

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**

**AVALIAÇÃO DA POTENCIALIDADE METALOGENÉTICA DO  
CINTURÃO DOM FELICIANO LESTE DO RIO GRANDE DO  
SUL POR MEIO DA PROSPECÇÃO GEOQUÍMICA**

**FRANCISCO PAULO GARCIA**

ORIENTADORA – Profa. Dra. Juliana Charão Marques

Volume I

Porto Alegre – 2017

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**

**AVALIAÇÃO DA POTENCIALIDADE METALOGENÉTICA DO  
CINTURÃO DOM FELICIANO LESTE DO RIO GRANDE DO  
SUL POR MEIO DA PROSPECÇÃO GEOQUÍMICA**

**FRANCISCO PAULO GARCIA**

ORIENTADORA – Profa. Dra. Juliana Charão Marques

**BANCA EXAMINADORA**

Profa. Dra. Lena Virginia Soares Monteiro – Instituto de Geociências –  
Universidade de São Paulo

Prof. Dr. Artur Cezar Bastos Neto – Programa de Pós-Graduação em  
Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Marcus Vinícius Dorneles Remus – Programa de Pós-Graduação em  
Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dissertação de Mestrado apresentada  
como requisito parcial para obtenção do  
Título de Mestre em Geociências.

Porto Alegre – 2017

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço ao apoio da minha família, em especial a meus pais, Edison e Nelly, por todos os ensinamentos, e a minha esposa, Bruna, por me apoiar incondicionalmente.

Agradeço aos meus orientadores, Profa. Dra. Juliana Charão Marques e Prof. Dr. José Carlos Frantz, pelo apoio, incentivo e confiança.

Agradeço à colega Isadora Alberti Henrichs que, apesar de estar no outro hemisfério, me ajudou na tradução o artigo científico que integra esta dissertação.

Agradeço ao Prof. Dr. João Felipe Coimbra Leite Costa pela pronta dedicação em me auxiliar na parte estatística do meu TCC e deste trabalho.

Agradeço a todos os colegas e amigos que fiz durante a graduação e mestrado, os quais contribuíram de uma forma ou outra para a conclusão desta etapa.

Garcia, Francisco Paulo

Avaliação da potencialidade metalogenética do Cinturão Dom Feliciano Leste do Rio Grande do Sul por meio da prospecção geoquímica . / Francisco Paulo Garcia. - Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2017.

[80 f.] il.

Dissertação (Mestrado).- Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Geociências. Instituto de Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2017.

Orientador(es):Juliana Charão Marques

1. Prospecção geoquímica 2. Anomalias geoquímicas 3. Dados de sedimentos de corrente 4. Cinturão Dom Feliciano Leste I. Título.

CDU 55

---

Catálogo na Publicação

Biblioteca Instituto de Geociências - UFRGS

Sibila F. T. Binotto

CRB 10/1743

## RESUMO

Nos últimos anos, estudos de prospecção geoquímica aliados à análise estatística e a técnicas de geoprocessamento tornaram-se imprescindíveis na busca por novos depósitos minerais. O Serviço Geológico do Brasil (CPRM) executou o levantamento geoquímico na porção leste do Estado do Rio Grande do Sul, em uma área de aproximadamente 32.481 km<sup>2</sup>, e disponibilizou dados de sedimentos de corrente e de concentrado de bateia. A área desse estudo está situada sobre o Escudo Sul-riograndense, mais especificamente no Cinturão Dom Feliciano Leste. Trata-se de uma área formada por um volumoso magmatismo granítico com características de retrabalhamento crustal, na qual predominam rochas de idades proterozóicas. Apesar de pesquisas pontuais haverem encontrado indícios para a descoberta de novas ocorrências minerais na porção leste do escudo, esta tem sido pouco estudada. Sendo assim, este trabalho objetivou investigar possibilidades de novos alvos a partir da identificação de valores anômalos nesta região, empregando técnicas estatísticas e de geoprocessamento. Foram analisadas 1528 amostras de sedimentos de corrente e 1477, de concentrados de bateia, disponibilizadas no banco de dados digital da CPRM (Geobank). Determinaram-se os limiares para elementos químicos de sedimentos de corrente que possibilitaram identificar áreas anômalas. Os dados de concentrados de bateia foram tratados de forma distinta, a partir da construção de mapas de densidade do tipo Kernel. As áreas anômalas foram apresentadas de duas formas distintas. As Anomalias Puramente Estatísticas correspondem às regiões que apresentaram elementos químicos com valores acima do limiar e consideram apenas a posição geográfica destes, independentemente da afinidade existente entre os mesmos. Já as Anomalias Prospectivas foram assim denominadas, pois a delimitação da área anômala foi baseada no agrupamento de elementos que possuem afinidade, utilizando conceitos de prospecção como assinatura geoquímica e elementos farejadores. Os resultados encontrados apontam para seis áreas anômalas na porção leste do escudo sul-riograndense, os quais apresentam assinaturas de depósitos IOCG, Pórfiro-epitermal e depósitos relacionados a granitos estaníferos. Este estudo geoquímico de escala regional revelou áreas anômalas inéditas no escudo sul-riograndense. Fica claro que existe um alto potencial na área da metalogenia a ser ainda estudado.

**Palavras chave:** prospecção geoquímica, anomalias geoquímicas, dados de sedimentos de corrente.

## ***ABSTRACT***

In the last few years, geochemical prospective studies allied to statistical analysis and geoprocessing techniques became indispensable in the search for new mineral deposits. The Brazilian Geological Survey (CPRM) performed a geochemical survey in the eastern portion of the Rio Grande do Sul State, in an area that covers 32.481 km<sup>2</sup>, and provided stream sediment and pan concentrate data. The studied area is situated in the Rio Grande do Sul's Shield, more specifically in the Dom Feliciano Eastern belt. The area is constituted by a massive granitic magmatism with crustal reworking characteristics, in which rocks of Proterozoic age prevail. Although some researches had found clues of new mineral occurrences in the eastern part of the Shield, it is still understudied. Thus, this study aimed to investigate the possibilities of new targets from the identification of anomalous values in the region, employing statistical and geoprocessing techniques. 1528 stream sediment and 1477 pan concentrate samples are available in the digital database of CPRM (Geobank) were analysed. The threshold values for stream sediment chemical elements were determined, which allowed identifying the anomalous areas. The pan concentrate data was analysed differently, from the construction of Kernel density maps. The resulting anomalous areas of this study were presented in two different ways, as Purely Statistical Anomalies (PSA) and Prospective Anomalies (PA). The regions that presented chemical elements above the threshold value, considering just their geographical position, regardless of the chemical affinity between the elements, were denominated Purely Statistical Anomalies. In the Prospective Anomalies, the delimitation of the anomalous area was based on the grouping of the elements that had chemical affinity, using prospective concepts as geochemical signature and pathfinder elements. The results pointed to six anomalous areas in the Sul-Riograndense Shield, which presented signatures of Iron oxide copper-gold (IOCG), porphyry-epithermal and stanniferous granites deposits. This regional scale geochemical study revealed unprecedented anomalous areas in the Sul-Riograndense Shield. Besides that, it became clear that there is a great metallogenic potential that still need to be studied.

**Keywords:** geochemical prospecting, geochemical anomalies, stream sediment data.

## SUMÁRIO

RESUMO.....	i
<i>ABSTRACT</i> .....	ii
TEXTO EXPLICATIVO SOBRE A ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	iv
CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO .....	5
INTRODUÇÃO E OBJETIVOS .....	6
REVISÃO DO ESTADO DA ARTE.....	7
DEPÓSITOS MINERAIS RELACIONADOS A GRANITOS .....	7
IRON-OXIDE-COPPER-GOLD (IOCG) .....	7
DEPÓSITOS PÓRFIRO.....	10
DEPÓSITOS EPITERMAIS .....	11
<i>GRANITE-RELATED</i> .....	14
PROSPECÇÃO GEOQUÍMICA .....	15
PROSPECÇÃO GEOQUÍMICA EM SEDIMENTOS DE CORRENTE .....	17
PROSPECÇÃO GEOQUÍMICA EM CONCENTRADOS DE BATEIA .....	22
INTERPRETAÇÃO DE DADOS GEOQUÍMICOS.....	24
BIBLIOGRAFIA .....	31
CAPÍTULO II: ARTIGO CIENTÍFICO .....	39
COMPROVANTE DE SUBMISSÃO DO ARTIGO.....	40
RESEARCH PAPER.....	41

## TEXTO EXPLICATIVO SOBRE A ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho está apresentado na forma de artigo científico conforme especifica a Norma 103 – Submissão de Teses e Dissertações do Programa de Pós-Graduação em Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Conseqüentemente, sua organização compreende as seguintes sessões principais:

- Introdução sobre o tema e descrição do objeto da pesquisa de Mestrado, nos quais estão sumarizados os objetivos o estado da arte do tema sob pesquisa.
- Comprovante de submissão de artigo à revista científica: *Journal of Geochemical Exploration*.
- Artigo submetido a periódico com corpo editorial permanente e revisores independentes, escrito pelo autor durante o desenvolvimento de seu Mestrado.

## **CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO**

## INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

A prospecção geoquímica é uma técnica essencial para a descoberta de novas jazidas minerais. Uma série de elementos metálicos pode ser mapeada através da análise de amostras de solo, rochas, água, sedimentos de corrente e, até mesmo, fragmentos de vegetais (Matosso & Formoso, 2007). Com a evolução e o avanço da tecnologia nos últimos anos, a cartografia geoquímica tem se tornado uma ferramenta imprescindível nos estudos de prospecção geoquímica (Lima *et al.*, 2003; Rattenbury & Partington, 2003; Huston *et al.*, 2013).

Aliando técnicas estatísticas e computacionais como o geoprocessamento, podem ser construídos mapas geoquímicos que facilitam a interpretação e a correlação de anomalias geoquímicas com a disposição das rochas de determinada região (Eppinger *et al.*, 2013; Zheng *et al.*, 2014).

Os estudos de prospecção mineral no Escudo Sul-rio-grandense concentraram-se historicamente na porção central e oeste. A porção leste do escudo foi preterida ao longo dos anos e, por ser constituída majoritariamente por rochas granitóides, foi considerada como terrenos granito-migmatíticos com baixo potencial geoeconômico até a década de 80. Escassos trabalhos do ponto de vista metalogenético podem ser destacados desta região. Frantz *et al.* (1998) discutiram a gênese e a evolução dos fluidos hidrotermais formadores da mineralização de estanho da Mina Campinas, os quais ocorrem como cassiterita em greisens e veios de quartzo dos granitos presentes na região denominada como Distrito Estanífero de Encruzilhada do Sul. Recentemente, trabalhos foram realizados nos arredores do município de Amaral Ferrador - RS na área da Mina Galena (Nunes *et al.*, 2004; Rost *et al.*, 2006; Henrichs *et al.*, 2011). Henrichs *et al.* (2011) classificaram o depósito como um sistema epitermal de baixa sulfetação, sendo importante fonte de metais base como Pb e Zn. Neste sentido, apesar de pouco conhecida, a área leste do escudo apresenta indícios de que possa vir a ser uma região importante do ponto de vista prospectivo, contudo mais estudos se fazem necessários. Desta forma, o presente estudo buscou avaliar a potencialidade metalogenética da porção

leste do Escudo Sul-rio-grandense através de uma avaliação regional de dados geoquímicos existentes.

O Serviço Geológico do Brasil (CPRM) executou o levantamento geoquímico intitulado “Prospecção no Cinturão Dom Feliciano”, na porção leste do Estado do Rio Grande do Sul (CPRM, 2010). Foram realizadas amostragens de sedimentos de corrente e concentrados de bateia na escala aproximada de 1:250.000 com adensamento até cerca de 1:100.000 em áreas de maior relevância.

Considerando que o Serviço Geológico Brasileiro (CPRM) disponibilizou esses dados sem interpretá-los, o presente estudo teve como objetivo definir os locais que apresentam anomalias geoquímicas e que, possivelmente, possam ser áreas potenciais para a presença de depósitos minerais no escudo sul-riograndense. Para tanto, foram utilizadas ferramentas de geoprocessamento como mapas de densidade e de interpolação, tanto para os dados de concentrado de bateia quanto para os de sedimento de corrente, sendo que para o último também foram aplicados tratamentos estatísticos.

## **REVISÃO DO ESTADO DA ARTE**

Para o embasamento da presente pesquisa e discussão dos resultados obtidos, fez-se necessária uma revisão do estado da arte. Foram abordados os principais depósitos relacionados a granitos como Depósitos iron oxide copper-gold (IOCG), Pórfiros, Epitermais e do tipo *Granite-related*. Adicionalmente, foi realizada uma revisão sucinta acerca dos principais tópicos de prospecção geoquímica.

