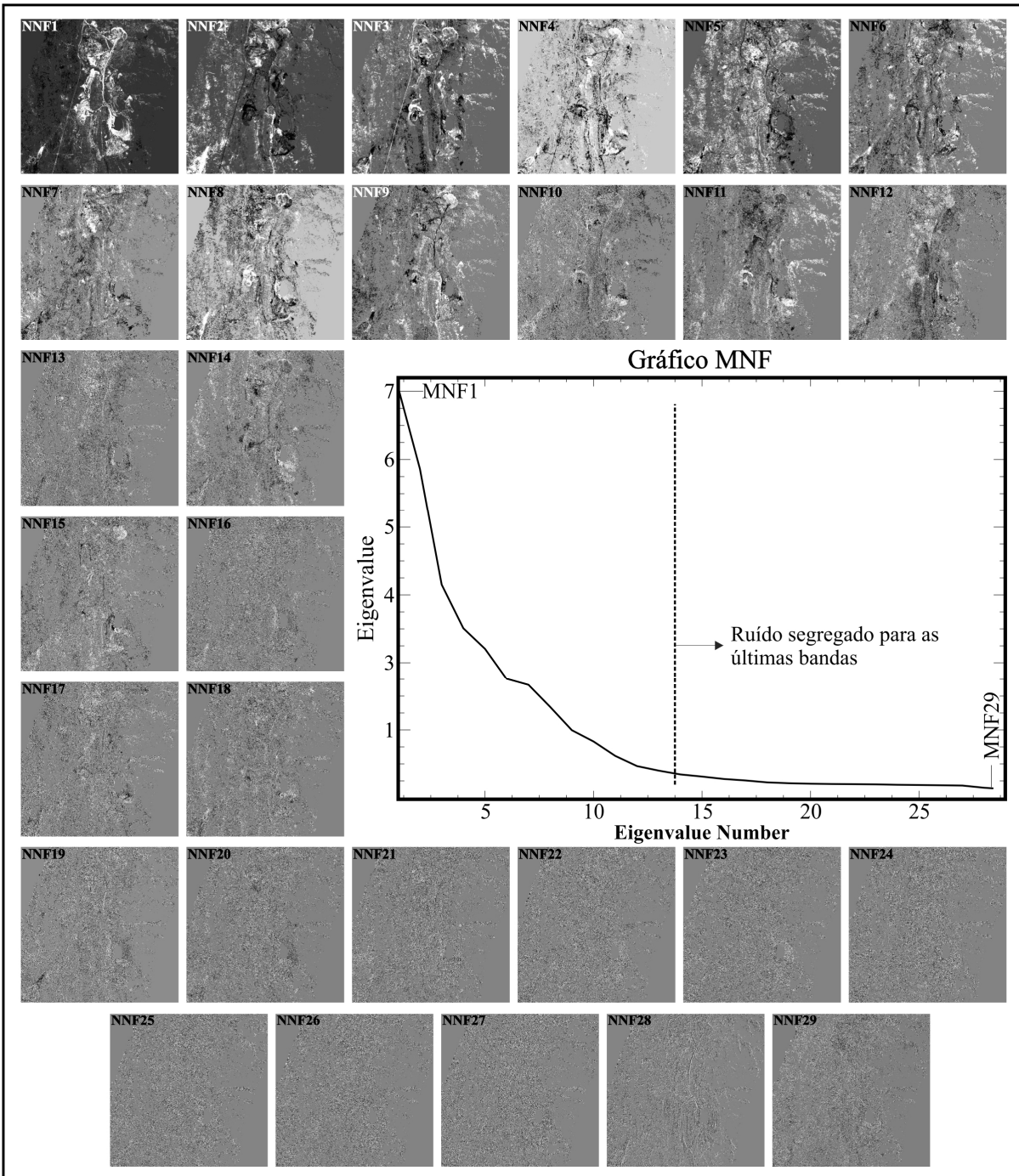


Figura 11. Ordenamento das componentes MNF. O gráfico representa os autovalores *versus* as componentes MNF. Os maiores autovalores correspondem às componentes com *endmembers* de interesse (sinal). A linha tracejada marca o limite entre as componentes de sinal e de ruído.

7.2.1. ABUNDÂNCIA MINERAL

Os mapas de abundância mineral compilados para os minerais primários (**Anexo 1**) e minerais de alteração intempérica (**Anexo 2**), cartografados em 6 imagens *Ms Score* e 2 imagens *Rules*, foram ajustados posteriormente por técnicas de processamento digital de imagem. As imagens *Rules* tiveram seus histogramas invertidos. O realce linear nos histogramas destas imagens permitiu eliminar os *pixels* (falsos positivos) que não se ajustaram aos *endmembers* de referência. Os mapas de abundância mineral foram então combinados no espaço de cores RGB. Esta técnica discriminou com eficiência as misturas minerais e as respectivas abundâncias que ocorrem nas proximidades e na frente de lavra da Mina *Mary Kathleen*.

7.2.1.1. MINERAIS PRIMÁRIOS E DE ALTERAÇÃO INTEMPÉRICA

Os mapas de abundância mineral definidos pelos maiores valores das imagens *Ms Score* e *Rule* foram realçados através da sua representação em composições coloridas RGB.

Ao analisar os mapas de abundâncias para os minerais andradita+epidoto+hornblenda (**Figura 12A**), nota-se a existência do domínio espectral da andradita sobre os espectros do epidoto e hornblenda, respectivamente realçados em verde e azul. Entretanto, é possível distinguir áreas onde ocorrem as fases minerais andradita+hornblenda (magenta). Também foi possível delimitar claramente áreas com andradita+epidoto (amarelo-laranja).

Nos mapas de abundância andradita+epidoto+calcita (**Figura 12B**), o domínio espectral da andradita prevaleceu, como já observado na **Figura 12A**. As áreas de abundância de calcita, cartografadas na **Figura 12B**, se correlacionam parcialmente com as áreas realçadas para hornblenda (**Figura 12A**). Na frente de lavra ocorrem as associações epidoto+calcita (ciano) circunscrito por andradita e calcita. À noroeste da frente de lavra observam-se áreas levemente epidotizadas (verde) limitadas pela mistura calcita+epidoto. Subordinadamente, nesta mesma área ocorre a junção das abundâncias de andradita+epidoto+calcita (branco) limitados por calcita+epidoto e calcita.

Os mapas impressos na **Figura 13** diferem dos anteriores quanto à presença de escapolita (**Figuras 13A**) e goethita (**Figuras 13B**). A **Figura 13A** representa áreas de abundância derivadas da associação mineral andradita+escapolita+calcita. Observa-se no mapa, realce de abundância de escapolita à sul da cava da mina, correlata à Zona de Cisalhamento *Mary Kathleen*. Esta assinatura indica que provavelmente este litotipo fora extensivamente afetado por fluidos hidrotermais hipersalinos e alterado por metassomatismo Na-Ca. Neste mesmo local, ocorrem *pixels* com a mistura andradita+escapolita

(amarelo) tendendo à escapolita. Subordinadamente, a associação escapolita+calcita é realçada pelo ciano. A presença simultânea dos minerais andradita+calcita resultou em *pixels* de tons magenta.

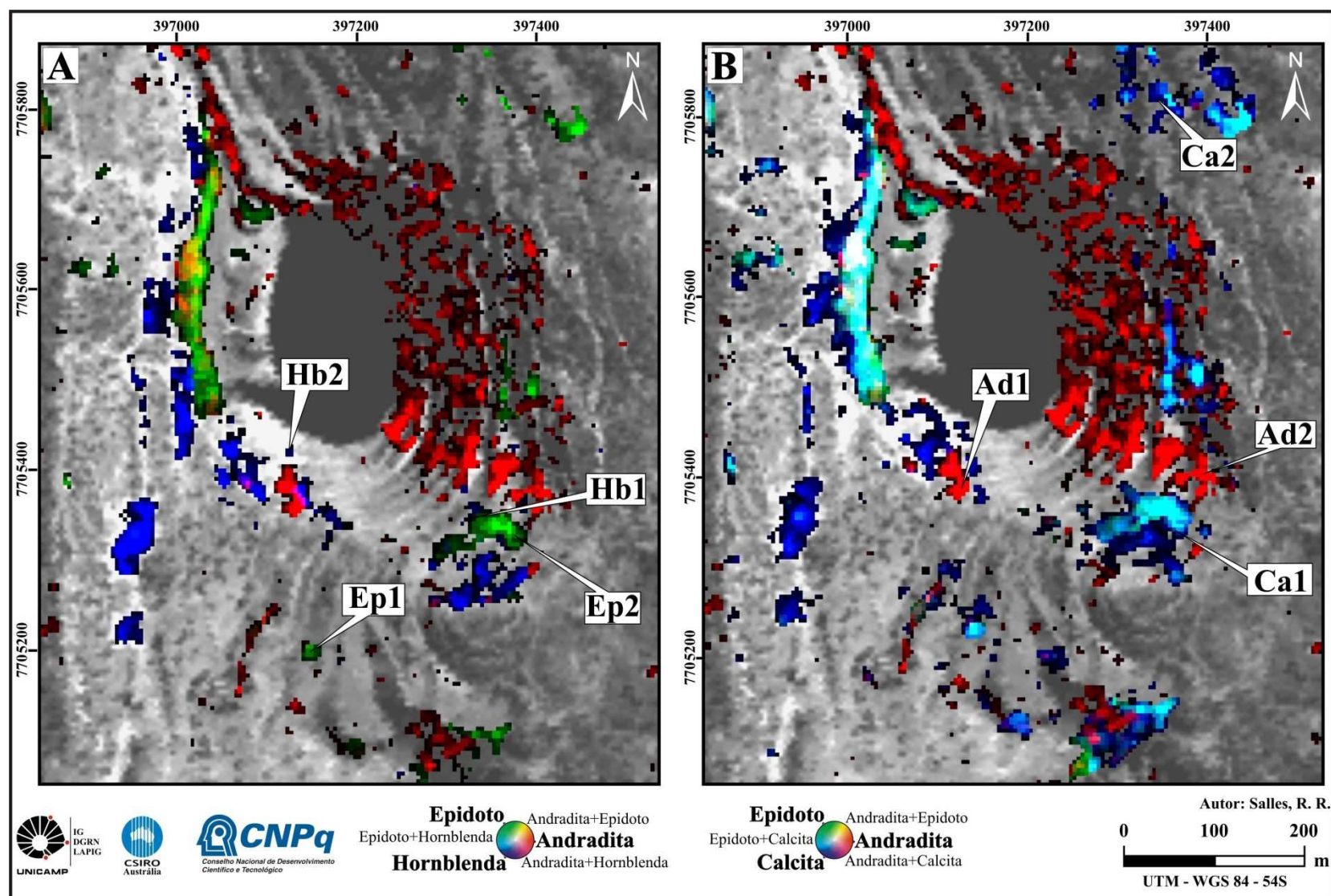


Figura 12. Mapas de abundância mineral definidas pelo classificador MTMF. Na frente de lavra os mapas (A) andradita+epidoto+hornblenda e (B) andradita+epidoto+calcita são espacialmente correlacionáveis. Os rótulos Hb (hornblenda), Ep (epidoto) e (B) Ad (andradita) e Ca (calcita) identificam os espectros impresso na **Figura 15**.