## **DEPÓSITOS MINERAIS RELACIONADOS A GRANITOS**

### **IRON-OXIDE-COPPER-GOLD (IOCG)**

Os depósitos do tipo iron oxide copper-gold (IOCG), conhecidos também como depósitos de óxidos de ferro-cobre-ouro, incluem diversos sistemas de mineralização e são encontrados em todos os continentes (Hitzman, 2000). A proposição deste tipo de modelo de depósito surgiu a partir da descoberta do Olympic Dam no ano de 1975, no sul da Austrália (Roberts & Hudson, 1983).

Embora a grande maioria destes depósitos esteja datada no Eón Proterozoico, os IOCG apresentam uma grande diversidade temporal, ocorrendo desde o Neoarqueano, como o depósito brasileiro de Salobo (2.58 Ga), até o Cenozoico, como observado nos mais jovens depósitos andinos de Candelaria (0.115 Ga), Raul Condestable (0.115 Ga) e Manto Verde (0.12 Ga) (Williams *et al.*, 2005).

Segundo Williams *et al.* (2005), os IOCG apresentam as seguintes características:

1. Apresentam Cobre com ou sem Ouro associado como metais econômicos;
2. O minério possui intensa alteração hidrotermal e é relacionado a um forte controle estrutural;
3. Possuem abundância de Magnetita e/ou Hematita;
4. Os óxidos de Ferro possuem uma razão Fe/Ti maior do que as observadas em rochas ígneas.
5. Ao contrário do que ocorre com depósitos do tipo Pórfiro e Skarn, o IOCG não apresenta associação espacial clara com intrusões ígneas.

Ademais, a maioria dos depósitos do tipo IOCG apresenta uma ampla associação de espaço-tempo com batólitos graníticos, ocorre na crosta terrestre forma extensa e é comumente enriquecida geoquimicamente com elementos menores, incluindo combinações com U, elementos terras raras, F, P, Mo, Ag, Ba, Co e Ni (Williams *et al.*, 2005).

Além de serem encontrados em locais de idades diversas, esses depósitos também estão presentes em distintos ambientes geológicos, como em riftes continentais (região de Carajás, Brasil, e Conclurry District, Austrália), em ambientes de magmatismo anorogênico (por exemplo, Olympic Dam) e também em ambientes de *back-arc* (depósitos chilenos de Candelária e Manto Verde, além de Kiruna, na Suécia). Um tipo incomum de depósito IOCG é o que contém Urânio. O caso mais famoso é o de Olympic Dam na Austrália. Esse é o único depósito IOCG que possui Urânio como principal comódite e é considerado o maior recurso de Urânio do mundo. Outros depósitos IOCG com altos teores de urânio estão localizados no sul

da Austrália (Gawler Cráton e Curnamona), os quais são fontes significativas de elementos terras raras (ETR) (Huston *et al.* 2013).

O modelo IOCG é um modelo geológico bem definido que elucida a associação mineral de cobre e ouro com óxidos de ferro, magnetita e hematita. Desta forma, diversos depósitos mundiais que continham estas associações minerais foram revistos e alguns foram reclassificados como do tipo IOCG. O descobrimento do depósito de Candelária, no final dos anos 80, no antigo distrito chileno de Punta del Cobre e seu posterior enquadramento ao modelo IOCG, revelou o potencial da região Cordilheira Norte do Chile alojar este tipo de depósito. Posteriormente, outros distritos minerais já conhecidos, como o de Manto Verde e San Antonio, foram classificados como IOCG. O cinturão de IOCG mais jovem está localizado na Costa Norte da Cordilheira do Chile e no Sul do Peru, onde os depósitos são partes de um arco vulcânico-plutônico de idade jurássica/cretácea. Esse arco é caracterizado por volumosos complexos toleíticos a cálcio-alcálicos de gabros com composição parental granodiorítica derivada do manto (Sillitoe, 2003).

No Brasil, a Província Mineral de Carajás hospeda importantes reservas de Cobre e Ouro associadas a expressivas quantidades de hematita e magnetita. O maior depósito IOCG do país é o de Salobo, no qual o minério é constituído principalmente por bornita, calcocita, magnetita e quantidades menores de calcopirita, e ouro, além de exibir significativos conteúdos de Co, Ni, As, Ag, Mo e ETR. Além de Salobo, o sistema IOCG também é representado pelos depósitos brasileiros de Cristalino, Igarapé/Alemão, Sossego, Gameleira e Alvo 118. Nestes, as zonas de cisalhamento regionais, que definem o contato entre o Supergrupo Itacaiúnas, metavulcano-sedimentar, e o embasamento, que é constituído por gnaisses tonalítico, trondjemíticos e migmatitos do Complexo Xingu, representam importantes controles para as mineralizações (Augusto *et al.*, 2008).

Os depósitos do tipo IOCG são formados em profundidades que variam de 10 até 5 km, onde estão os mais rasos. Uma característica típica de depósitos IOCG é a presença de dois fluidos distintos durante a formação de depósito: (1) fluido altamente oxidado (águas meteóricas e/ou de superfície), e (2) salmouras de altas

temperaturas de fontes profundas (fluidos magmáticos e hidrotermais e/ou fluidos que reagiram com rochas metamórficas) (Huston *et al.* 2013).

Segundo a revisão de Huston *et al.* (2013), as fontes de Cu, Au, S, Cl e CO<sub>2</sub> podem ser derivadas de magmas contemporâneos (félsicos e/ou máficos) ou de rochas sedimentares e ígneas que foram lixiviadas pelos fluidos de minérios. Já o Urânio e os elementos terras raras (ETR) foram provavelmente lixiviados a partir de granitoides ou de rochas vulcânicas félsicas.

## **DEPÓSITOS PÓRFIRO**

Os depósitos do tipo pórfiro são de extrema relevância econômica, uma vez que neles são encontradas as maiores fontes de cobre e molibdênio do mundo. Esses depósitos também possuem os maiores recursos de Au, Ag e Sn, além de conter subprodutos metálicos como Re, W, In, Pt, Pd e Se (Sinclair, 2007).

Segundo Kirkham (1972), estes depósitos são estruturalmente controlados e estão relacionados de forma espacial e temporal com intrusões porfiríticas félsicas a intermediárias. A sua grande dimensão e o forte controle estrutural, como veios, *stockworks*, fraturas e brechas, o diferenciam dos outros sistemas minerais relacionados a granitos, como skarn e depósitos epitermais (Sinclair, 2007).

Do ponto de vista geográfico, os depósitos pórfiros ocorrem em todo o mundo. Embora sejam datados de idades arqueana ao recente, a maioria dos depósitos de relevância econômica estão distribuídos em cinturões orogênicos do Mesozoico ao Cenozoico, localizados na porção oeste da América do Sul e do Norte, em torno da margem oeste da bacia do pacífico e no cinturão orogênico situado na Europa oriental e na Ásia meridional. Os depósitos pórfiros foram formados a partir da ocorrência de intrusões múltiplas associadas a uma série de estruturas presentes em baixas profundidades crustais, as quais permitem a circulação de fluidos hidrotermais magmáticos, que se misturam com fluidos meteóricos que infiltram tais estruturas (Sinclair, 2007).

A estreita relação temporal e genética entre o magmatismo e a mineralização hidrotermal indica a presença de intrusões de composição mineral variada e da

formação de brechas que foram dispostas entre ou durante o período de mineralização. Desta forma, a maior parte do minério gerado se localiza nas rochas encaixantes. O metal contido nestes depósitos é diverso e foi amplamente debatido e classificado segundo alguns autores. Kirkham e Sinclair (1995) definiram os principais tipos de pórfiro, levando em consideração a comódite de metal e também os subprodutos. Entre eles se destacam os mais importantes: Cu-Mo, Cu-Au, Cu, Au e Mo (Sinclair, 2007).

Geralmente os depósitos pórfiros ricos em Cu e Au estão associados a rochas intrusivas originadas a partir da cristalização fracionada de magmas máficos, os quais são, por sua vez, originados a partir da fusão parcial do manto nas margens convergentes de placas (margens continentais ativas e arco de ilhas). Já os pórfiros com Molibdênio, são relacionados a intrusões félsicas derivadas de magmas com uma significativa composição de crosta continental refundida (Sinclair, 2007).

## **DEPÓSITOS EPITERMAIS**

O termo depósito epitermal foi inicialmente proposto por Lindgren (1933) para definir um tipo de depósito metalífero formado a partir de fluidos aquosos e influenciado por intrusões ígneas, por temperaturas relativamente baixas (menos de 200°C) e por condições de “pressões moderadas”. Atualmente, entende-se que a maioria dos depósitos epitermais é formada em temperaturas entre 150 e 300° C (por vezes maiores) e em profundidades desde a superfície até 1 ou 2 km e pressões variadas. Tais depósitos são geralmente relacionados a etapas tardias e posteriores de um vulcanismo. Na superfície terrestre, a presença deste tipo de depósito é indicada pela ocorrência de fontes termais ou de fumarolas e de atividade sulfurosa provenientes de um vulcão (Camprubí & Albinson, 2006). Do ponto de vista econômico, esses depósitos contribuem significativamente com a produção de ouro e de outros metais como Pb, Zn, Ag. Os principais depósitos mundialmente conhecidos se encontram no Japão, Indonésia, Chile e no Oeste dos Estados Unidos, ou seja, estão localizados no anel de fogo do pacífico (Camprubí & Albinson, 2006).

Geralmente, os depósitos epitermais estão relacionados de forma espacial e temporal com o vulcanismo subaéreo, apresentando composição ácida à intermediária. O fato de estarem situados próximos à superfície dificultou a sua preservação ao longo do tempo. Por essa razão, a maioria dos depósitos do tipo epitermal é datada no Cenozoico Superior, embora sejam conhecidos outros depósitos mais antigos. Na margem ocidental do Pacífico, a maioria dos depósitos epitermais se formou durante o Mioceno Superior, o Paleoceno e o Quaternário (White & Hedenquist, 1995). Já na margem oriental do Pacífico e o Caribe, relacionados a arcos continentais, os depósitos apresentam idades entre o Cretáceo e o Mioceno Superior (Sillitoe, 1994).

Segundo a classe química dos fluidos, os depósitos epitermais podem ser classificados em três principais tipos: Epitermais de baixa sulfetação (LS – *Low Sulfidation*), de sulfetação intermediária (IS – *Intermediate Sulfidation*) e de alta sulfetação (HS – *High Sulfidation*). Estes termos, alta, intermediária e baixa sulfetação, foram propostos por Hedenquist (1987) e se referem ao estado de oxidação do enxofre. Sillitoe & Hedenquist (2003) demonstraram a estreita associação entre os depósitos pórfiros e os depósitos epitermais de alta e intermediária sulfetação. Ainda, revelaram que os depósitos de baixa e intermediária sulfetação são mutuamente excludentes no espaço e no tempo.

#### Epitermais de Baixa Sulfetação:

Os depósitos Epitermais de Baixa Sulfetação são normalmente hospedados em rochas vulcânicas, mas também podem estar nas encaixantes. Diques máficos são comuns nestes depósitos. Os fluidos formadores são reduzidos, tem pH de básico a neutro e são distais da fonte hidrotermal. O tipo de alteração é restrito e possui a argila illita como seu principal marcador. A paragénese de alteração é do tipo adularia-sericita e o quartzo é representado pela calcedônia. Os metais mais importantes destes depósitos são o ouro e a prata. Já os sulfetos compreendem entre 1 a 20% dos depósitos, sendo os principais a Galena e a Esfalerita rica em ferro, além da Calcopirita e da Pirita (González-Partida *et al.*, 2003).

### Epitermais de Sulfetação Intermediária:

Os depósitos Epitermais de Sulfetação Intermediária também ocorrem em sequências vulcânicas em arcos vulcânicos cálcio-alcálicos. Podem ser encontrados tanto em arcos magmáticos compressivos quanto em ambientes extensionais. Por vezes, eles podem estar associados espacialmente com sistemas pórfiros ou estarem relacionados com os epitermais de alta sulfetação. A mineralização ocorre em veios, *stockworks* e brechas. Além de uma variedade de sulfetos e sulfossais, também há ocorrência de ouro como mineral nativo associado a teluretos. A assembleia mineral é caracterizada por esfalerita (com baixo teor de Fe), tetraedrita–tennantita e galena. Entre os principais minerais de alteração estão a assembleia de quartzo–carbonato, adulária e illita mais próximas da mineralização, e as argilas illita-esmectita na alteração propílica distal (Sillitoe & Hedenquist, 2003).

### Epitermais de Alta Sulfetação:

Depósitos epitermais de alta sulfetação são oxidados em relação ao enxofre. Os fluidos possuem um pH ácido e são proximais da fonte hidrotermal, a qual pode ser um conduto vulcânico-hidrotermal ou um sistema Pórfiro Cu (Au, Mo). Os fluidos formadores destes depósitos são resultado de uma mistura de fluidos, sendo uma parte magmática e outra, meteórica. A formação de fumarolas de altas temperaturas e condensados de água extremamente ácidos são características destes depósitos de alta sulfetação. Ao contrário dos depósitos de baixa sulfetação, nestes, a alteração é ampla, não há presença de carbonatos e a paragênese de alteração é marcada pela alunita (sulfato de alumínio potássico) – caulinita. Os metais mais relevantes deste depósito são o cobre e o ouro. Devido à grande quantidade de enxofre no sistema, há enxofre nativo e quantidades de sulfetos de cobre e ferro que variam entre 10 e 90%. Além desses, há também a presença do sulfato barita (González-Partida *et al.*, 2003).