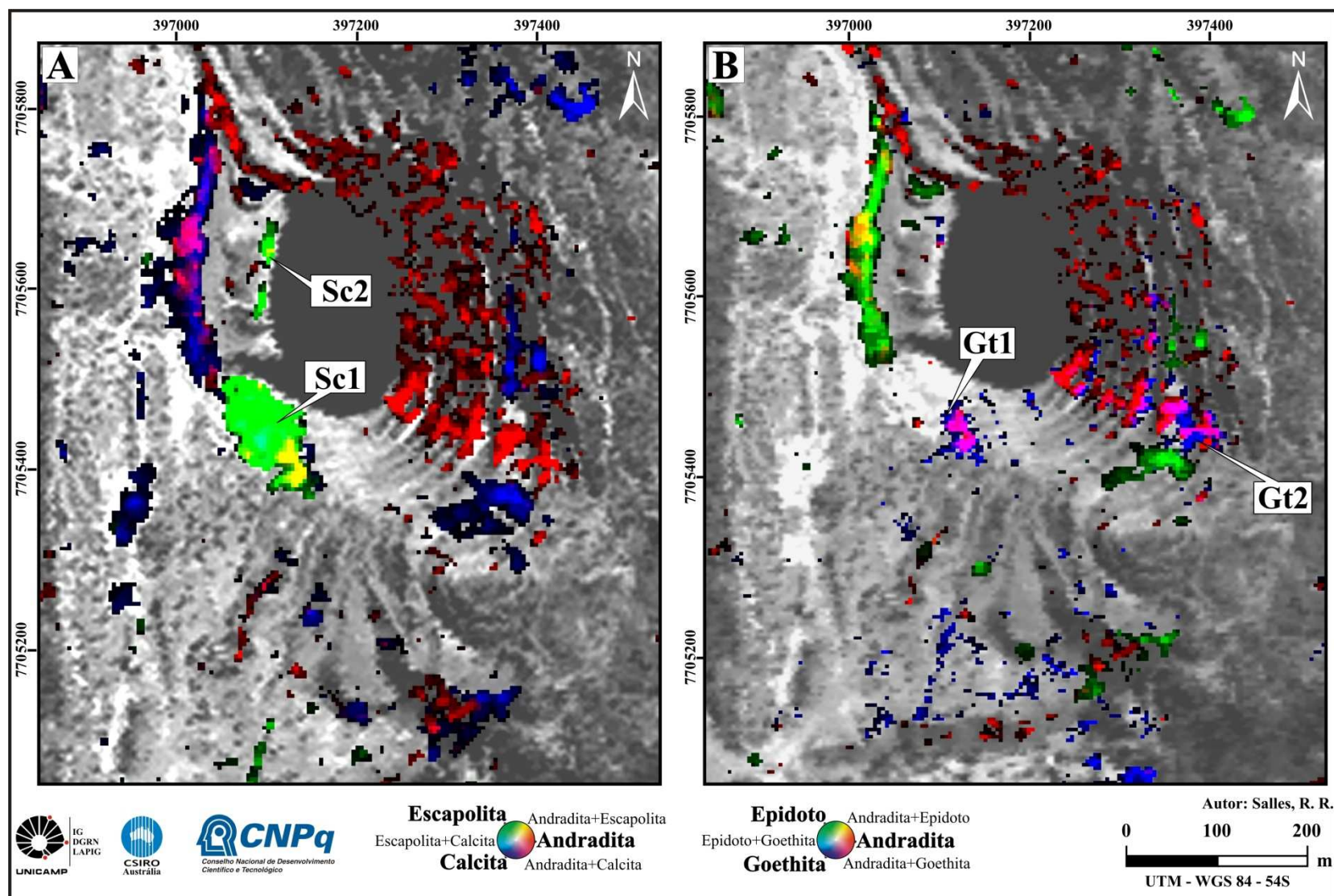


Figura 13. Mapas de abundância mineral definidas pelo classificador MTMF. (A) Mapa de abundância de andradita+escapolita+calcita. À sul da cava da mina foram realçadas áreas dominadas por escapolita. (B) Mapa de abundância andradita+epidoto+goethita. A análise deste mapa mostra que a parte sul da cava da mina se encontra mais oxidada, visto a maior presença de goethita. Os rótulos Sc (escapolita) e Gt (goethita) reportam aos espectros impresso na **Figura 15**.

Áreas com abundância de goethita (azul) cartografadas no mapa da **Figura 13B** ocorrem circunscritas pelo mineral primário andradita. Estas abundâncias corroboram com as descrições documentadas por Matheson & Searl (1956), que relatam ocorrências de zonas superficiais oxidadas. Este fato agrega credibilidade ao mapa de abundância de goethita. Na Mina de U-ETR *Mary Kathleen* a abundância desse mineral em determinados setores pode estar associada à decomposição, por hidrólise, das fases sulfetadas e de minerais cálcio-silicáticos com Fe no retículo cristalino.

A associação de andradita+goethita (magenta) está mais evidente à sul da cava da mina (**Figura 13B**). Áreas mais restritas ocorrem junto à andradita e epidoto (verde). Apesar do forte intemperismo e a extensa formação de regolitos comuns nessa região da Austrália, o que mascara as anomalias geoquímicas, o uso criterioso de mapas que evidenciem áreas com abundância de goethita quando associada à paragênese de minerais cálcio-silicáticos, pode contribuir positivamente para prospecção uranífera.

A associação epidoto+andradita (amarelo) foi realçada a noroeste da cava (**Figura 13B**), porção onde o epidoto ocorre abundantemente.

Os resultados obtidos para a associação mineral goethita+escapolita+caulinita (**Figura 14A**) e caulinita+montmorillonita+escapolita (**Figura 14B**) foram satisfatórios. No entanto, na região do depósito de *Mary Kathleen*, não há uma relação estabelecida na literatura entre minerais da paragênese cálcio-silicatada e seus equivalentes supergênicos.

Na **Figura 14A** é possível observar zonas com abundância de goethita (vermelho) orientadas segundo direção NW e N. Outras áreas realçadas na parte sul, nas pilhas de rejeito e trechos das bancadas, não seguem nenhuma orientação. Observa-se que a escapolita (verde) tende a se misturar com a goethita nas partes mais superficiais. Assim, esta mistura, traduzida no mapa por *pixels* amarelos, tende a ficar evidente pela presença de goethita. Também são evidenciados *pixels* com a associação goethita+caulinita (magenta).

O mapa de abundância da caulinita+montmorillonita+escapolita (**Figura 14B**) realçou de forma mais intensa a mistura caulinita+montmorillonita (amarelo) nas proximidades da cava da mina e a mistura montmorillonita+escapolita (ciano) envolta por abundante escapolita (azul). Observa-se que na parte ocidental da cava ocorre uma dominância da mistura caulinita+montmorillonita, orientada segundo direção N-S. Subordinadamente, áreas com abundância de caulinita (vermelho) prevalecem sobre montmorillonita (verde) em tons de laranja. “Ilhas” de *pixels* com abundância de montmorillonita (verde) são identificadas na frente de lavra e se correlacionam com áreas onde ocorre abundância de minerais cálcio-silicáticos e goethita, cartografadas nos mapas anteriores. Entretanto, as áreas de realce para montmorillonita foram limitadas.

Para verificar a consistência dos mapas de abundância mineral, as assinaturas espectrais dos *pixels* das áreas de maior abundância foram verificados interativamente. Portanto, os espectros estampados na **Figura 15** reduzem a subjetividade de outros métodos utilizados para segregar os *pixels* corretamente mapeados daqueles denominados ‘falsos positivos’.

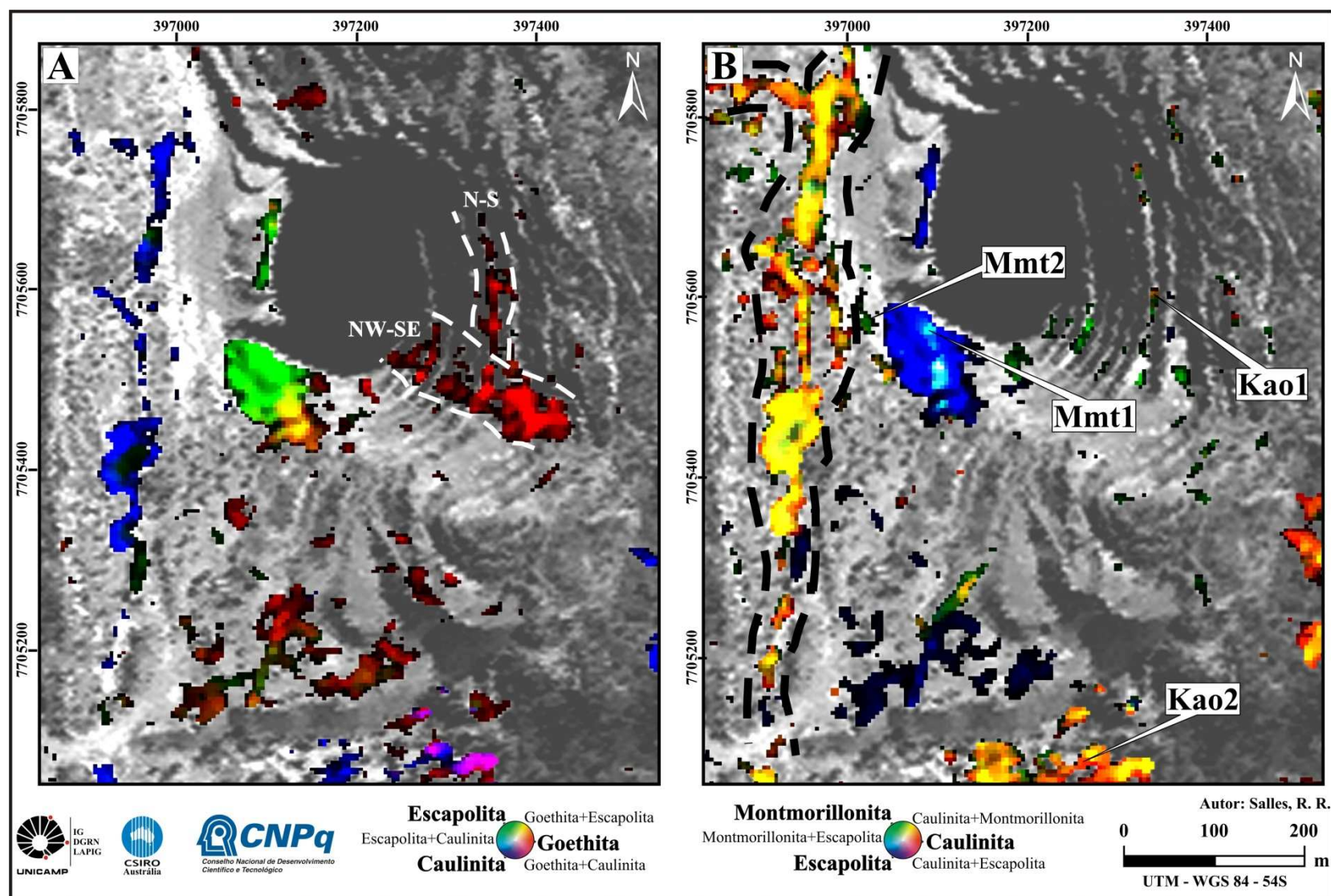


Figura 14. (A) Mapa de abundância de goethita (vermelho) e escapolita (verde) & caulinita (azul), obtidos a partir dos classificadores SAM e MTMF, respectivamente. (B) Mapa de abundância de caulinita (vermelho) & escapolita (azul) e montmorillonita (verde) obtidos a partir dos classificadores SAM e MTMF, respectivamente. Os rótulos Mmt (montmorillonita) e Kao (caulinita) reportam aos espectros impresso na **Figura 15**.

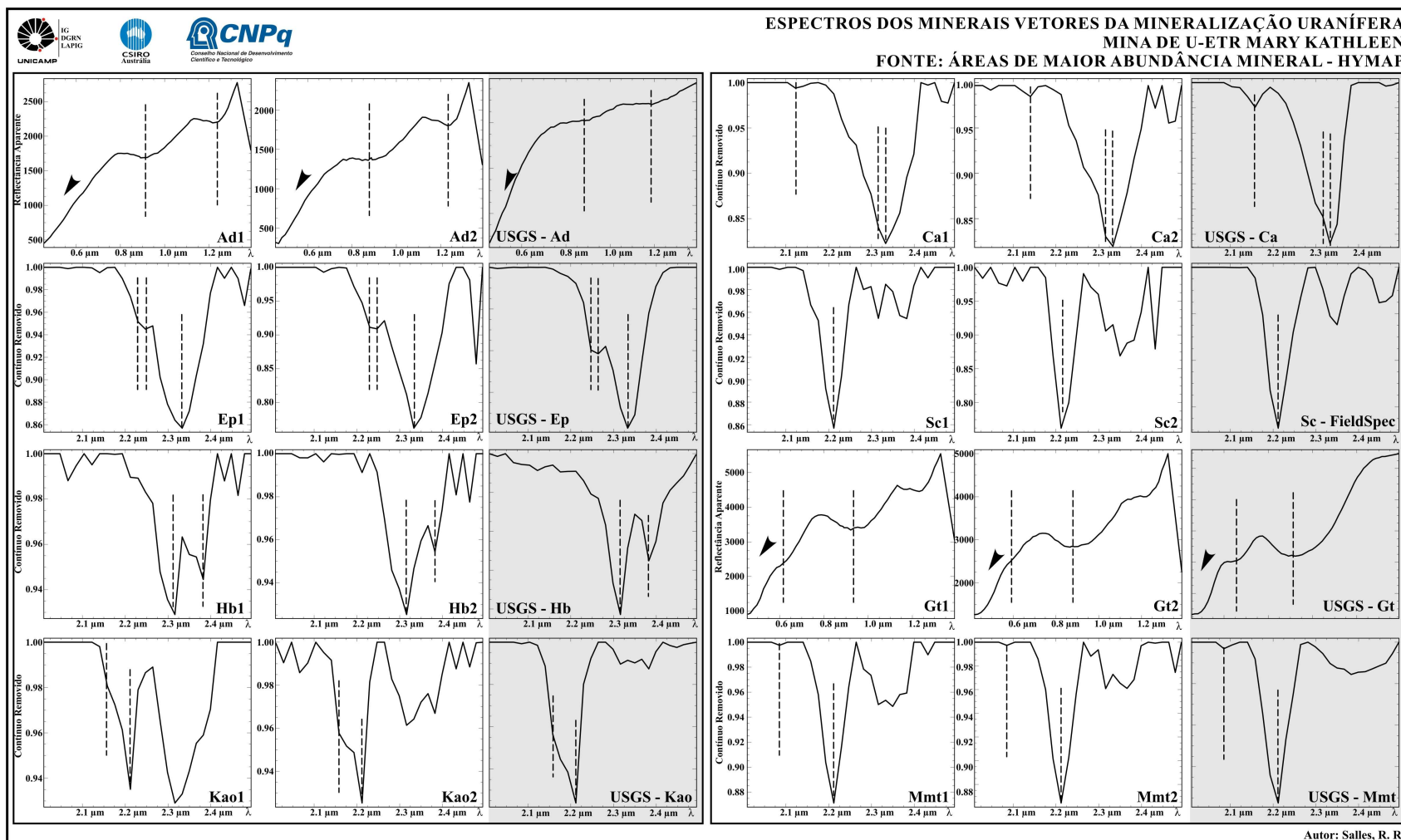


Figura 15. Espectros extraídos dos pixels das áreas de maior abundância mineral para cada mineral investigado. As siglas representam os minerais andradita (Ad), epidoto (Ep), hornblenda (Hb), caulinita (Kao), calcita (Ca), escapolita (Sc), goethita (Gt) e montmorillonita (Mmt). As linhas verticais salientam as principais feições de absorção. Os espectros utilizados da Biblioteca Espectral do USGS foram *Andradite* GDS12, *Epidote* GDS26.a 75-200 μm, *Hornblende_Mg* NMNH117329, *Kaolinite* CM9, *Calcite* WS272, *Gothite* WS222, *Montmorillonite* SWy-1. O espectro da escapolita foi mensurado por meio do espectrorradiômetro FieldSpec.

8. CONCLUSÕES

As principais conclusões desse estudo são as seguintes:

1. A conjunção dos atributos físicos, altas resoluções espacial e espectral, além da alta razão sinal/ruído, apontam o *scanner* HyMap como poderosa ferramenta para o mapeamento de assembléias minerais até então não mapeadas pelos sensores disponíveis (Landsat e ASTER). Neste contexto, o uso do HyMap na pesquisa uranífera traz informações substanciais para a atividade de prospecção, visto a restrição espacial destas ocorrências e dos minerais vetores de áreas mineralizadas, como os espécimes minerais cálcio-silicáticos associados a Mina *Mary Kathleen*;
2. O algoritmo *Reed-Xiaoli Detector* (RXD) definiu com êxito alvos espectralmente distintos do *background*. Assim, o RXD proveu de forma rápida um guia para a extração e análise de espectros de referência das imagens do HyMap. Muitos dos *pixels* diferenciados concentraram-se na parte sul da frente de lavra da Mina de U-ETR *Mary Kathleen*. A análise prévia destas áreas diferenciadas trouxe satisfatório ganho de informação, pois foi possível detectar nos alvos realçados, espectros de minerais compostos por Fe e molécula Al-OH em seu retículo cristalino;
3. Por meio do classificador espectral *Spectral Angle Mapper* (SAM) foram realçadas áreas com abundância de goethita e montmorillonita. As áreas dominadas por goethita, mais comum no setor sul da cava da Mina *Mary Kathleen*, corroboram os registros de Matheson & Searl (1956) quanto a ocorrência de zonas oxidadas. Muitas das áreas dominadas por montmorillonita são simultaneamente ricas em caulinita, ambas localizadas nas proximidades da mina.
4. O filtro *Minimum Noise Fraction* (MNF) segregou com eficiência os ruídos contidos nos dados, refinando a relação sinal/ruído das primeiras componentes MNF. O algoritmo mostrou ser uma alternativa eficaz para tratamento dos dados HyMap, visto que, além de eliminar o ruído, reduziu a dimensionalidade dos dados, exigindo menos recursos computacionais para o seu processamento. A classificação hiperespectral pelo classificador *Mixture Tuned Matched Filtering* (MTMF) contou apenas com as componentes MNF dominadas por *pixels* com alto índice de pureza. O realce preliminar de áreas de interesse por meio do MNF foi outra característica marcante deste filtro, pois algumas dessas áreas correlacionaram-se com áreas de abundância mineral realçadas pelos classificadores SAM e MTMF;