## **GRANITE-RELATED**

Os depósitos do tipo *granite-related* são normalmente associados a ambientes orogênicos a pós-orogênicos. Sua formação se dá a partir de um magma félsico reduzido no interior de margens convergentes. Tais características o diferenciam dos depósitos epitermais e pórfiros, os quais estão estritamente associados a um magmatismo intermediário relativamente oxidado. Os depósitos que fazem parte desse sistema são: o *granite-related* Sn-W-F (incluindo uma variedade de depósitos de skarn), os pegmatitos com Ta-Nb-Li-Be, Mo-Pórfiros e os *Intrusion-Related Gold Deposits* (IRGD), sendo que estes se diferenciam pela posição crustal em que cada um ocupa (Černý *et al.*, 2005; Hart, 2005).

Os granitos pertencentes a este tipo de depósito apresentam uma composição variada, podendo ser granitos do tipo I, S ou A, metaluminosos, peraluminosos ou peralcalinos. A composição do granito está diretamente relacionada com o seu comportamento durante o processo de fracionamento (Blevin, 2004). Elementos como Sn, W, F tendem a estar associados com granitos do tipo-I ou do tipo-S, enquanto granitos peralcalinos tendem a apresentar uma composição alta de Ta, Nb, Li, Be (Huston *et al.*, 2013). Embora existam algumas controvérsias sobre os IRGD, há um consenso geral de que os magmas são as fontes de fluidos, metais e energia do sistema mineral *granite-related*. O tungstênio (W) está normalmente associado a granitos de composição intermediária, enquanto a associação mineral Sn-W-F está relacionada com granitos félsicos fracionados. O estado de oxidação dos granitos é fundamental, uma vez que o Sn está associado com granitos reduzidos e o W pode estar relacionado tanto com granitos reduzidos ou oxidados, mas normalmente esse elemento se desenvolve melhor em suítes graníticas em que o estado de oxidação varia de intermediário a reduzido (Hart, 2005).

As principais províncias minerais do sistema mineral *granite-related* são encontradas na Austrália, as quais apresentam um intervalo de idade que varia desde o Neoarqueano, no caso dos campos pegmatíticos de Ta-Sn no oeste da Austrália, até o Paleozoico, como no caso dos depósitos hidrotermais de Sn-W no leste do país (Huston *et al.*, 2013). No Brasil, este tipo de depósito está representado

pelo depósito de ouro de Serrinha, situado no extremo norte do Estado do Mato Grosso, na Província Aurífera Juruena-Teles Pires (PAJTP). O depósito de Serrinha está espacialmente e geneticamente relacionado com a alteração hidrotermal do monzogranito Matupá, de idade paleoproterozoica. A mineralização de ouro encontra-se disseminada e geneticamente relacionada a cloritas ricas em Mn, silicatos de potássio e alterações hidrotermais filicas. Além destes minerais, rutilos e magnetitas hidrotermais são observados dentro da pirita (Moura *et al.*, 2006).

Assim como ocorre nos sistemas epitermais e pórfiros, a percolação de fluidos nos depósitos do tipo *granite-related* se dá em falhas e zonas de cisalhamento. Estruturas pré-existentes e estruturas associados com a posição dos granitos podem também controlar a distribuição dos depósitos de Zn-Pb-Ag (Huston *et al.*, 2013). As falhas e as zonas de cisalhamentos têm um papel importante na formação destes depósitos, elas não controlam somente o fluxo dos fluidos hidrotermais, mas também definem o local de alojamento deste material magmático. Em muitos casos a mineralização está localizada no interior ou sobre o ápice da cúpula granítica. Em alguns casos, estruturas associadas com a formação da cúpula dos granitos permitem a circulação de fluidos por centenas de metros ou quilômetros, produzindo skarnitos distais ou corpos com substituição de carbonatos por Pb, Zn e Ag. Da mesma forma como ocorre com os fluidos neste tipo de depósito, o processo deposicional também é similar ao que ocorre nos sistemas pórfiro-epitermal, o qual envolve a evolução do fluido magmático hidrotermal oriundos da cristalização dos magmas, despressurização, mistura de fluidos ambientais, resfriamento e a interação água-rocha, sendo o último processo particularmente importante na formação de depósitos do tipo skarn hospedados em rochas carbonáticas (Huston *et al.*, 2013).

## **PROSPECÇÃO GEOQUÍMICA**

A prospecção geoquímica é uma área da geoquímica. Ambas estudam as ciências da terra e servem de base para estudos geológicos. A geoquímica é uma ciência abrangente que estuda a disponibilidade e distribuição de elementos químicos e de seus isótopos, tanto no campo orgânico quanto inorgânico da terra,

assim como em profundidade ou na superfície terrestre. Utilizando a geoquímica como base, podem ser realizados estudos com diferentes finalidades como para avaliar a origem dos elementos presentes em rochas, sedimentos, solos, água e vegetação, bem como para conhecer a idade do ambiente de formação de fósseis (Matosso & Formoso, 2007).

Tendo como base os princípios da geoquímica, a prospecção geoquímica tem como objetivo o entendimento e a descoberta de anomalias de elementos químicos. A análise de amostras de solo, rochas, água, sedimentos de corrente e, até mesmo, de fragmentos de vegetais, podem revelar novas jazidas minerais, petrolíferas ou de gás natural, além de uma série de elementos metálicos. Ainda, a geoquímica pode ser utilizada com o viés ambiental, observando as características químicas do ambiente natural e as possíveis alterações causadas pelo homem como, por exemplo, avaliar os níveis de poluição por metais pesados em um recurso hídrico (Matosso & Formoso, 2007).

O projeto de prospecção geoquímica pode ser dividido em três etapas principais: a primeira consiste na coleta dos dados, na qual são realizadas as amostragens do material de interesse, bem como a análise laboratorial; a segunda, constitui-se do tratamento dos dados amostrados e, conseqüentemente, obtenção dos resultados; já na terceira e última fase de um trabalho de prospecção é realizada a interpretação dos resultados encontrados no trabalho (Matosso & Formoso, 2007).

A aquisição de dados é o primeiro procedimento num projeto de prospecção geoquímica. Consiste na amostragem de dados geoquímicos a partir de uma série de matérias geológicas do interesse do pesquisador, que darão subsídio para o tratamento de dados e interpretação. O tipo de material a ser coletado depende diretamente do interesse da pesquisa e, também, da disponibilidade de material na área de estudo. A coleta pode ser feita em rochas frescas ou intemperizadas, solos, sedimentos ativos de corrente, concentrados de bateia e, até mesmo, a partir de amostragens de água e vegetação. Dentre os diversos tipos de materiais passíveis de coleta, destacam-se dois tipos que são utilizados com frequência em estudos

que visam a prospecção geoquímica: sedimentos de corrente e concentrados de bateia.

A fase analítica de um processo de prospecção geoquímica deve, sempre que possível, ser planejada com a participação do laboratório que fará as análises. A preparação física é a etapa mais importante do processo de análise, uma vez que cada tipo de material coletado deverá ser submetido a uma determinada preparação física ou procedimento padrão (Ramos *et al.*, 2007).

A fase de tratamento dos dados inicia com o retorno das amostras coletadas e suas respectivas análises do laboratório. Esta etapa é imprescindível no processo de prospecção geoquímica, pois a partir dela são obtidos os resultados que servirão para a futura interpretação do estudo. Da mesma forma que a análise química para cada tipo de material coletado tem uma particularidade e um procedimento específico, a fase de tratamento de dados também possui um procedimento distinto para cada tipo de material estudado.

Quando dados de sedimento de corrente são utilizados em estudos de prospecção geoquímica, aplicam-se técnicas estatísticas afim de identificar as anomalias geoquímicas existentes na região pesquisada. Por outro lado, quando se opta por trabalhar com informações obtidas a partir da coleta de concentrados de bateia, outro tipo de técnica deve ser empregada, a fim de conhecer as zonas que apresentam-se quimicamente favoráveis para a avaliação da concentração de determinados minerais. A fase de tratamento de dados, assim como as demais etapas do processo de prospecção geoquímica, deve ser executada com atenção para minimizar a ocorrência de possíveis erros, uma vez que esta fase dará sustentação para uma adequada interpretação dos dados.

## **PROSPECÇÃO GEOQUÍMICA EM SEDIMENTOS DE CORRENTE**

O sedimento de corrente (SC), também conhecido como sedimento fluvial ativo ou ainda, sedimento ativo de corrente, é o método de coleta amostral preferido nos trabalhos de prospecção geoquímica de escala regional, uma vez que consiste no material de baixa densidade mais comum e de maior representatividade. A

vantagem de coletar um material desta natureza é que, devido ao fato de estar em constante transporte, o mesmo remete diretamente às características geoquímicas dos materiais erodidos e transportados na bacia hidrográfica onde são encontrados. Ou seja, o sedimento de corrente reflete a composição das rochas localizadas na bacia ou sub-bacia da drenagem estudada (Ramos *et al.*, 2007).

A amostragem de sedimentos de corrente é realizada preferencialmente em drenagens anômalas ou de background. Enquanto as primeiras seccionam zonas de interesse mineralizadas, alteradas e rochas encaixantes, as segundas cortam exclusivamente rochas não mineralizadas (Ramos *et al.*, 2007). As amostras do sedimento de corrente podem obtidas de duas formas: através da simples coleta de uma fração do material, a qual não é representativa para o estudo (utilizada apenas quando houver escassez de material), ou através da amostragem composta que é feita a partir da coleta de várias porções de material em torno de uma estação de amostragem, as quais representarão uma única amostra (Neto & Rocha, 2010).

Com o intuito de ter acurácia, precisão e confiabilidade na coleta e no laboratório em que são realizadas as análises, as empresas tem investido intensamente em Programas de Qualidade de Amostragem, bem como na capacitação de pessoal. Uma coleta mal feita, contaminada ou até mesmo mal preparada, pode levar ao descarte de áreas interessantes ou estimular altos investimentos em áreas que não trarão resultados. Desta forma, análises em duplicata são realizadas a cada “x” amostras coletadas, sendo o intervalo “x” determinado a critério de cada empresa. A amostragem do tipo duplicata, por sua vez, ocorre quando duas amostras são coletadas num mesmo local, enviadas ao laboratório como se fossem amostras independentes e, com isso, pode-se testar a confiabilidade e a ocorrência possíveis erros de amostragem e/ou análise (Neto & Rocha, 2010). Para testar a confiabilidade do laboratório, empresas mais rigorosas enviam, além de uma amostra em duplicata, amostras “branca” e amostras padrão. A amostra “branca” trata-se de um material sem qualquer teor daquele elemento pesquisado. Já as amostras padrão apresentam teores conhecidos dos elementos,

uma vez que estes foram previamente analisados em outros laboratórios ou, até mesmo, no próprio laboratório para o qual estão sendo enviadas as amostras.

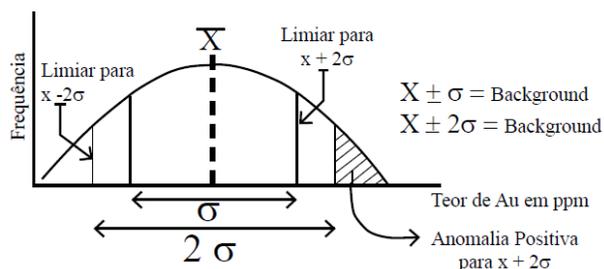
Os sedimentos de corrente devem ser separados fisicamente, destorroados e secos a temperatura de 60°C, peneirados nas frações nos intervalos de granulometria <40, <80, <120 e, por vezes, <230 mesh. A análise química deste material é realizada nas alíquotas das quatro frações peneiradas, através da varredura geoquímica com análise multielementar somada à análise de metais nobres, sendo, por vezes, feitas análises por ICP-MS, após abertura total, a quente (Ramos *et al.*, 2007).

A espectrometria de massas com ionização em um plasma de argônio (ICP-MS) é uma técnica analítica robusta, que une a capacidade multielementar de análise e limites de detecção da grandeza de partes por bilhão (ppb). Por ser capaz de detectar pequenos teores de elementos químicos, esta técnica apresenta um alto interesse na prospecção geoquímica, principalmente na análise de soluções de extrações parciais de elementos adsorvidos em frações finais e/ou fases específicas de solos e sedimentos (Enzweiler & Duarte, 2007).

Uma dificuldade comum encontrada por quem utiliza a estatística na prospecção mineral de sedimentos de corrente é a de determinar o valor limiar (*threshold*), a fim de possibilitar a interpretação de dados produzidos em prospecção geoquímica. O limiar é um valor que divide a faixa de valores de background dos valores anômalos. Entende-se como background a concentração normal de teores de um elemento em uma determinada região. Já a anomalia é constituída pelos valores que ocorrem acima do valor limiar, ou seja, incomuns em uma distribuição.