5. O classificador hiperespectral MTMF, aplicado para as bandas VNIR e SWIR2 do HyMap, possibilitou diferenciar áreas com abundância de andradita, epidoto, hornblenda, escapolita, calcita e caulinita. A adição das imagens *Ms Score* no espaço de cores RGB facilitou a construção de mapas próximos à realidade geológica, permitindo discriminar áreas com misturas destes minerais cálcio-silicáticos nas proximidades e na frente de lavra da mina;
6. A adição das imagens *Rules* e *Ms Score* no espaço de cores RGB simulou com eficiência a relação existente entre os minerais cálcio-silicáticos superficiais da mina. Ficaram evidentes áreas com domínio mineral, como por exemplo, o domínio da andradita sobre outros espectros minerais, além do zoneamento entre os mesmos. Estas informações foram traduzidas em mapas de abundância mineral que são de ampla utilidade na pesquisa uranífera de detalhe.
7. A diferenciação entre os espectros da andradita e da goethita necessita de mais estudos visto a similaridade de suas feições. Uma característica notável no espectro da andradita em relação ao da goethita é a reta em declive contínuo, com início em 0.80 μm , em direção a região do ultravioleta. O espectro da goethita, por sua vez, neste mesmo intervalo de comprimento de onda apresenta uma típica concavidade atenuada em 0.60 μm ;
8. Não foram encontrados registros na literatura sobre a associação entre a goethita, a caulinita e a montmorillonita à zonas mineralizadas, mas a presença desses minerais nas proximidades e bancada da mina foi confirmada por meio de suas assinaturas espectrais. A goethita pode estar intrinsecamente ligada à decomposição dos sulfetos por hidrólise. A feição de absorção diagnóstica da caulinita - argilomineral abundante em depósitos de diferentes *commodities* - indica ordenamento no grau de cristalinidade moderado. Este fato tem implicações diretas nas atividades de prospecção mineral, pois, por meio da análise no ordenamento estrutural desse mineral, áreas com alterações hidrotermais podem ser evidenciadas;
9. Os resultados positivos alcançados na caracterização de parte da mineralogia cálcio-silicática da Mina de U-ETR *Mary Kathleen*, agora podem ser aplicados para amplas áreas imageadas pelo *scanner* HyMap. Com isso, áreas de abundância classificadas a partir das assinaturas de assembléias minerais similares aquelas aqui mapeadas podem ser alvos em potencial para a pesquisa mineral uranífera regional.

ANEXO 1: MAPAS COM ABUNDÂNCIA DE MINERAIS PRIMÁRIOS

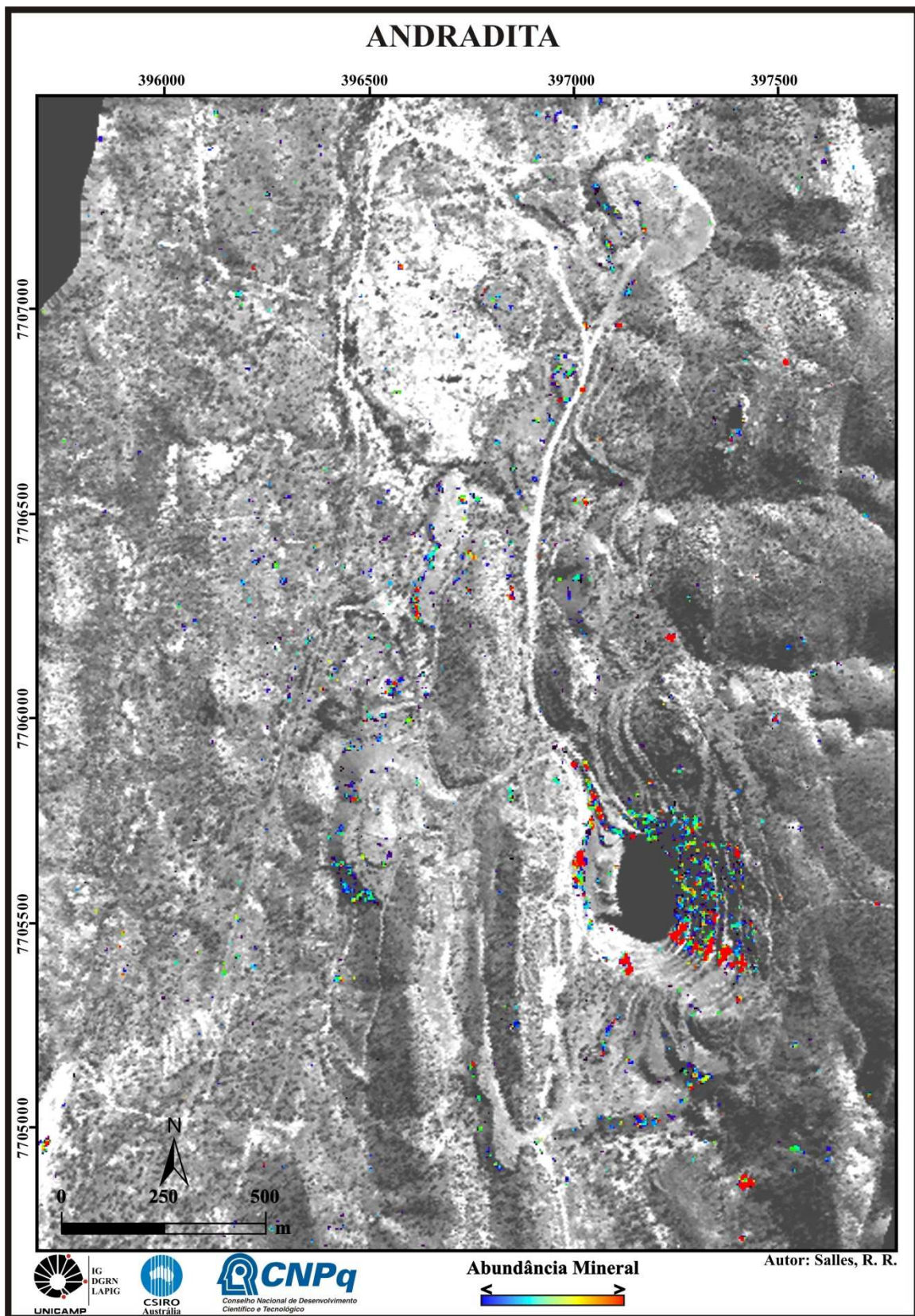


Figura 16. Áreas com abundância de andradita.

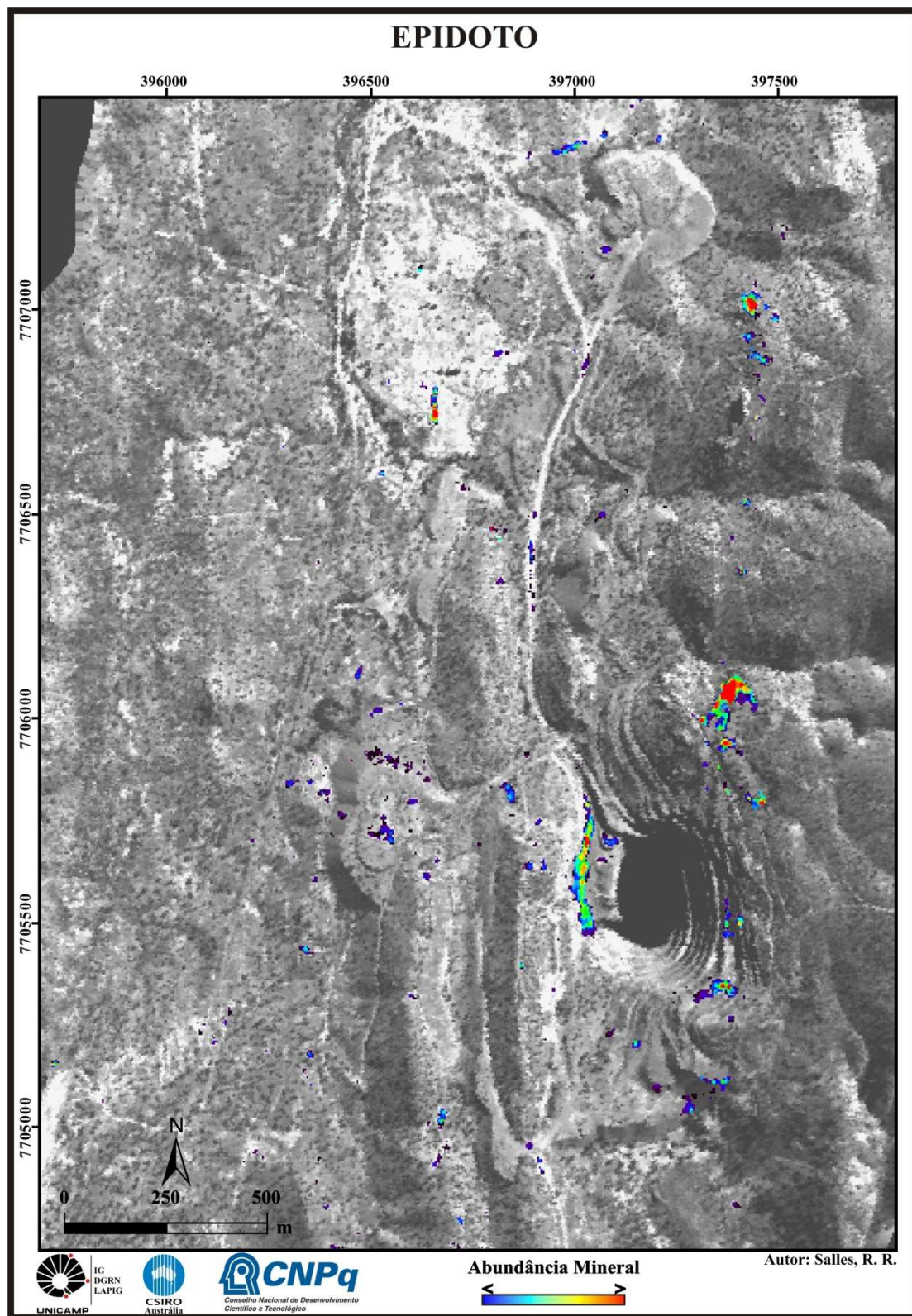


Figura 17. Áreas com abundância de epidoto.