Andriotti (2010) discute os diferentes métodos para encontrar o valor de limiar. No referido estudo, pode-se observar que diferentes autores recomendam distintos métodos para encontrar o valor de limiar. Hawkes & Webb (1963) sugerem o uso de duas vezes o valor do *background* como *threshold*, enquanto Bolviken (1971) e Tennant & White (1959) revelam que não há um valor simples de *threshold*, mas sim uma distribuição de valores de *background* e uma distribuição de valores

anômalos. Já Rose *et al.* (1979) utilizaram a regressão múltipla para estimar a concentração de *background*. A CPRM (Serviço Geológico do Brasil) geralmente utiliza em seus trabalhos a média mais dois desvios padrão como fórmula para se obter o valor do limiar. Ou seja, a anomalia positiva é definida pelos valores maiores que a média mais dois desvios padrões ( $X + 2\sigma$ ). O valor de ( $X + 2\sigma$ ) equivale ao limiar, aqueles entre ( $X + 2\sigma$ ) e ( $X - 2\sigma$ ) são os valores de *background* e abaixo de ( $X - 2\sigma$ ) encontra-se anomalia negativa (Figura 1).



**Figura 1: Curvas de frequência para teores de ouro em 100 amostras coletadas numa área de pesquisa. Extraído de Neto & Rocha (2010).**

Demonstrados alguns exemplos encontrados na literatura, fica evidente que não existe um modelo único e infalível para determinar o valor de limiar. Portanto, faz-se necessário, primeiramente, compreender o problema, para que se possa adequar a melhor técnica à situação encontrada.

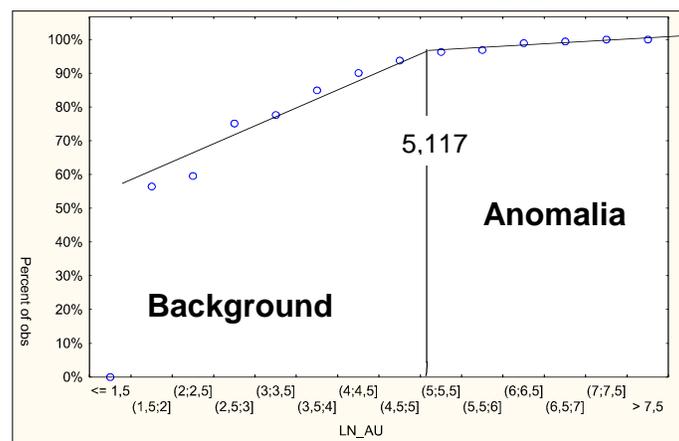
Costa & Koppe (1999) revelam em seu artigo dois métodos que podem ser utilizados para estabelecer o valor de limiar para dados assimétricos. O primeiro modo seria a partir de uma fórmula matemática. Esta se baseia nos valores da média e do desvio padrão da distribuição das variáveis transformadas em logaritmos naturais. Já o segundo, trata-se de um procedimento confirmativo em relação ao modelo matemático, no qual se obtêm o valor do *threshold* com base na observação visual de um histograma de frequência acumulada. Os histogramas produzidos segundo o trabalho de Costa & Koppe (1999) apresentam os valores das variáveis transformados para a escala logarítmica através da equação  $Z(x) = \ln(x)$ . Para a determinação do valor de limiar de uma distribuição de variáveis se utiliza a seguinte expressão matemática (1):

$$e^{\bar{Z}(x)+2\sigma_{Z(x)}} \quad (1)$$

Onde,  $\bar{Z}(x)$  e  $\sigma_{Z(x)}$  representam a média e o desvio padrão dos valores transformados, respectivamente.

Conforme mencionado anteriormente, pode-se comprovar o resultado do valor limiar através de análise visual do histograma de frequência acumulada para o conjunto de dados transformados. Tal procedimento é realizado do seguinte modo: após a obtenção deste tipo de histograma, observa-se a zona onde a curva ou reta de frequência acumulada tem uma mudança em relação ao seu ângulo de inclinação. Conseqüentemente, este ponto é definido como o *threshold* da distribuição, o qual divide as populações em *background* e anomalias, conforme observado na Figura 2. Por fim, para estabelecer o valor de limiar na forma de dados não transformados, ou seja, na grandeza do valor original (ppm ou ppb), deve-se elevar a exponencial (e) o valor correspondente no eixo x do ponto definido como limiar. Por exemplo, na Figura 2, o valor de limiar foi determinado visualmente e o mesmo (5,117) foi elevado a exponencial, resultando no valor de limiar, onde

$e^{\ln 5,117} = 166,83$  ppm. Tal procedimento é denominado retrotransformação dos dados.



**Figura 2: Histograma de frequência acumulada para dados transformados. Pode-se observar que o encontro das duas linhas contínuas define o valor limiar, o qual divide as populações em background e anomalias. Extraído de Costa & Koppe (1999).**

## PROSPECÇÃO GEOQUÍMICA EM CONCENTRADOS DE BATEIA

Este método objetiva a coleta de resíduo pesado, na qual a amostragem se dá com o uso de uma bateia, utilizando o princípio de concentração gravimétrica. O estudo de concentrados de bateia é realizado na procura por elementos/minerais que ocorrem como resídeos no ambiente secundário, ou seja, materiais que sobrevivem ao intemperismo físico e químico, erosão da rocha-fonte, dispersão em superfície e transporte sedimentar por consideráveis distâncias (Neto & Rocha, 2010).

Da mesma forma que os sedimentos de corrente, as amostras de concentrados de bateia representam as áreas de captação. Através da utilização deste método, anomalias geoquímicas podem ser detectadas, as quais serão de extrema importância para a busca de novas jazidas minerais. Esta ferramenta de prospecção é utilizada com frequência na busca por elementos/minerais pesados como ouro, scheelita, tantalita, apresentando, desta forma, resultados positivos quando empregada para esta finalidade.

Uma vantagem do estudo deste tipo de material é a antecipação de informação, já que o mesmo permite, antes mesmo de chegar a fase laboratorial, revelar informações relevantes ainda durante a etapa de campo. Além desta vantagem, este método ainda apresenta um baixo custo. Os críticos desta técnica argumentam que, devido a coleta do material ser de forma seletiva (onde somente os minerais densos são amostrados), pode haver uma grande distorção da realidade, além de não identificar a relevância de minerais leves, que podem ser indicadores na busca por certos depósitos minerais (Neto & Rocha, 2010).

Em um programa de amostragem de concentrado de bateia, a definição dos locais de amostragem se baseia nas zonas de quebra de energia de corrente, como panelas, barras de pontal, atrás de afloramentos e de matações. As ferramentas de campo que ajudam a coleta são, basicamente, pás e alavancas. O material amostrado deve ser guardado em sacos plásticos, os quais devem ser prontamente fechados, a fim de evitar a contaminação das amostras (Ramos *et al.*, 2007).

Frequentemente, a quantidade de amostras coletadas deste material será a metade do número de amostras de sedimento de corrente. Os pontos de coleta devem coincidir, idealmente, com os de sedimento de corrente e a coleta do material deverá ser do tipo composta. Durante o campo, devem ser realizados o bateamento e a concentração do material, sendo que a garantia do volume suficiente de amostras para análises químicas e mineralógicas pode ser obtido com o peneiramento prévio, ainda no campo, na malha de  $\frac{1}{4}$ '. Assim como ocorre para os sedimentos de corrente, o programa de qualidade de amostragem também é realizado em estudos de concentrados de bateia, visando a confiabilidade da coleta e do laboratório que realiza as análises químicas (Ramos *et al.*, 2007).

O concentrado de bateia deve ser concentrado no campo e, posteriormente, no laboratório. Após a secagem em estufa a 60°C, o material é submetido ao processo de separação das frações magnéticas e não magnéticas, utilizando o equipamento Separador Frantz. Tais frações são observadas por uma lupa binocular, confirmadas por difratometria de raios-X e contadas as pintas de ouro, quando existirem. Diferentemente do que ocorre quando há presença de ouro, os outros minerais são classificados de uma forma semi-quantitativa, sendo seus resultados expressos em intervalos de classe de percentagens. Por vezes, alíquotas deste tipo de material são submetidas à análise por ICP-MS com o intuito de se analisar os metais nobres existentes (Ramos *et al.*, 2007).

O tratamento dos dados de concentrado de bateia possui certa peculiaridade, pois o resultado que se obtém na fase laboratorial vem expresso em percentagem, frequentemente dividido em intervalos de classe da seguinte forma: < 1%, 1 – 5 %, 5 – 25 %, 25 – 50 %, 50 – 75 %, > 75 %. Por esse motivo não é usual a utilização de fórmula para calcular o valor de limiar deste tipo de dado e, portanto, cabe a cada projeto de prospecção mineral adotar um método específico para caracterizar áreas anômalas em seus estudos.

A presença de ouro é abordada de uma forma diferente no tratamento de dados de concentrado de bateia, uma vez que normalmente as pintas de ouro são contadas e a ocorrência delas já torna o ponto de coleta anômalo (Lins & Castro,

2010). Para o estudo dos demais minerais, primeiramente selecionam-se os minerais de interesse para determinado estudo.

Em recente estudo realizado pela CPRM, Lins & Castro (2010) trabalharam apenas com minerais-minério e associados importantes de seu interesse. As ocorrências de cassiterita, calcopirita, columbita, galena, scheelita, cromita, cromita, cinábrio e também de ouro foram estudadas. A técnica de tratamento de dados teve a seguinte subdivisão: zonas de destaque mineralógico e zonas de indícios mineralógicos. As zonas de destaque mineralógico foram definidas quando a amostra se situa em duas ou mais bacias contiguas. Já os indícios mineralógicos foram definidos quando a amostra do mineral de interesse era encontrada de forma isolada. Além delas, para amostras de ouro, todas as estações de coleta foram consideradas indícios mineralógicos, independentemente do número de pintas contadas.

Outros autores preferem adotar um intervalo de classe como limiar. Intervalos de classe acima do valor definido serão anômalos e os abaixo do valor de limiar serão considerados como background, Por ser um método muito subjetivo de avaliação dos dados obtidos, pode apresentar uma grande variação em cada tipo de trabalho.

## **INTERPRETAÇÃO DE DADOS GEOQUÍMICOS**

Trata-se da última fase de um processo de prospecção geoquímica, onde o geoquímico de exploração interpreta os dados coletados e compreende o significado das anomalias encontradas.

O geoquímico de exploração trabalha na busca por traços de elementos químicos que tenham sido dispersados por corpos mineralizados. Quando observado, tal processo de dispersão dá origem a uma área alvo a ser estudada, que é mais ampla que a própria área que contém a mineralização. Além disso, o geoquímico de exploração deve observar a distribuição dos elementos mineralizadores, pois faz parte do seu trabalho a capacidade de distinguir características químicas normais, daquelas relacionadas a um corpo de minério.

Desta forma, para dar um embasamento ao estudo de interpretação é necessário que o profissional domine sobre alguns conceitos utilizados na prospecção como assinatura geoquímica, mobilidade geoquímica, dispersão geoquímica, elementos farejadores e indicadores.

### Assinatura geoquímica

A composição química da terra pode ser dividida em três grupos, segundo a concentração de elementos. De todos os elementos existentes, apenas oito (O, Si, Al, Fe, Ca, Na, K e Mg) apresentam concentrações superiores as 1%, compondo 99% da na crosta e são denominados como elementos maiores. Por outro lado, o Ti, P, S, Mn, são chamados de elementos menores e a abundância deles varia de 1,0 a 0,01%. Já, todos os outros elementos da tabela periódica, chamados de elementos traços, perfazem 0,5% da crosta terrestre e seus teores são expressos em ppm (parte por milhão) ou ppb (parte por bilhão). Estes incluem a maioria dos elementos químicos essenciais no estudo da exploração geoquímica. Cada tipo de depósito mineral possui uma associação de elementos própria, que é definida de acordo com o ambiente e o processo gerador do depósito. Na maioria dos casos, um depósito mineral é composto por um conjunto de elementos químicos e são raros os depósitos minerais compostos somente um elemento químico. A combinação destes elementos estabelece a assinatura geoquímica do depósito ou grupo (Jost *et al.*, 2007).

Na natureza, os elementos químicos tendem a agrupar-se segundo o seu comportamento e afinidade, possibilitando predizer a presença de um elemento quando detectada a presença de outro com o qual ele tenha afinidade geoquímica. Por isso, emprega-se, frequentemente, a técnica de assinatura geoquímica na busca por um depósito mineral. A

Tabela 1 demonstra a relação das assinaturas geoquímicas com os principais tipos de depósitos minerais (Jost *et al.*, 2007).