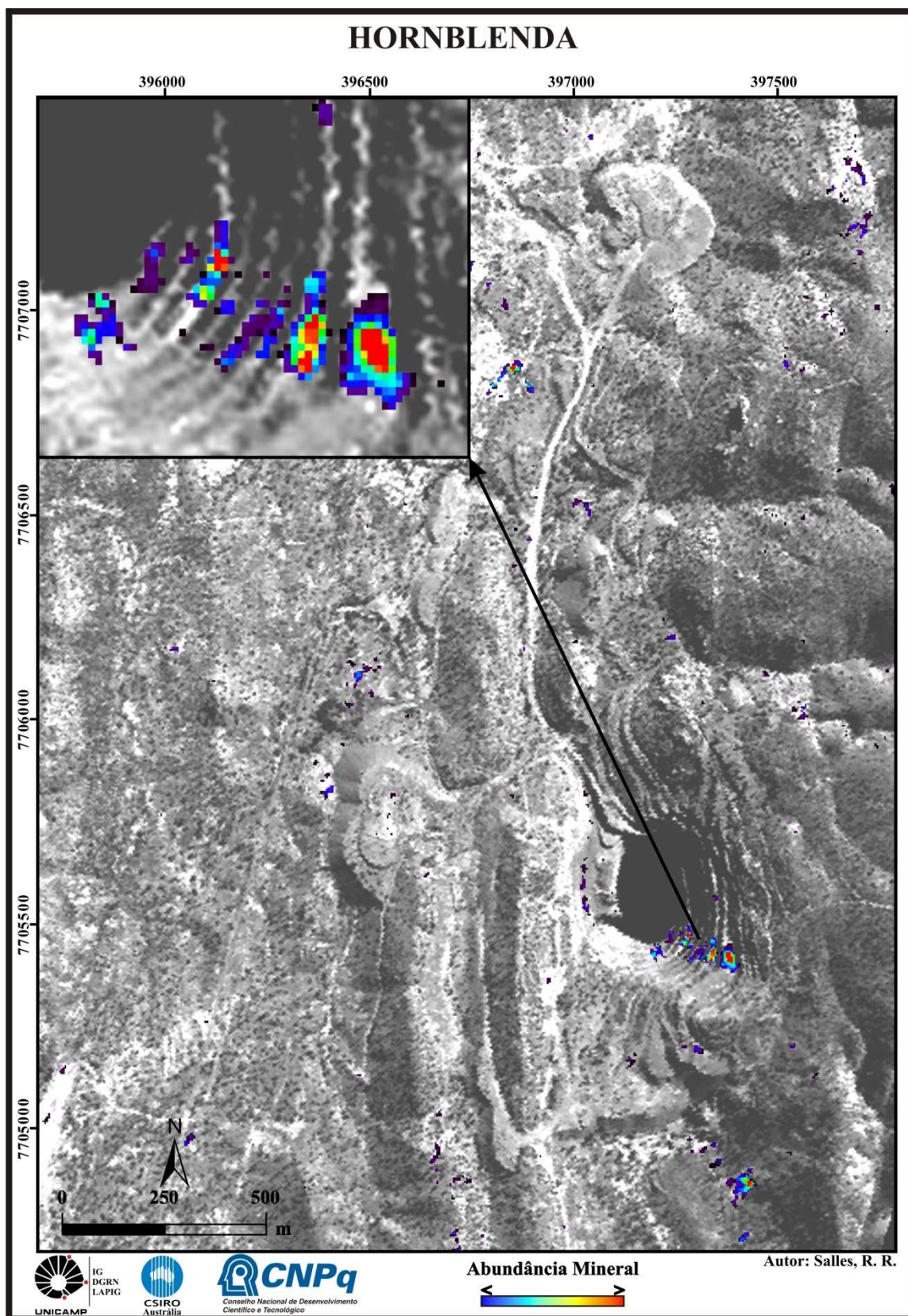


Figura 18. Áreas com abundância de hornblenda.

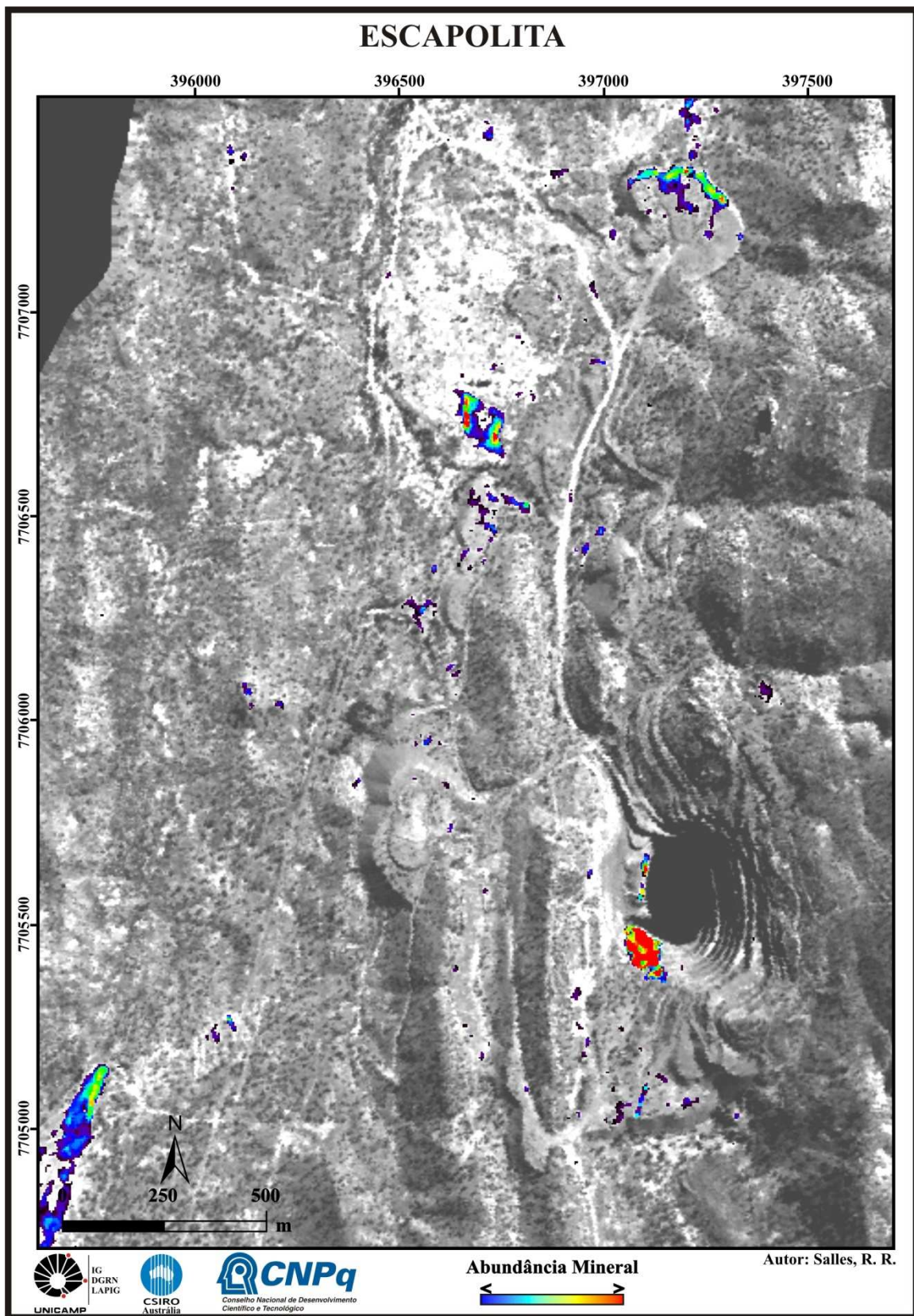


Figura 19. Áreas com abundância de escapolita.