**Tabela 1: Síntese das assinaturas geoquímicas de alguns depósitos de minerais. Compilação de Cox & Singer, Orris & Bliss (1992) e Orris (1998). Modificado de Matosso & Formoso (2007).**

Depósito	Assinatura geoquímica
<b>DEPÓSITOS ASSOCIADOS A ROCHAS FÉLSICAS INTRUSIVAS HOLOCRISTALINAS</b>	
W em skarnitos	W, Mo, Zn, Cu, Sn, Bi, Be, As
Sn em skarnitos	Sn, W, F, Be, Zn, Pb, Cu, Ag, Li, Rb, Ce, Re, B
Sn e sulfetos stratabound	Sn, As, Cu, B, W, F, Li, Pb, Li, Rb
Veios de W	W, Mo, Sn, Bi, As, Cu, Pb, Zn, Be, F
Veios de Sn	Sn, As, W, B
Sn em greisens	Sn, As, W, B, In
<b>DEPÓSITOS RELACIONADOS A INTRUSÕES PORFIRÍTICAS</b>	
Mo do tipo climax	Mo, Sn, W, Rb, Pb, Zn, F, U. Em concentrados de bateia Sn, W, Mo e F
Cu-pórfiros	Cu, Mo, Au, Ag, W, B, Sr, Pb, Zn, Au, As, Sb, Se, Te, Mn, Co, Ba, Rb, S
Cu-Au pórfiros	Cu, Au, Ag, Pb, Zn, Mo
Cu-Mo pórfiros	Cu, Mo, Ag, W, B, Sr, Pb, Zn, Au, As, Sb, Se, Te, Mn, Co, Ba, Rb < Sn, Bi
Mo-pórfiros	Zonação de Mo, Cu, W central para Cu, Au e Zn, Pb, Au, Ag na periferia
Sn-pórfiros	Cu, Zn, Sn, Pb, W, Au, Ag < Bi, As
Skarnitos relacionados a Cu-pórfiros	Cu, Mo, Pb, Zn, Au, Ag, W, Bi, As, Sn, Sb
Skarnitos cupríferos	Cu, Au, Ag, Au, Ag, Pb, Zn, Ag, Co, As, Sb, Bi
Skarnitos com Pb e Zn	Zn, Pb, Mn, Cu, Co, Au, Ag, As, W, Sn, F e possivelmente Be
Skarnitos com magnetita	Fe, Cu, Co, Au e possivelmente Sn
Depósitos polimetálicos do tipo manto	Cu, Pb, Ag, Zn, Mn, Au, As, Sb, Bi, Ba
Veios epigenéticos de Mn em calcários e dolomitos	Mn, Fe, P, Cu, Ag, Au, Pb, Zn
<b>DEPÓSITOS RELACIONADOS A INTRUSÕES PORFIRÍTICAS</b>	
Cu-As-Sb em rochas vulcânicas próximas a Cu-pórfiro	As, Sb, Cu, Zn, Ag, Au, W e Sn em alguns depósitos
Veios de Au, Ag e Te	Au, Ag, Te, Cu, Pb, Zn, Sb, Hg, F, Ba, EGP
Veios poliminerálicos	Zn, Cu, Pb, As, Au, Ag, Mn, Ba, Zn, Pb, Ag, Mn
<b>DEPÓSITOS RELACIONADOS COM VULCÂNICAS FÉLSICAS A MÁFICAS SUBAÉREAS</b>	
Au e Ag em fontes quentes	Au, As, Sb, Hg, Ti
Veios epitermais	Au, As, Sb, Hg; Au, Ag, Pb, Zn, Cu; Au, Ag; Ag, Pb, Zn; Cu, Pb, Zn, Te e W importante em alguns depósitos
U vulcanogênico	As, Sb, F, Mo, Li, Hg, ETR podem ser altamente anômalos
Mn epitermal	Mn, Fe, P, Pb < Ag, Au, Cu, W importante em alguns depósitos
Sn em riolitos	Sn, Be, Li, F, As, Sb, Pb, Zn, Bi
Magnetita vulcanogênica	Fe, P, V, Ba, F, Bi, Cu, Co
Au e Ag em calcários e dolomitos intrudidos por diques félsicos	Au, As, Hg, W, Mo; As, Hg, Sb, Ti, F, NH <sub>4</sub> importante em alguns depósitos
Hg em fontes quentes e sedimentos vulcanoclásticos	Hg, As, Sb, Au
Depósitos de quartzo e stibinita	Sb, As, Fe, Au, Ag; H, W, Pb, Zn podem ser importantes em alguns casos

DEPÓSITOS EM ROCHAS SEDIMENTARES CLÁSTICAS	
Au - U em conglomerados do tipo Witwatersrand	Au, U, EGP
Cu - U - Au do tipo Olympic Dam	Cu, U, Co, Au, Ag, ETRL, F, Ba
Pb - Zn em arenitos	Pb, Zn, Ba, F
Cu em arenitos do tipo redbed	Cu, Ag, Pb, Zn, (Mo, V, U, Co, Ge)
U em rochas sedimentares	U, V, Mo, Se, localmente Cu e Ag
Zn - Pb SEDEX	Cu, Pb, Zn, Ba, NH <sub>3</sub> importante em alguns depósitos
Barita sedimentar	Ba. Pode conter altos teores de C

### Mobilidade geoquímica

Denomina-se mobilidade geoquímica a estabilidade que permite um elemento químico ser encontrado tanto no solo, água ou vegetação a uma distância, seja qual for, do local originário. Ou seja, trata-se da facilidade com que um elemento químico se move em solução em determinado ambiente. Essa terminologia aplica-se tanto ao ambiente geoquímico primário, quanto ao secundário, sendo que no ambiente geoquímico secundário a condição de pH é de extrema importância no estudo da mobilidade geoquímica. A resposta do elemento aos processos de dispersão geoquímica depende diretamente da mobilidade do elemento. Portanto, com o avanço dos processos intempéricos, novas relações de equilíbrio químico são necessárias, visto que novas condições ambientais são dispostas (Matosso & Formoso, 2007).

### Dispersão geoquímica

O processo de dispersão geoquímica serve de base para estudos de prospecção, uma vez que analisa a distribuição de elementos químicos nos materiais naturais vizinhos ou relacionados a depósitos minerais. É denominado dispersão o processo que produz a distribuição e/ou redistribuição de elementos químicos por meio de agentes físicos e/ou químicos (Matosso & Formoso, 2007).

Na literatura, autores de prospecção comumente dividem o processo de dispersão de duas formas, em função do ambiente geoquímico: ambiente primário e secundário. O ambiente primário é assim denominado por abranger as áreas que se estendem abaixo da superfície, onde há circulação de águas meteóricas, até as zonas em que atuam os processos de diferenciação ígnea e metamórfica. Este

ambiente é caracterizado por condições de pressão e temperaturas elevadas, escassez de oxigênio livre e com limitada circulação de fluidos. Já o ambiente secundário, compreende os processos posteriores, como o intemperismo, formação dos solos e a sedimentação na superfície terrestre. Contrariamente ao ambiente primário, as pressões e temperaturas são baixas, há abundância de oxigênio livre e de outros gases e uma livre circulação de fluidos (Hawkes & Webb, 1963).

#### Elementos farejadores:

O termo elementos farejadores, ou *pathfinders*, foi proposto pela primeira vez por Warren & Delavault (1956) como: “aqueles com propriedade ou propriedades particulares, que fornecem anomalias ou halos mais facilmente utilizáveis que os dos elementos procurados aos quais eles estejam associados”. Dê uma simples forma, podem ser definidos como elementos químicos que servem como rastreadores na busca por um tipo de minério específico. Por se tratar de uma técnica indireta, a busca por um elemento mineral pode ser feita a partir do estudo de outro elemento que está associado geoquimicamente ao elemento prospectado, não havendo a necessidade de que o próprio elemento de interesse seja procurado. De modo geral, utiliza-se um elemento farejador diferente do elemento a ser procurado, principalmente, quando ele apresenta uma maior mobilidade que o elemento prospectado (Matosso & Formoso, 2007).

Os elementos farejadores podem ocorrer de diversas formas, ou seja: (1) como parte da assinatura do depósito, composto por minerais importantes, como Cu e Zn em depósitos polimetálicos de metais básicos; (2) fazendo parte da paragénese de minerais da ganga, que é o caso do As na arsenopirita em depósitos de ouro; (3) integrando minerais economicamente relevantes, como o Telúrio, na forma de teluretos nos depósitos de ouro; (4) na estrutura de minerais de minério, como Cd em Esfalerita; (5) na forma gasosa, como o radônio emitido a partir de depósitos de urânio; ou (6) como ânion solúvel, o que ocorre com sulfatos resultante da oxidação de sulfetos. Portanto, um elemento farejador pode apresentar teores variáveis de concentração, bem como participar ou não da assinatura geoquímica de um depósito mineral (Jost *et al.*, 2007).

Por ser uma técnica muito difundida na área da prospecção mineral, existem diversas tabelas que associam os elementos farejadores aos tipos de depósitos correspondentes. A Tabela 2 demonstra alguns elementos a serem utilizados como farejadores na busca por determinados tipos de depósitos (Matosso & Formoso, 2007).

**Tabela 2: Exemplos de elementos farejadores (*pathfinder*) usados para detectar mineralizações. Modificado de Levinson (1974).**

Elementos Farejadores	Tipos de Depósitos
As	Au, Ag; do tipo veio
As	Au - Ag - Cu - Co - Zn; minérios de sulfeto complexos
B	W - Be - Zn - Mo - Cu - Pb; skarns
B	Sn - W - Be; veios ou greisens
Hg	Pb - Zn - Ag; depósitos complexos de sulfetos
Mo	W - Sn; depósitos de metamorfismo de contacto
Mn	Ba - Ag; depósitos de veio; cobre pórfiro
Se, V, Mo	U; tipo arenito
Cu, Bi, As, Co, Mo, Ni	U; tipo veio
Mo, Te, Au	cobre pórfiro
Pd, Cr, Cu, Ni, Co	platina em rochas ultramáficas
Zn	Ag - Pb - Zn; depósitos de sulfetos em geral
Zn, Cu	Cu - Pb - Zn; depósitos de sulfetos em geral
Rn	U; todos os tipos de ocorrências
SO <sub>4</sub>	depósitos de sulfeto de todos os tipos

O estudo de concentração de cobre numa amostra pode ser um procedimento adequado na busca por jazidas de minério de cobre. No entanto, pode ser mais interessante, do ponto de vista econômico, e mais rápido, o estudo dos teores de arsênio, boro, cobalto, níquel e zinco conforme o tipo de minério de cobre. Portanto, a escolha do elemento químico a ser estudado depende diretamente da sua mobilidade no ambiente secundário da área de estudo, sendo tal decisão tomada pelo geoquímico prospector (Matosso & Formoso, 2007).

Elementos farejadores nem sempre se tratam de elementos sem valor econômico. Por isso, não é raro observar que, por exemplo, o ouro possa ser um elemento farejador na busca por depósitos do tipo cobre pórfiro. Isso se dá porque o elemento farejador, por vezes, pode estar associado à ganga do minério, e por outras substituindo outro elemento no mineral de minério. Alguns autores utilizam a

terminologia de indicador ou farejador direto quando se analisa um elemento na busca por ele mesmo, como, por exemplo, quando se estuda o cobre para prospectar regiões a serem ricas em cobre (Matosso & Formoso, 2007).

Um exemplo de uso de associação geoquímica para estudos de prospecção ocorreu no Brasil nos anos 60, mais especificamente em Caraíba na Bahia. Nesse estudo, foram escolhidos sete elementos químicos a serem analisados: Cu, Pb, Zn, Mo, Co, Ni e Hg. Tal escolha foi baseada em algumas hipóteses: (1) caso o minério prospectado fosse do tipo pórfiro, seriam encontrados teores expressivos de Molibdênio. (2) se o minério estivesse relacionado a uma associação máfica-ultramáfica, haveriam altos teores de Cobalto, Niquel e Cromo. (3) e se o depósito fosse de origem hidrotermal, encontrar-se-iam valores anômalos de Chumbo, Zinco e Mercúrio. O resultado deste estudo revelou a associação anômala de Ni-Co-Cu-Cr, fato que revelou que o cobre estava associado a rochas ultramáficas e que estas eram portadoras também de ouro e platina (Matosso & Formoso, 2007).