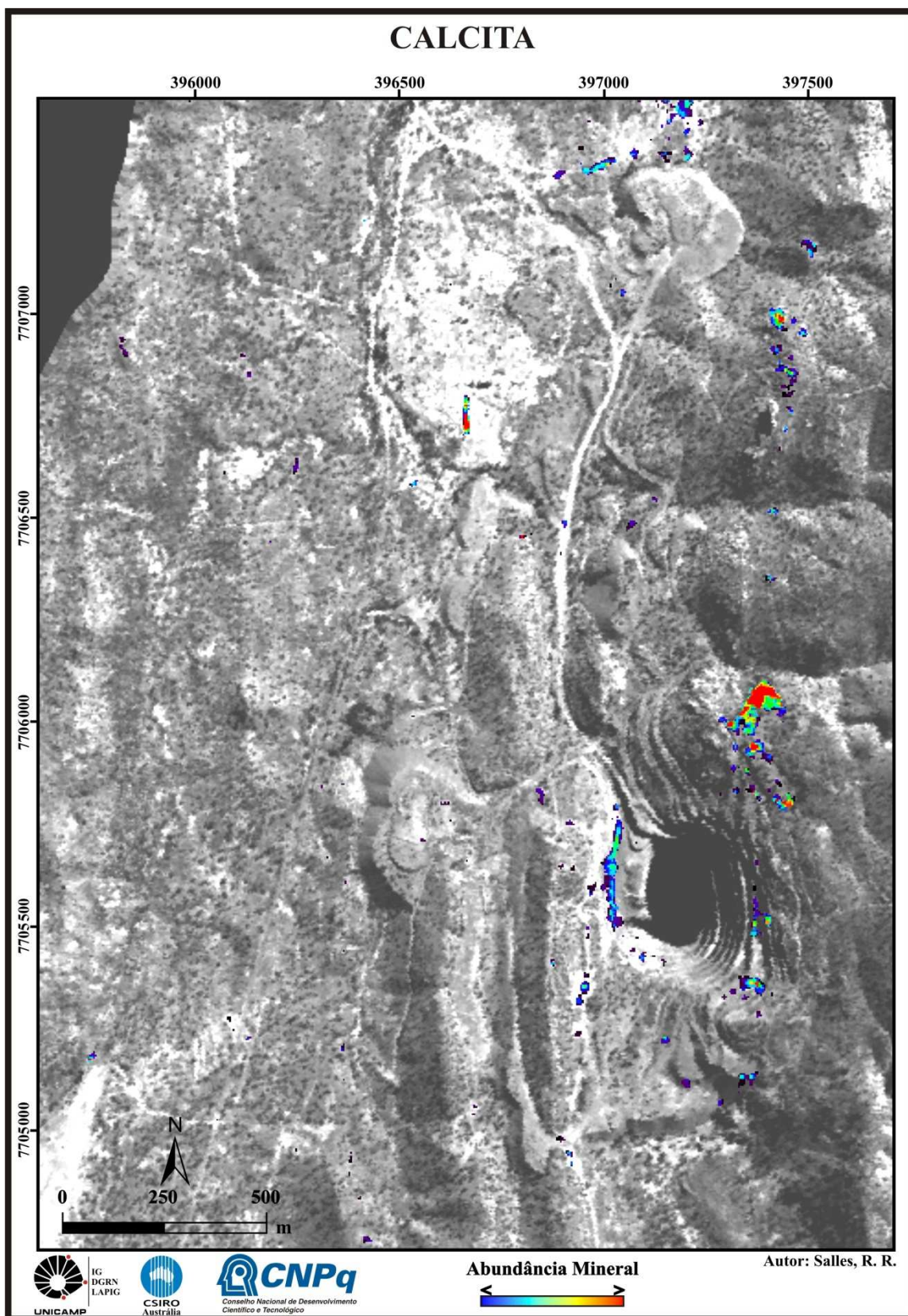


Figura 20. Áreas com abundância de calcita.

**ANEXO 2: MAPAS COM ABUNDÂNCIA DE MINERAIS DE ALTERAÇÃO
SUPÉRGENA**

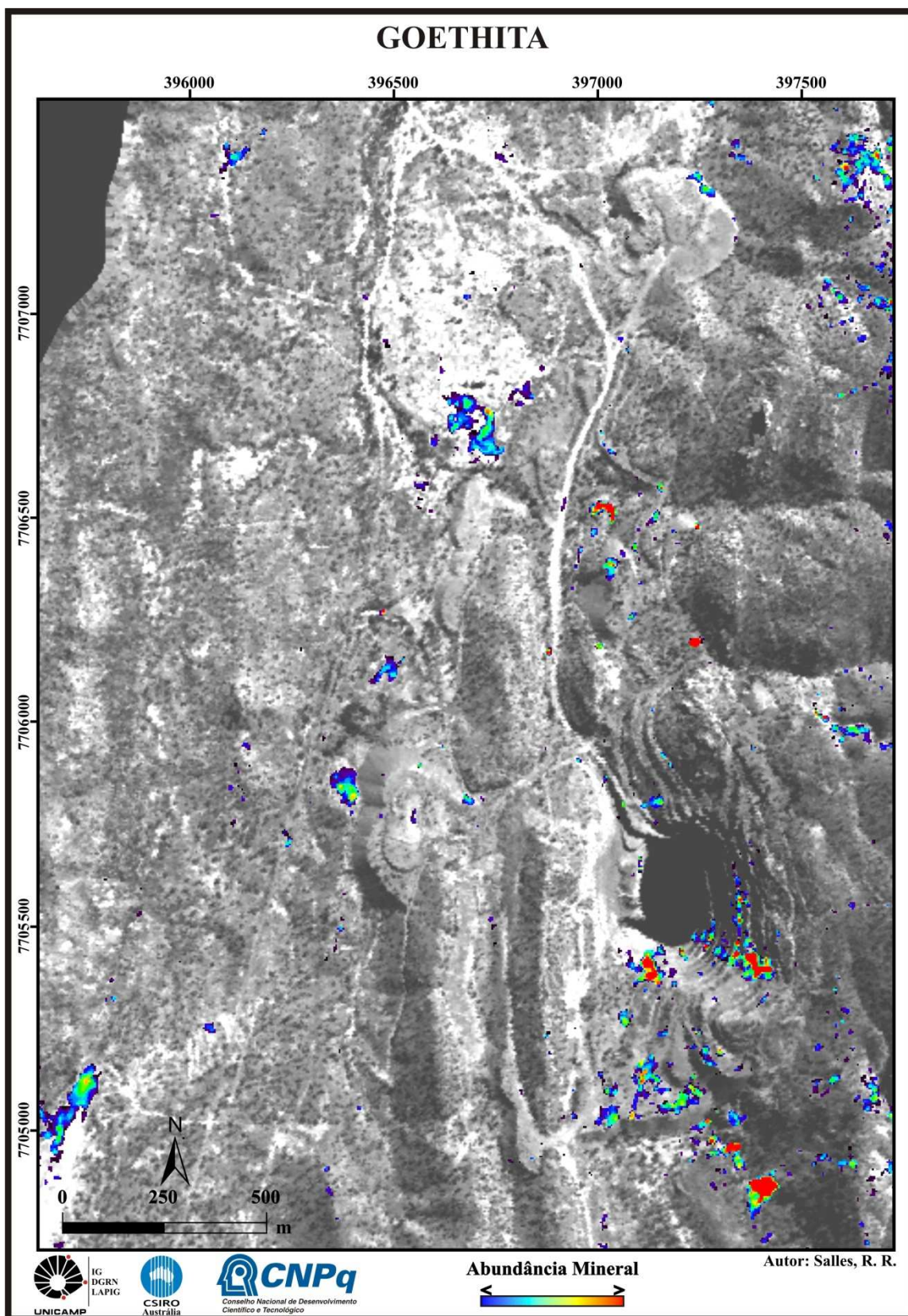


Figura 21. Áreas com abundância de goethita.

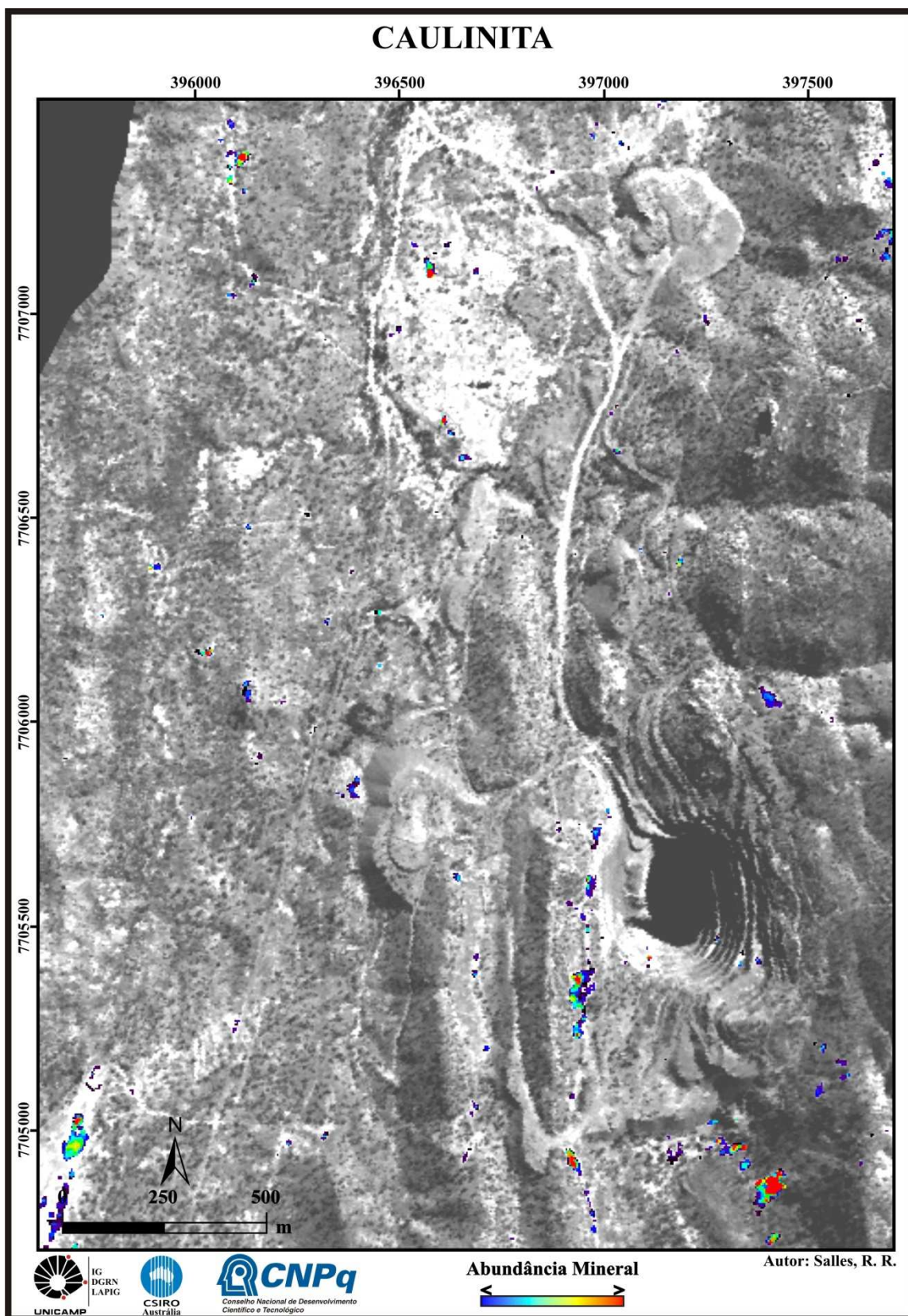


Figura 22. Áreas com abundância de caulinita.

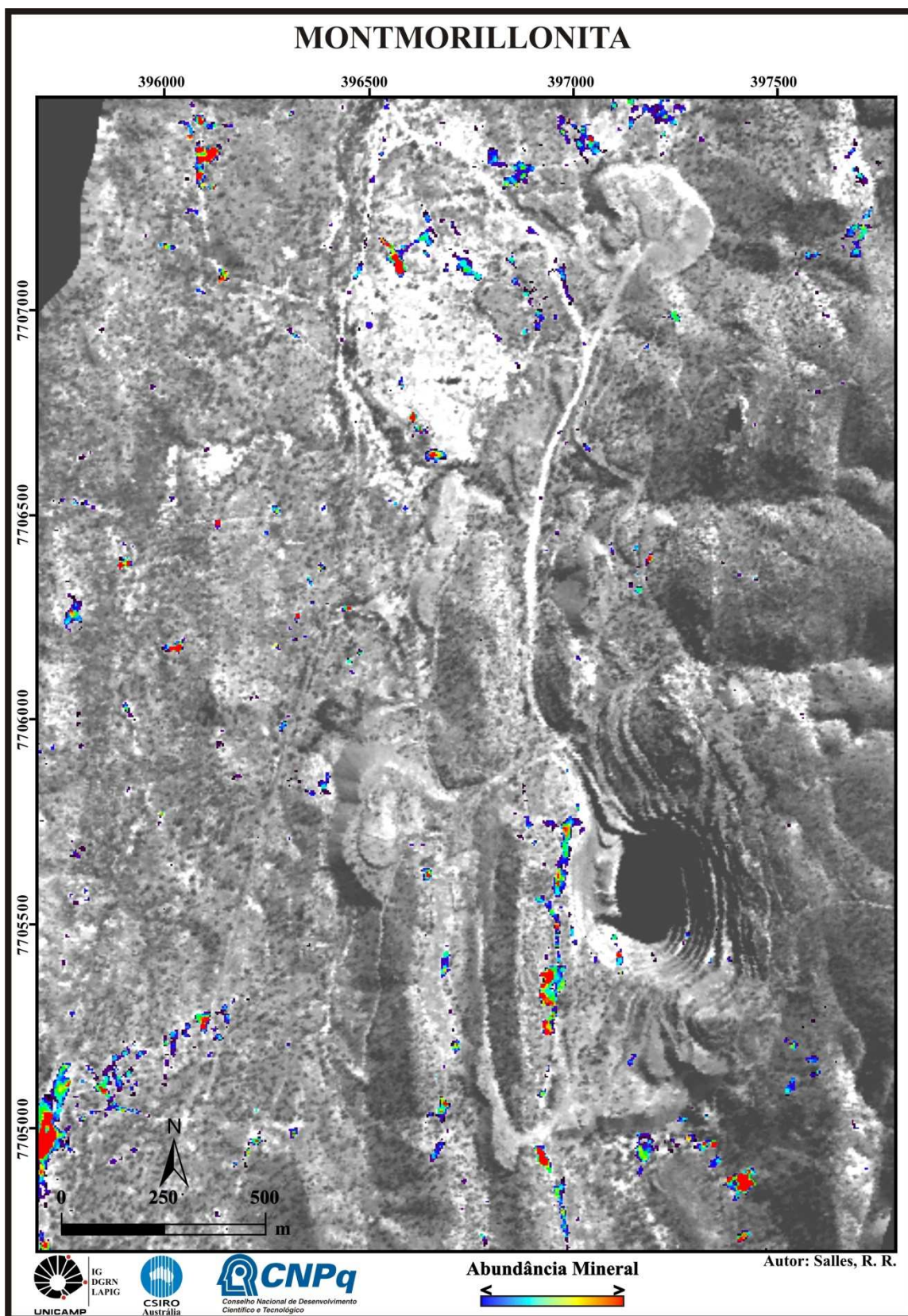


Figura 23. Áreas com abundância de montmorillonita.

Referências Bibliográficas

- Austin, J. R. ; Blenkinsop, T. G. 2008. The Cloncurry Lineament: Geophysical and geological evidence for a deep crustal structure in the Eastern Succession of the Mount Isa Inlier. **Precambrian Research**, v.168:50–68.
- Betts, P. G. ; Lister, G. S. ; O’Dea, M. G. 1998. Asymmetric extension of the Middle Proterozoic lithosphere, Mount Isa terrane, Queensland, Australia. **Tectonophysics**, v.296:293–316
- Betts, P.G. ; Giles, D. ; Mark, G. ; Lister, G.S. ; Goleby, B.R. ; Aillères, L. 2006. Synthesis of the Proterozoic evolution of the Mt Isa Inlier. **Australian Journal of Earth Sciences**, v.53:187–211.
- Betts, P.G. ; Goleby, B.R. 2006. Mount Isa tectonics. **Australian Journal of Earth Sciences**, v.52:1–3.
- Bierwirth, P. ; Huston, D. ; Blewett, R. 2002. Hyperspectral Mapping of Mineral Assemblages Associated with Gold Mineralization in the Central Pilbara, Western Australia. **Economic Geology**, v. 97:819 – 826.
- Blenkinsop, T. G. ; Huddleston-Holmes, C. R. ; Foster, D. R. W. ; Edmiston, M. A. ; Lepong, P. ; Mark, G. ; Austin, J. R. ; Murphy, F. C. ; Ford, A. ; Rubenach, M. J. 2008. The crustal scale architecture of the Eastern Succession, Mount Isa: The influence of inversion. **Precambrian Research**, v.163:31–49.
- Boardman, J. W. ; Kruse, F. A. 1994. Automated spectral analysis: a geological example using AVIRIS data, north Grapevine Mountains, Nevada: in **Proceedings, ERIN 10th Thematic Conference on Geological Remote Sensing, Environmental Research Institute of Michigan**, Ann Arbor, MI, p. I-407– I-418.
- Boardman, J. W. 1997. Mineralogic and geochemical mapping at Virginia City, Nevada using 1995 AVIRIS: a lesson in accuracy versus precision, *in* **Proceedings of the 12th Thematic Conference on Geological Remote Sensing, Environmental Research Institute of Michigan**, Denver, CO, p. 21–28.

- Boardman, J. W. 1998. Mineralogy and geochemical mapping at Virginia City, Nevada using 1995 AVIRIS: a lesson in accuracy versus precision, *in* **Summaries of the 7th JPL Airbone Earth Science Workshop**, v.1, p. 53.
- Budd, A. R. ; Wyborn, L. A. I. ; Bastrakova, I. V. 2001. **The Metallogenic Potential of Australian Proterozoic Granites**, Record 2001/12. Australian Government - Geoscience Australia. http://www.ga.gov.au/about/corporate/ga_authors/prot_granites/province_reports.jsp. Acesso: 10/2008. 2 PM
- Chang, C-I. 1998. Further Results on Relationship Between Spectral Unmixing and Subspace Projection. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.36:1030–1032.
- Chang, C-I. ; Liu, J-M. ; Chieu, B-C. ; Ren, H. ; Wang, C-M. ; Lo, C-S. ; Chung, P-C. ; Yang, C-W. ; Ma, D-J. 2000. Generalized constrained energy minimization approach to subpixel target detection for multispectral imagery. **Optical Engineers**, v.39:1275–1281.
- Chang, C-I. ; Chiang, S-S. 2002. Anomaly Detection and Classification for Hyperspectral Imagery. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.40:1314–1325.
- Chen, J. Y. ; Reed, I. S. 1987. A Detection Algorithm for Optical Targets in Clutter. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, v.1:46–59.
- Cudahy, T. ; Caccetta, M. ; Cornlius, A. ; Hewson, R. ; Wells, M. ; Skwarnecki, M. ; Halley, S. ; Hausknecht, P. 2005. **Mapping Regolith and Alteration Mineral Physicochemistries using Airborne Hyperspectral Data**. <https://www.appliedgeochemists.org/events/iges2005/presentations/19CudahyTom.pdf>. Acesso em: 11/2009. 2 PM.
- Cudahy, T. ; Jones, M. ; Thomas, M. ; Laukamp, C. ; Caccetta, M. ; Hewson, R. ; Rodger, A. ; Verrall, M. 2008. Next Generation Mineral Mapping: Queensland Airborne HyMap and Satellite ASTER Surveys 2006-2008. CSIRO Exploration & Mining Report P2007 / 364. <http://www.em.csiro.au/NGMM/QueenslandHyperspectralMineralMappingFinalReport.pdf>. Acesso: 11/2009. 5 PM

- Cuney, M. ; Kyser, K. 2008. **Recent and not-so-recent developments in uranium deposits and implications for exploration**. Short Course Series, v.39. Quebec: Mineralogical Association of Canada, 257 p. IGES.
- Deer, W. A.; Howie, R. A. ; Zussman, J. 1997. **Rock Forming Minerals: Orthosilicates**. United Kingdom: 2.^a ed., The Alden Press, 913 p.
- Duncan, R. J. ; Wilde, A. R. ; Bassano, K. ; Maas, R. 2006. Geochronological constraints on tourmaline formation in the Western Fold Belt of the Mount Isa Inlier, Australia: Evidence for large-scale metamorphism at 1.57 Ga? **Precambrian Research**, v.146: 120–137
- Durrance, E. M. 1986. **Radioactivity in Geology: principles and applications**. United Kingdom: John Wiley & Sons, Ellis Horwood series in geology, 432 p.
- Ellis, J. R. ; Scott, W. P. 2004. Evaluation of hyperspectral remote sensing as a means of environmental monitoring in the St. Austell China clay (kaolin) region, Cornwall, UK. **Remote Sensing of Environment**, v.93:118 – 130.
- Ford, A. ; Blenkinsop, T. G. 2008a. Evaluating geological complexity and complexity gradients as controls on copper mineralisation, Mt Isa Inlier. **Australian Journal of Earth Sciences**, v.55:13–23.
- Ford, A. ; Blenkinsop, T. G. 2008b. Combining fractal analysis of mineral deposit clustering with weights of evidence to evaluate patterns of mineralization: Application to copper deposits of the Mount Isa Inlier, NW Queensland, Australia. **Ore Geology Reviews**, v.33:435– 450.
- Foster, D. R. W. ; Austin, J. R. 2008. The 1800–1610 Ma stratigraphic and magmatic history of the Eastern Succession, Mount Isa Inlier, and correlations with adjacent Paleoproterozoic terranes. **Precambrian Research**, v.163:7–30.
- Giles, D. ; Aillères, L. ; Jeffries, D. ; Betts, P. ; Lister, G. 2006. Crustal architecture of basin inversion during the Proterozoic Isan Orogeny, Eastern Mount Isa Inlier, Australia. **Precambrian Research**, v. 148:67–84.