**BIBLIOGRAFIA**

- Augusto, R. A., Monteiro, L. V., Xavier, R. P., Souza Filho, C. R. D., 2008. Zonas de alteração hidrotermal e paragênese do minério de cobre do Alvo Bacaba, Província Mineral de Carajás (PA). *Revista Brasileira de Geociências*, 38(2), 263-277.
- Bettencourt, J.S., Tosdal, R.M., Leite, W.B., Payolla, B.L., 1999. Mesoproterozoic rapakivi granites of the Rondônia Tin Province, southwestern border of the Amazonian craton, Brazil—I. Reconnaissance U–Pb geochronology and regional implications. *Precambrian Research*, 95(1-2), 41-67.
- Blevin, P. L., 2004. Redox and compositional parameters for interpreting the granitoid metallogeny of eastern Australia: Implications for gold-rich ore systems. *Resource Geology*, 54, 241-252.
- Camprubí, A., Albinson, T., 2006. Depósitos epitermales en México-Actualización de su conocimiento y reclasificación empírica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 58(1), 27-81.
- Carlile, J.C., Davey, G.R., Kadir, I., Langmead, R. P., Rafferty, W. J., 1998. Discovery and exploration of the Gosowong epithermal gold deposit, Halmahera, Indonesia. *Journal of Geochemical Exploration*, 60(3), 207-227.
- Case, G., Chang, Z., Huizenga, J.M., Lilly, R., Blenkinsop, T., 2015. The evolution and potential sources of mineralizing fluids of the E1 group of IOCG deposits, Cloncurry District, Northwest Queensland, Australia: implications from fluid inclusion and SHRIMP S isotope analyses. In: Abstracts from SEG 2015 Conference. From: SEG 2015: World-Class Ore Deposits: discovery to recovery, pp. 27-30.
- Černý, P., Blevin, P.L., Cuney, M., London, D., 2005. Granite-related ore deposits. In: Hedenquist, J.W., Thompson, J.F.H., Goldfarb, R.J., Richards, J.P. (Eds.), *Economic Geology 100th Anniversary Volume*. Society of Economic Geologists, Littleton, CO, pp. 337–370
- Chemale Jr, F., 2000. Evolução geológica do Escudo Sul-rio-grandense. *Geologia do Rio Grande do Sul*. In: M. Holz and L.F. De Ros (eds.) *Geologia do Rio Grande do Sul*. CIGO-UFRGS, pp. 13-52.

- Costa, J.F., Koppe, J.C., 1999. Assessing uncertainty associated with the delineation of geochemical anomalies. *Natural Resources Research*, 8(1), 59-67.
- Cox, D.P., Singer, D.A., 1992. Grade and tonnage model of distal disseminated Ag-Au. *Developments in mineral deposit modeling: US Geological Survey Bulletin*, 2004, 20-22.
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Prospecção no Cinturão Dom Feliciano. 2010. In: Geobank: geoquímica, sedimentos de corrente. Salvador: CPRM, 2010. Retrieved from: [http://geobank.cprm.gov.br/pls/publico/geoquimica.consulta\\_geoquimica.Cons\\_geoq](http://geobank.cprm.gov.br/pls/publico/geoquimica.consulta_geoquimica.Cons_geoq).
- Ehrig, K., McPhie, J., Kamenetsky, V., 2013. Geology and mineralogical zonation of the Olympic Dam iron oxide Cu-U-Au-Ag deposit, South Australia. *Society of Economic Geologists Special Publication*, 16, 237-268.
- Enzweiler, J., Duarte, M. A. I., 2007. Geoquímica Analítica. In: Licht, O.A.B, De Mello, C.S.B. e Da Silva, C.R. (eds.). *Prospecção Geoquímica – Depósitos minerais metálicos, não-metálicos, óleo e gás*. CPRM. Editora Planeta Terra, 253-278.
- Eppinger, R.G., Fey, D.L., Giles, S.A., Grunsky, E.C., Kelley, K.D., Minsley, B.J., Smith, S.M., 2013. Summary of exploration geochemical and mineralogical studies at the giant Pebble porphyry Cu-Au-Mo deposit, Alaska: Implications for exploration under cover. *Economic Geology*, 108(3), 495-527.
- Fernandes, L.A.D., Menegat, R., Costa, A.F.U., Koester, E., Porcher, C.C., Tommasi, A., Camozzato, E., 1995. Evolução tectônica do cinturão Dom Feliciano no Escudo Sul-rio-grandense: Parte I - uma contribuição a partir do registro geológico. *Brazilian Journal of Geology*, 25(4), 351-374.
- Frantz, J.C. 1997. *Petrologia e Hidrotermalismo dos Granitóides Estaníferos do Rio Grande do Sul*. Tese de Doutorado em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 264 pp.
- Frantz, J.C., Botelho, N.F., 1997. Os Granitóides Estaníferos do Rio Grande do Sul, Zonas de Cisalhamento Transcorrente e Geração de Greisen Estruturalmente

- Controlados. In: SBG/ Núcleo Brasília/ IG-UnB, Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos, VI, Pirenópolis, Anais, 313-315
- Frantz, J.C., Coelho, C.E., Botelho, N.F., 1998. Gênese e evolução dos fluidos envolvidos na alteração hidrotermal e na mineralização de estanho dos granitos do Rio Grande do Sul. *Brazilian Journal of Geology*, 28(3), 301-306.
- Frantz, J.C., Botelho, N.F., 2000. Neoproterozoic granitic magmatism and evolution of the eastern Dom Feliciano Belt in southernmost Brazil: a tectonic model. *Gondwana Research*, 3(1), 7-19.
- Frantz, J.C., McNaughton, N.J., Marques, J.C., Hartmann, L.A., Botelho, N.F., Caravaca, G., 2003. SHRIMP U-Pb zircon ages of granitoids from southernmost Brazil: constrains on the temporal evolution of the Dorsal de Canguçu transcurrent Shear Zone and Eastern Dom Feliciano Belt. In: SBG, South American Symposium on Isotope Geology, IV, Short Papers, Salvador, 1, 174-177.
- González-Partida, E., Carrillo-Chávez, A., Camprubí, A., Levresse, G., i Cambra, J. T., 2003. Depósitos epitermales de alta y baja sulfuración: una tabla comparativa. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 56(1), 10-18.
- Groves, D.I., Bierlein, F.P., Meinert, L.D., Hitzman, M.W., 2010. Iron oxide copper-gold (IOCG) deposits through Earth history: Implications for origin, lithospheric setting, and distinction from other epigenetic iron oxide deposits. *Economic Geology*, 105(3), 641-654.
- Hart, C. J. R., 2005. Classifying, distinguishing and exploring for intrusion-related gold systems. *The Gangue*, 87, 1//9.
- Hawkes, H. E., Webb, J. S., 1963. Geochemistry in Mineral Exploration. *Soil Science*, 95(4), 283.
- Hedenquist, J.W., 1987. Mineralization associated with volcanic related hydrothermal systems in the circum-Pacific basin. *Circum-Pacific Energy and Mineral Resources Conference*, 4th Singapore Trans. pp. 513–524.
- Henrichs, I.A., Marques, J.C., Frantz, J.C., 2011. Paragênese epitermal da Mina Galena, Cinturão Dom Feliciano Leste, Amaral Ferrador-RS. In: XIII

- Congresso Brasileiro de Geoquímica, Anais do XIII Congresso Brasileiro de Geoquímica, p. 1469-1472.
- Henrichs, I.A., 2010. Caracterização do sistema hidrotermal da Mina-Galena, Amaral Ferrador–RS. Trabalho de conclusão de curso de Geologia. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. Brasil, 66 pp.
- Hitzman M.W., 2000. Iron Oxide-Cu-Au deposits: What, Where, When, and Why. In: Porter TM (Ed.) Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold & Related Deposits: Global Perspective, Volume 1. PGC Publishing, Adelaide, pp 9-25.
- Huston, D., Mernagh, T., Dulfer, H., Skirrow, R.G., Geology of Critical Commodities, and Australia's Endowment and Potential, 2013. In: Skirrow, R.G., Huston, D.L., Mernagh, T.P., Thorne, J.P., Dulfer, H., Senior, A B. Critical commodities for a high-tech world: Australia's potential to supply global demand. Austral. Govern. Geosci. Australia. Retrieved from <http://www.ga.gov.au/data-pubs/data-and-publications-search/publications/critical-commodities-for-a-high-tech-world/conents>
- Jones, B.K., 1992. Application of metal zoning to gold exploration in porphyry copper systems. *Journal of Geochemical Exploration*, 43(2), 127-155.
- Jost, H., Frantz, J.C., Lindenmayer, Z.G., 2007. Assinatura Geoquímica de Depósitos Mineraiis Metálicos e Não-Metálicos. In: Licht, O.A.B, De Mello, C.S.B. e Da Silva, C.R. (eds.) *Prospecção Geoquímica–Depósitos mineraiis metálicos, não-metálicos, óleo e gás*. CPRM. Editora Planeta Terra, 153-172.
- Kirkham, R. V., 1972. Porphyry deposits. Report of Activities: Geological Survey of Canada, Paper, 72-1.
- Knust, S.S.A., Eberhardt, D.B., 2011. Geoquímica Prospectiva da Folha Porto dos Gaúchos, Noroeste do Estado de Mato Grosso. In: XIII Congresso Brasileiro de Geoquímica, III Simpósio de Geoquímica dos Países do Mercosul, p. 1797-1800.
- Lehmann, B., Mahawat, C., 1989. Metallogeny of tin in central Thailand: a genetic concept. *Geology*, 17(5), 426-429.

- Leinz, V., Pinagel, H., 1945. Estanho e tungstênio no Rio Grande do Sul. Boletim da Divisão de Fomento a Produção Mineral. DNPM, 70,1-80.
- Levinson, A.A., 1974. Introduction to exploration geochemistry. Calgary: Applied Publishing.
- Lima, A., De Vivo, B., Cicchella, D., Cortini, M., Albanese, S., 2003. Multifractal IDW interpolation and fractal filtering method in environmental studies: an application on regional stream sediments of (Italy), Campania region. Applied Geochemistry, 18(12), 1853-1865.
- Lindgren, W., 1933. Mineral deposits, 930 p. New York and London, McGraw-HillBook Co.
- Mattoso, S.Q., Formoso, M.L.L., 2007. Princípios Básicos para Prospecção Geoquímica. In: Licht, O.A.B, De Mello, C.S.B. e Da Silva, C.R. (eds.). Prospecção Geoquímica – Depósitos minerais metálicos, não-metálicos, óleo e gás. CPRM. Editora Planeta Terra, 97-152.
- Moura, M. A., Botelho, N. F., Olivo, G. R., Kyser, T. K., 2006. Granite-related Paleoproterozoic, Serrinha gold deposit, Southern Amazonia, Brazil: hydrothermal alteration, fluid inclusion and stable isotope constraints on genesis and evolution. Economic Geology, 101(3), 585-605.
- Mpodozis, C., Kay, S.M., 2003. Neogene tectonics, ages and mineralization along the transition zone between the El Indio and Maricunga mineral belts (Argentina and Chile 28–29°) [abs.]. In Congreso Geológico Chileno, 10th, Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
- Monteiro, L.V.S., Xavier, R.P., Hitzman, M.W., Juliani, C., de Souza Filho, C.R., Carvalho, E.D.R., 2008a. Mineral chemistry of ore and hydrothermal alteration at the Sossego iron oxide–copper–gold deposit, Carajás Mineral Province, Brazil. Ore Geology Reviews, 34(3), 317-336.
- Monteiro, L.V.S., Xavier, R.P., Carvalho, E.R., Hitzman, M.W., Johnson, C.A., Souza Filho, C.R., Torresi, I., 2008b. The Sossego iron oxide-copper-gold deposit, Carajas Mineral Province, Brazil: hydrothermal alteration paragenesis and stable Isotope constraints on the system evolution. Mineralium Deposita, 43:129–159.

- Neto, M. T. D. O. C., Rocha, A. M.R.D., 2010. Noções de Prospecção e Pesquisa Mineral para Técnicos de Geologia e Mineração. Natal/RN: Editora do IFRN-RN, 267 pp.
- Nunes, L.C., Camatti, C., Remus M.V.D, 2004. Geoquímica das muscovitas aplicada ao estudo da metalogênese do minério de Pb de Amaral Ferrador, RS. Dez anos de Microsonda Eletrônica em Porto Alegre. ILEA/UFRGS, pp 108-112.
- Orris, G.J., 1998. Additional descriptive models of industrial mineral deposits (No. 98-505). US Geological Survey, 49 pp.
- Orris, G.J., Bliss, J.D., 1991. Some industrial mineral deposit models: descriptive deposit models. US Geological Survey, 16 pp.
- Philipp, R.P., Machado, R., Nardi, L.V.S., Lafon, J.M., 2008. O magmatismo granítico Neoproterozóico do Batólito Pelotas no sul do Brasil: novos dados e revisão da geocronologia regional. *Brazilian Journal of Geology*, 32(2), 277-290.
- Ramos, M.M., Lopes Jr, I., Machado, G.J., 2007. Técnicas de prospecção geoquímica. In: Licht, O.A.B, De Mello, C.S.B. e Da Silva, C.R. (eds.). *Prospecção Geoquímica – Depósitos minerais metálicos, não-metálicos, óleo e gás*. CPRM. Editora Planeta Terra, 279-306.
- Rattenbury, M., Partington, G. A., 2003, Prospectivity models and GIS data for the exploration of epithermal gold mineralisation in New Zealand: In *Epithermal Gold in New Zealand GIS Data Package and Prospectivity Modelling*, Crown Minerals, Ministry of Commerce, New Zealand, 68 pp.
- Requia, K., Stein, H., Fontboté, L., Chiaradia, M., 2003. Re–Os and Pb–Pb geochronology of the Archean Salobo iron oxide copper–gold deposit, Carajás mineral province, northern Brazil. *Mineralium Deposita*, 38(6), 727-738.
- Roberts, D. E., Hudson, G. R. T., 1983. The Olympic Dam copper-uranium-gold deposit, Roxby Downs, South Australia. *Economic Geology*, 78(5), 799-822.
- Rost, M.C., 2006. Mapeamento estrutural do paleoambiente hidrotermal de Amaral Ferrador-RS. Salão de Iniciação Científica. Livro de resumos. Porto Alegre: UFRGS, 2006.

- Silveira, F.V., Larizatti, J.H., de Brito, R.S., Abram, M.B., Bahiaenses, I.C., 2011. Geoquímica prospectiva aplicada em projetos da CPRM executados pelo departamento de recursos minerais-Derem. In: XIII Congresso Brasileiro de Geoquímica, III Simpósio de Geoquímica dos Países do Mercosul, pp.1761-1764.
- Sillitoe, R. H., 1994. Erosion and collapse of volcanoes: Causes of telescoping in intrusion-centered ore deposits. *Geology*, 22(10), 945-948.
- Sillitoe, R. H., 2003. Iron oxide-copper-gold deposits: an Andean view. *Mineralium Deposita*, 38(7), 787-812.
- Sillitoe, R. H., & Hedenquist, J. W., 2003. Linkages between volcanotectonic settings, ore-fluid compositions, and epithermal precious metal deposits. *Special Publication-Society of Economic Geologists*, 10, 315-343.
- Sinclair, W. D., 2007. Porphyry deposits. *Mineral deposits of Canada: A synthesis of major deposit-types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication*, 5, 223-243.
- Skirrow, R.G., Huston, D.L., Mernagh, T.P., Thorne, J.P., Dulfer, H., Senior, A.B. 2013. Critical commodities for a high-tech world: Australia's potential to supply global demand. *Geoscience Australia, Canberra*, 118 pp.
- Teixeira, R.D.S., Frantz, J.C., Mexias, A.S., Marques, J.C., Costa, J.A., 2007. Caracterização da alteração hidrotermal micácea do tipo greisen e dos reequilíbrios de baixa temperatura em áreas graníticas: o exemplo do Distrito Estanífero de Encruzilhada do Sul, RS. *Pesquisas em Geociências. Porto Alegre, RS. Vol. 34, n. 2 (2007)*, pp. 75-87.
- Tornos Arroyo, F., Carriedo, J., Velasco Roldán, F., Galindo Francisco, M., Casquet, C., 2007. The relationship between large deep mafic sills, crustal contamination and the formation of Ni-(Cu) and IOCG deposits. *Proceedings of the Ninth Biennial SGA Meeting*, pp. 975-978
- Valencia-Moreno, M., Landin, L.O., Alcántara, B.N., Gómez, J.R., Segura, E.P., 2006. Características metalogenéticas de los depósitos de tipo pórfido

- cuprífero en México y su situación en el contexto mundial. Boletín de la sociedad geológica Mexicana, 58(1), 1-26.
- Villela Olavarría, D.C., Araya, J.C., 2016. Franjas metalogénicas de los Andes Centrales: blancos clave para la exploración minera. Comisión Chilena del Cobre. 61 pp.
- Warren, H.V. & Delavault, R.E., 1956. Pathfinders elements in geochemical prospecting (abstract). International Geologic Congress, 20th, Mexico City, pp. 379.
- White, N.C., Hedenquist, J.W., 1995. Epithermal gold deposits: styles, characteristics and exploration. SEG newsletter, 23(1), 9-13.
- Wildner, W., Ramgrab, G. E., Lopes, R. D., Iglesias, C. D. F., 2008. Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: CPRM. Escala 1:1.750.000.
- Williams, P.J., Barton, M.D., Johnson, D.A., Fontboté, L., De Haller, A., Mark, G., Oliver, N.H.S., Marschik, R., 2005. Iron oxide copper-gold deposits: Geology, space-time distribution, and possible modes of origin. Economic Geology, 371-405.
- Zheng, Y., Sun, X., Gao, S., Wang, C., Zhao, Z., Wu, S., Wu, X., 2014. Analysis of stream sediment data for exploring the Zhunuo porphyry Cu deposit, southern Tibet. Journal of Geochemical Exploration, 143, 19-30.

## **CAPÍTULO II: ARTIGO CIENTÍFICO**

## COMPROVANTE DE SUBMISSÃO DO ARTIGO



Francisco Garcia <fr.paulo@gmail.com>

---

### Submission GEXPLO\_2017\_21 received by Journal of Geochemical Exploration

1 mensagem

---

**Journal of Geochemical Exploration** <EvisSupport@elsevier.com>

12 de janeiro de 2017 14:32

Responder a: gexplo-eo@elsevier.com

Para: fr.paulo@gmail.com

*This message was sent automatically. Please do not reply.*

Ref: GEXPLO\_2017\_21

Title: Statistical analysis of stream sediment data from Eastern Dom Feliciano Belt, Southern Brazil: implications for metallogenesis

Journal: Journal of Geochemical Exploration

Dear Mr. Garcia,

Thank you for submitting your manuscript for consideration for publication in Journal of Geochemical Exploration. Your submission was received in good order.

To track the status of your manuscript, please log into EVISE® at: [http://www.evise.com/evise/faces/pages/navigation/NavController.jspx?JRNL\\_ACR=GEXPLO](http://www.evise.com/evise/faces/pages/navigation/NavController.jspx?JRNL_ACR=GEXPLO) and locate your submission under the header 'My Submissions with Journal' on your 'My Author Tasks' view.

Thank you for submitting your work to this journal.

Kind regards,

Journal of Geochemical Exploration

**Have questions or need assistance?**

For further assistance, please visit our [Customer Support](#) site. Here you can search for solutions on a range of topics, find answers to frequently asked questions, and learn more about EVISE® via interactive tutorials. You can also talk 24/5 to our customer support team by phone and 24/7 by live chat and email.

---

Copyright © 2017 Elsevier B.V. | [Privacy Policy](#)

Elsevier B.V., Radarweg 29, 1043 NX Amsterdam, The Netherlands, Reg. No. 33156677.

**RESEARCH PAPER**

To: Journal of Geochemical Exploration

January 12, 2017

**Statistical analysis of stream sediment data from Eastern Dom Feliciano Belt, Southern Brazil: implications for metallogenesis****HIGHLIGHTS**

- Geochemical prospective study in Southern Brazil
- Statistical analysis in stream sediments
- Six new areas indicated by geochemical anomalies
- Signatures similar to IOCG, porphyry-epithermal and stanniferous granites deposits.

Francisco P. Garcia<sup>1</sup>, Juliana C. Marques<sup>1</sup>, José C. Frantz<sup>1</sup>, Isadora A. Henrichs<sup>2</sup>, João Felipe Costa<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

<sup>2</sup>Department of Geology, School of Natural Sciences, Trinity College Dublin, Dublin 2, Ireland

<sup>3</sup>Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Corresponding author:**

Francisco Paulo Garcia  
Rua Arnaldo Bernardi, 70  
Porto Alegre, RS, Brazil  
fr.paulo@gmail.com

## **ABSTRACT**

In the last few years, geochemical prospective studies allied to statistical analysis and geoprocessing techniques became indispensable in the search for new mineral deposits. The Brazilian Geological Survey (CPRM) performed a geochemical survey in the eastern portion of the Rio Grande do Sul State, in an area that covers 32.481 km<sup>2</sup>, and provided stream sediment and pan concentrate data. The studied area is situated in the Rio Grande do Sul's Shield, more specifically in the Dom Feliciano Eastern belt. The area is constituted by a massive granitic magmatism with crustal reworking characteristics, in which rocks of Proterozoic age prevail. Although some researches had found clues of new mineral occurrences in the eastern part of the Shield, it is still understudied. Thus, this study aimed to investigate the possibilities of new targets from the identification of anomalous values in the region, employing statistical and geoprocessing techniques. 1528 stream sediment and 1477 pan concentrate samples available in the digital database of CPRM (Geobank) were analysed. The threshold values for stream sediment chemical elements were determined, which allowed identifying the anomalous areas. The pan concentrate data was analysed differently, from the construction of Kernel density maps. The resulting anomalous areas of this study were presented in two different ways, as Purely Statistical Anomalies (PSA) and Prospective Anomalies (PA). The regions that presented chemical elements above the threshold value, considering just their geographical position, regardless of the chemical affinity between the elements, were denominated Purely Statistical Anomalies. In the Prospective Anomalies, the delimitation of the anomalous area was based on the grouping of the elements that had chemical affinity, using prospective concepts as geochemical signature and pathfinder elements. The results pointed to six anomalous areas in the Sul-Riograndense Shield, which presented signatures of Iron oxide copper-gold (IOCG), porphyry-epithermal and stanniferous granites deposits. This regional scale geochemical study revealed unprecedented anomalous areas in the Sul-Riograndense Shield. Besides that, it became clear that there is a great metallogenic potential that still need to be studied.

**KEYWORDS:** geochemical prospecting, geochemical anomalies, stream sediment data.

## 1. Introduction

Geochemical prospecting is an essential technique for the discovery of new mineral deposits. A number of metal elements can be mapped by analysing samples of soil, rocks, water, sediment and even plant fragments (Matosso and Formoso, 2007). With the evolution and advancement of technology in recent years, geochemical mapping has become an essential tool in the studies of geochemical prospecting (Lima et al., 2003; Rattenbury and Partington, 2003; Skirrow et al., 2013).

By combining statistical analysis and geoprocessing data, it is possible to build geochemical maps that facilitate the interpretation and correlation of geochemical anomalies with the rock assemblages of a region (Eppinger et al., 2013; Zheng et al., 2014).

Studies of mineral exploration in the Rio Grande do Sul's Shield were historically focused on its central and western portion. The eastern portion of the Shield has been neglected over the years because it is made up mainly of granitic rocks that was considered as granite-migmatitic terrains with low economic potential until the 80s. Scarce studies dedicated to the metallogenesis of this Neoproterozoic terrain can be highlighted. Frantz et al. (1998) discussed the genesis and evolution of the hydrothermal fluids in the Campinas Mine tin mineralization, which occur as cassiterite in greisens and quartz veins in the Encruzilhada do Sul Stanniferous District. Recently, some studies about the Galena Mine area, which is around the city of Amaral Ferrador-RS, were published (Nunes et al., 2004; Rost, 2006; Henrichs et al., 2011). Henrichs et al. (2011) classified the deposit as a low sulphidation epithermal system and as an important source of base metals such as Pb and Zn. Mineral deposits may be hidden in the eastern Rio Grande do Sul's Shield, but the importance of this area had never been properly assessed.

Our study, which was based on statistical analysis of this regional stream sediment data and on descriptive analysis of pan concentrate data, aimed to contribute to the evaluation of the metallogenic potential of the eastern portion of the

Rio Grande do Sul's Shield, pointing out possible targets for future studies. Geochemical density and interpolation maps were constructed from both pan concentrate and stream sediments data.

## **2. Materials and methods**

### **2.1. Study area and Geological Context**

The geochemical data analysed in this study were obtained in the Rio Grande do Sul State, southernmost Brazil, in its eastern shield portion covering a 32,481 km<sup>2</sup> area. The Rio Grande do Sul's Shield can be divided in three geophysical domains, Western, Central and Eastern, based on gravimetric and aeromagnetic discontinuities (Fernandes et al., 1995). The studied area is located within the Eastern Geophysical Block and include part of the eastern segment of the Central block. This area was named by Frantz and Botelho (2000) as the Dom Feliciano East Belt and consists of a neoproterozoic granitic belt. Its evolution is marked by different types of intrusions that occurred during three tectonic regimes: the tangential, the transcurrent and the post-transcurrent regimes.

According to the geological map published by the Geological Survey of Brazil (Wildner et al., 2008), shown in Figure 2, it is possible to observe that the sampling area was focused on the gneisses and granitic rocks. Two major units represents up to 60% of all studied area: Pinheiro Machado Granite-Gneiss Complex and Dom Feliciano Granitic Suite.

The Pinheiro Machado Granite-Gneiss Complex (PMGGC), that occurs in the southern part of the studied area, comprises Neoproterozoic rocks and is divided in to two main domains: the Porphyritic Metagranitoids with striking foliation and the Granodioritic to tonalite Gneisses that are locally migmatized. Both domains have basements septis units, composed of 15 km long megaxenoliths of calc silicate rocks, biotite gneisses, tonalites, quartzites, schists, marbles and migmatitic portions (Wildner et al., 2008).

The Dom Feliciano Granitic Suite occurs throughout the studied area and is represented by its two facies: Cerro Grande and Serra do Herval. The Cerro Grande Facies comprises porphyritic monzogranites that range from homogeneous to thick granular porphyritic. The Serra do Herval Facies is basically formed by a syenogranite of equigranular texture, rich in feldspar, quartz and with a low amount of white mica and feldspar. Typically, this facies consists of coarsely NE-SW aligned stocks (Wildner et al., 2008).