- Green, A. A. ; Berman, M. ; Switzer, P. ; Craig, M. D. 1998. A Transformation for Ordering Multispectral Data in Terms of Image Quality with Implications for Noise Removal. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.26: 65–74.
- Hambleton-Jones, B. B. ; Heard, R. G. ; Toens, P. D. 1984. Exploration for Surficial Uranium Deposits, *in* **Surficial Uranium Deposits**. Report of the Working Group on Uranium Geology, IAEA, Vienna, 61, IAEA-TECDOC–322.
- Harsanyi, J. C. ; Chang, C-I. 1994. Hyperspectral Image Classification and Dimensionality Reduction: An Orthogonal Subspace Projection Approach. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.32: 779–785.
- Heffernan, V. 2007. Uranium Exploration: A guide for the uninitiated. **Geosoft Earth Explorer** *in* www.earthexplorer.com, p. 12–13.
- Hunt, G. R. ; Ashley, R. P. 1979. Spectra of Altered Rocks in the Visible and Near Infrared. **Economic Geology**, v.74:1613–1629.
- Johnson, S. 2003. Constrained energy minimization and the target-constrained interference-minimized filter. **Optical Engineers**, v.42:1850–1854.
- Kraut, S. ; Scharf, L. L. ; Butler, R. W. 2005. The Adaptive Coherence Estimator: A Uniformly Most-Powerful-Invariant Adaptive Detection Statistic. **IEEE Transactions on Signal Processing**, v.53:427–438.
- Kwak, T. A. P. ; Abeyasinghe, P. B. 1987. Rare earth and uranium minerals present as daughter crystal in fluid inclusions, Mary Kathleen U-REE skarn, Queensland, Australia. **Mineralogical Magazine**, v.51:665–670.
- Kruse, F. A. ; Lefkoff, A. B. ; Boardman, J. B. ; Heidebrecht, K. B. ; Shapiro, A. T. ; Barloon, P. J. ; Goetz A. F. H. 1993. The spectral Image Processing System (SIPS) – Interactive Visualization and Analysis of Imaging spectrometer Data. **Remote Sensing of the Environment**, v.44:145–163.

- Lambert, I. ; Jaireth, S., McKay, A. ; Miezeitis, Y. 2005. **Why Australia has so much Uranium**. AUSGEO, Issue 80.
- Maas, R. ; McCulloch, M. T. ; Campbell, H. I. 1987. Sm-Nd Isotope Systematics in Uranium-Rare Earth Element Mineralization at the Mary Kathleen Uranium Mine, Queensland. **Economic Geology**, v. 82:1805–1826.
- Matheson, R. S. ; Searl, R. A. 1956. Mary Kathleen Uranium Deposit, Mount Isa-Cloncurry District, Queensland, Australia. **Economic Geology**, v.51:528–540.
- Mark, G.; Foster, D. R. W. 2000. Magmatic-hydrothermal-albite-actinolite-apatite-rich rocks form the Cloncurry district, NW Queensland, Australia. **Lithos**, v.51:223–225.
- Marshall, L. J. ; Oliver, N. H. S. 2008. Constraints on hydrothermal fluid pathways within Mary Kathleen Group stratigraphy of the Cloncurry Iron-Oxide-Copper-Gold District, Australia. **Precambrian Research**, v.163:151–158.
- Masterton, W. L. ; Slowinski, E. J. ; Stanitski, L. C. 1990. **Princípios de Química**. Rio de Janeiro: LTC, 6th ed., p.178.
- McLellan, J. G. ; Oliver, N. H. S. 2008. Discrete element modelling applied to mineral prospectivity analysis in the eastern Mount Isa Inlier. **Precambrian Research**, v.163:174–188.
- Manolakis, D. ; Marden, D. ; Shaw, A. G. 2003. Hyperspectral Image Processing for Automatic Target Detection Applications. **Lincoln Laboratory Journal**, v.14:79–116.
- Mark, G. ; Foster, D. R. W. ; Pollard, P. J. ; Williams, J. P. ; Tolman, J. ; Darvall, M. ; Blake, L. K. 2004. Stable isotope evidence for magmatic fluid input during large-scale Na-Ca alteration in the Cloncurry Fe oxide Cu-Au district, NW Queensland, Australia. **Terra Nova**, v.16:54–61.
- McKay, A. D. ; Miezeitis, Y. 2001. **Australia's uranium resources, geology and development of deposits**. AGSO – Geoscience Australia, Mineral Resource Report 1, 196 p.
- Meinert, L. D. 1992. Skarn and Skarn deposits. **Geoscience Canada**, v.19:145–162.

- Meinert, L. D. 1993. Igneous petrogenesis and skarn deposits, *in* Kirkham, R.V., Kirkham, R.V., Sinclair, W.D., Thorpe, R.I., Duke, J.M. **Mineral Deposit Modeling: Geological Association of Canada**, Special Paper 40, p.569–583.
- Monteiro, L. V. S. 2009. Amostra macroscópica de escapolita coletada no Depósito IOCG de Carajás. **Coleção pessoal**. Departamento de Geologia e Recursos Naturais. Instituto de Geociências. UNICAMP.
- Oliver, N. H. S. ; Pearson, P. J. ; Holcombe, R. J. 1985. Chronology of Magmatism, Skarn Formation, and Uranium Mineralization, Mary Kathleen, Queensland, Australia – A Discussion. **Economic Geology**, v.80:513–520.
- Oliver, N. H. S. 1995. Hydrothermal history of the Mary Kathleen Fold Belt, Mt Isa Block, Queensland. **Australian Journal Earth Sciences**, 42:267-279.
- Oliver, N. H. S. ; Pearson, P. J. ; Holcombe, R. J. ; Ord, A. 1999. Mary Kathleen metamorphic-hydrothermal uranium rare-earth element deposit: ore genesis and numerical model of coupled deformation and fluid flow. **Australian Journal Earth Sciences**, v.46:467 – 484.
- Oliver, N. H. S. ; Cleverley, J. S. ; Mark, G. ; Pollard, P. J. ; Fu, B. ; Marshall, L. M. ; Rubenach, M. J. ; Williams, P. J. ; Baker, T. 2004. Modeling the Role of Sodic Alteration in the Genesis of Iron Oxide-Copper-Gold Deposits, Eastern Mount Isa Block, Australia. **Economic Geology**, v.99:1145–1176.
- Oliver, N. H. S. ; Butera, K. M. ; Rubenach, M. J. ; Marshall, L. J. ; Cleverley, J. S. ; Mark, G. ; Tullemans, F. ; Esser, D. 2008. The protracted hydrothermal evolution of the Mount Isa Eastern Succession: A review and tectonic implications. **Precambrian Research**, v.163:108–130.
- Page, R. W. 1983. Chronology of Magmatism, Skarn Formation, and Uranium Mineralization, Mary Kathleen, Queensland, Australia. **Economic Geology**, v.78:838–853.
- Pal, D. ; Nash, D. G. 2003. Mineralogic Interpretation of HyMap Hyperspectral Data, Dixie Valley, Nevada, USA – Initial Results. **Geothermal Resources Council Transactions**, v. 27:669 – 672.

- Picasaweb, Álbuns da Web. 2010. Programa de fotos gratuito do Google. http://picasaweb.google.com/lh/photo/0BMP3en_eCWF2teL5hA9wg. Acesso em: 05/2010. 2 AM.
- Pirajno, F. 2009. **Hydrothermal Processes and Mineral Systems**. Australia, Springer, 1250 p.
- Pontual, S. ; Merry, N. ; Gamson, P. 1997. **G-MEX: Spectral Interpretation Field Manual**. AusSpec International, v.1, 153 p.
- Ren,, H. ; Chang, C-I. 2000. Target-constrained interference-minimized approach to subpixel target detection for hyperspectral images. **Optical Engineers**, v.29:3138–3145.
- Robb, L. 2008. **Introduction to ore-forming process**. Singapore:Blackwell Publishing, 368 p.
- Rubenach, M. J. ; Lewthwaite, K. A. 2002. Metasomatic albitites and related biotite-rich shists form a low-pressure, polymetmorphic terrane, Snake Crekk anticline, Mount Isa Inlier, north-eastern Australia: microstructures and P-T-d paths. 2002. **J. Metamorphic Geol.** v20:191–200.
- Schweizer, M. S. ; Moura, F. M. 2000. Hyperspectral Imagery: Clutter Adaptation in Anomlay Detection. **IEEE Transaction on Information Theory**, v.46:1855–1871.
- Souza Filho, R. C. ; Drury, S. A. 1998. Evaluation of JERS-1 (FUYO-1) OPS and Landsat TM images for mapping of gneissic rocks in arid areas. **Int. Journal of Remote Sensing**, v.19:3569–3594.
- Souza Filho, C. R. ; Tápia, C. H. ; Xavier, R. P. 2003. Infrared spectroscopy and ASTER imagery analysis of hydrothermal alteration zones at the Quellaveco porphyry-copper deposit, southern Peru. In: **ASPRS Annual Conference**, Anchorage, Alaska. Proceedings of the 2003 ASPRS Annual Conference. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, v.1:1–10.
- Wenk, H-R. ; Bulakh, A. 2008. **Minerals: Their constitution and origin**. United Kingdom: 3rd ed., Cambridge University Press, 635 p.
- WNA. 2010. World Nuclear Association. World Uranium Mining. <http://www.world-nuclear.org/info/inf23.html>. Acesso: 05/2010. 1 AM.