The Dom Feliciano Granitic Suite - Cerro Grande Facies emerges in large areas within the studied polygon. In this region of the Amaral Ferrador city, this facies hosts the Galena mine, which has lead mineralization in the form of sulphides (galena). This deposit was characterized by Henrichs (2010) as a low sulphidation epithermal deposit, from a detailed analysis of its mineralization and hydrothermal alterations. Therefore, the rocks of this Facies should be carefully observed, since they have a high potential to host mineral deposits.

The tin mineralization are located in the western portion of the polygon, in the so-called Encruzilhada do Sul Stanniferous District (Leinz and Pinagel, 1945). The mineralization of this district are directly related to the intrusions of the Campinas and Cordilheira Intrusive Suites, where the mineralogy of the deposits is basically composed of cassiterite in quartz veins and in greisen bodies (Frantz et al., 1998). The cassiterite deposits like the Cerro Branco, Campinas and Tabuleiro Mines are found preferentially in the post-collisional granitic rocks of calc-alkaline composition of the Cordilheira Intrusive Suite (CIS), dated between 630 and 617 Ma, and within the granitoids of the Campinas Intrusive Suite ( $\cong$  585 Ma), which are related to the transcurrent tectonic phase that succeeds the collisional tangential phase (Frantz, 1997).

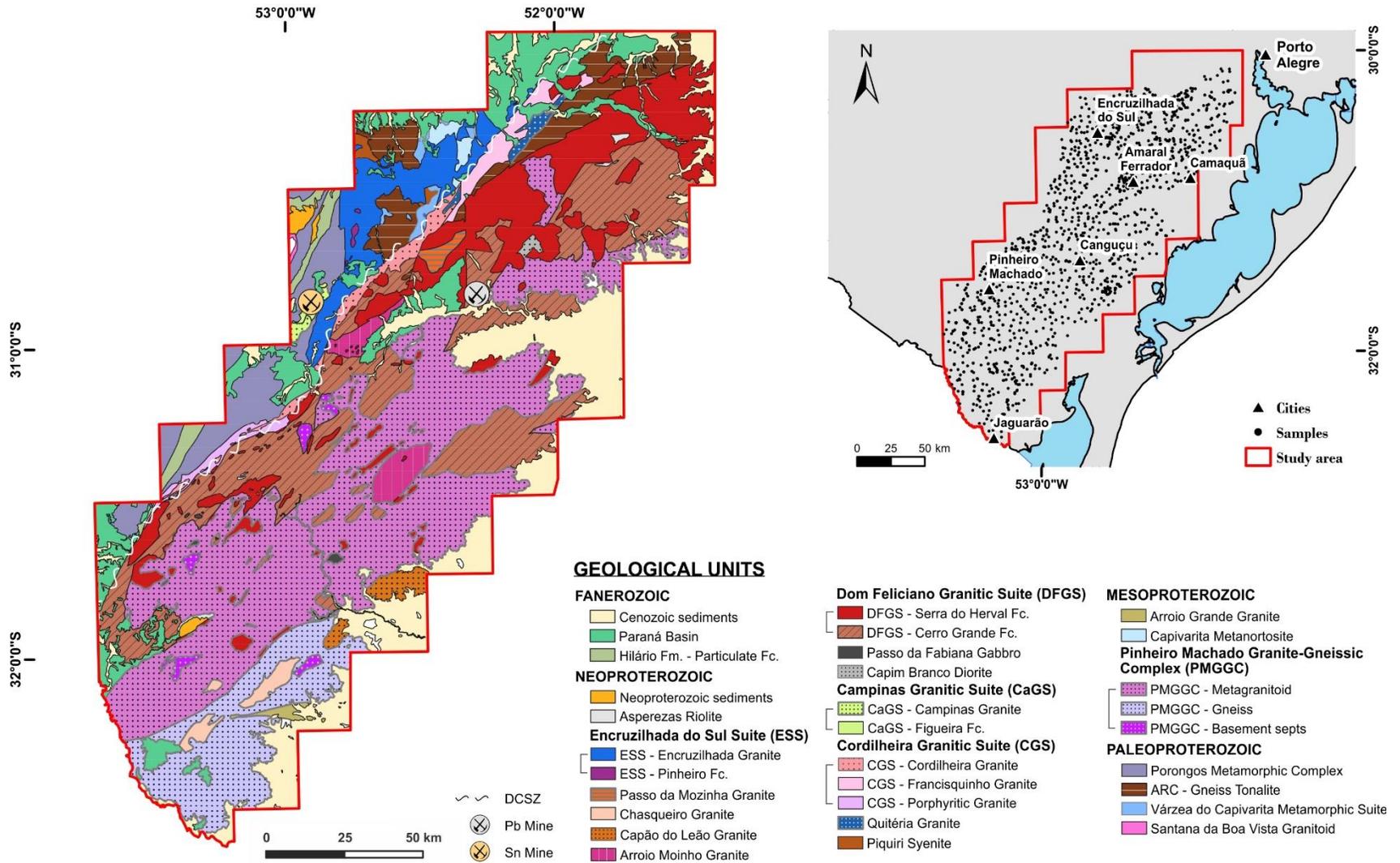


Figure 1: Geological Map of the study area modified of Wildner et al. (2008).

## 2.2. Sampling and analytical procedures

The Geological Survey of Brazil (CPRM) performed a geochemical survey titled "Prospecting in Dom Feliciano Belt" in the eastern portion of the Rio Grande do Sul State (CPRM, 2010). Stream sediment and pan concentrate samples were collected in the approximate scale of 1: 250,000 with an intensification of about 1: 100,000 in the most relevant areas. The stream sediment samples were obtained at main channels and drains and can be defined as the composite type, which is characterized by collecting material at more than one point around the sampling station. However, the samples of pan concentrate were mainly collected in the active channels of the drainages, although in some places the collections have been made in drainages with dry beds. The appropriate test procedure for a particular sample analysis varies according to the material being processed. After collection, the stream sediment material was sent to the ACME laboratory (Analytical Laboratories Ltd., Vancouver, Canada) for analysis. For each sample, 53 chemical elements were analysed (Ti, Al, Fe, Mg, Ca, Na, K, P, S, Mo, Cu, Pb, Zn, Ni, Co, Mn, As, U, Th, Sr, Cd, Sb, Bi, V, La, Cr, Ba, B, W, Sc, Tl, Se, Te, Ga, Cs, Ge, Hf, Nb, Rb, Sn, Ta, Zr, Y, Ce, In, Be, Li, Ag, Au, Hg, Re, Pd and Pt). Samples were first dried at 60°C and then sieved to 80 mesh, pulverized, digested with aqua regia and finally analysed by ICP-MS (mass spectrometry with inductively coupled plasma).

The pan concentrate, in the field, was sieved from # 4 (4.8 mm) through # 8 and # 16, to # 28 (0.6 mm) (Silveira et al., 2011). The concentrate was subsequently processed in the CPRM laboratory (SUREG-PA), applying Franz magnetic separation and semi-quantitative mineralogical analysis through binocular loupe. In addition, the gold particles were counted in the same laboratory (cf. Knust and Eberhardt, 2011).

All results are published by the Geological Survey of Brazil in an online database (Geobank), but with no report or interpretation. The data were filtered to select only samples whose provenance came from the eastern shield granitic rocks. After filtering, the work was carried out using 1529 samples of stream sediments and 1477 samples of pan concentrate.

## 2.3. Data processing

### 2.3.1. Statistical analysis

The statistical analysis was performed in the stream sediments data to establish the threshold value for each variable of interest and to visualize which samples were anomalous in the research area. For this procedure, Microsoft Excel® and SGeMS® software were used.

To determine the threshold value for the stream sediment data a methodology presented in Costa and Koppe (1999) was adopted. The procedure was performed using Microsoft Excel program, in which it was applied the following expression to determine the threshold value (breakpoint).

$$e^{\bar{Z}(x)+2\sigma_{Z(x)}} \quad (1)$$

$$\bar{Z}(x) \quad (2)$$

$$\sigma_{Z(x)} \quad (3)$$

Here (2) and (3) represent, respectively, the mean and standard deviation of the natural logarithms of the original values. These values were obtained from the statistical analysis (mean and standard deviation) using SGeMS. Finally, a table containing the values of *thresholds* for each variable was constructed.

Differently of the stream sediment data, which were presented in absolute values, the pan concentrate (PC) data were expressed in class ranges. Therefore, the data were imported and displayed in a spatial form using a geographic information system. PC data were divided into six classes according to the weight percentage in the sample. The PC data complemented the statistical stream sediment studies that have defined the anomalous areas.

### 2.3.2. Identification of anomalies

After the determination of threshold values obtained by the statistical analysis of the stream sediments results, the data were imported to visualize the variables in a geographic information system (GIS) using a wide range of tools provided by the ArcGIS™, which allowed to work spatially to extract more information.

Knowing the spatial distribution and the concentrations of the chemical elements of each sample, after comparing each element of the 1529 stream sediment samples with the threshold and background, it was possible to identify the anomalous values. The kernel tool was used to build a density map for each chemical element and to illustrate the concentration values of the studied elements. Consequently, it was possible to visualize the density distribution of the anomalies.

The determination of anomalous regions based on the pan concentrate was defined by direct observation of the anomalous concentration of each mineral. The threshold for each mineral was obtained subjectively based on their abundance in the study area. For the most common minerals a high threshold was adopted. Conversely, for minerals and elements which are rare in the region it was selected a low *threshold*. This technique was used to interpret the pan concentrate data and add further information to the stream sediments statistical studies. Based on the affinity with different classes of mineral deposits related to granites, three minerals, barite and iron oxides, were selected. Barite was observed because it is a sulphate that might be related to epithermal deposits (White and Hedenquist, 1995; Camprubí and Albinso, 2006). Iron oxides, hematite and magnetite, were studied because they are closely related to IOCG deposits (Williams et al., 2005). Additionally, gold and cassiterite pathfinders for stanniferous deposits in granites (Lehmann and Mahawat, 1989) were carefully monitored.

The study of basins was also necessary to understand the origin of each material, once the collection site of stream sediment or pan concentrate does not represent the site itself but the river basin or sub-basin in which it is inserted. Therefore, the

ArcGIS™ hydrographic tools were used to define the river basins and to group the anomalous points, and subsequently to delimitate the anomalous regions.

The anomalous hydrographic basins were grouped and delimited in two distinct ways: purely statistical anomalies and prospective anomalies. The purely statistical anomalies were defined based on the stream sediment data, taking into account just its geographic position, regardless of the chemical affinity between elements within a single anomalous region. The prospective anomalies were those where the anomalous chemical elements have geochemical affinity in the prospecting point of view. To determine anomalous areas, stream sediment and pan concentrate data were considered, using prospective concepts such as pathfinders and geochemical signatures (cf. Levinson, 1974; Cox and Singer, 1992; Orris and Bliss, 1998; Orris, 1998).

The prospective anomalies (PA) maps were elaborated allying the anomalous stream sediment samples to the pan concentrate samples. Since the studied polygon is predominated by granitoids, the association of chemical elements for granitic rocks were defined based on the chemical affinity between the selected elements.

For the Porphyry-Epithermal groups, the anomalous basins were characterized by the geochemical signature of Ag, Au, Cu, Hg, Mo, Pb, Sb and Zn combined with the presence of barite and gold particles obtained from the pan concentrate (Levinson, 1974; Carlile et al., 1998; Eppinger et al., 2013; Zheng et al., 2014). To search for areas with possible IOCG signatures, As, Au, Co, Cu, Fe, Mo, Ni, and U were grouped together with gold particles, barite, hematite and magnetite obtained from the pan concentrate (cf. Ehrig et al., 2013; Williams et al., 2005). Unlike the other studied deposits, the stanniferous deposits had a less complicated geochemical signature, being defined by the W-Sn association allied to the presence of cassiterite and wolframite in the pan concentrate data (Levinson, 1974; Jost et al., 2007).

### 3. Results

The threshold of each element of interest was found applying statistical techniques to the stream sediment data. Hence, it was possible to identify anomalous and background areas. The threshold of each chemical element was expressed as percentage, ppm (part per million) or in ppb (part per billion), as shown in Table 1.

Table 1. Threshold values for the studied area

Element (Unit)	Threshold	Element (Unit)	Threshold	Element (Unit)	Threshold
Ag (ppb)	154,16	La (ppm)	237,30	Sb (ppm)	0,07
As (ppm)	6,18	Li (ppm)	18,96	Sc (ppm)	4,30
Au (ppb)	0,93	Mn (ppm)	1389,59	Se (ppm)	0,84
Ba (ppm)	189,67	Mo (ppm)	0,94	Sn (ppm)	7,24
Co (ppm)	16,43	Nb (ppm)	1,95	Te (ppm)	0,02
Cs (ppm)	3,90	Ni (ppm)	12,35	Th (ppm)	149,68
Cu (ppm)	49,82	P (%)	0,08	U (ppm)	9,37
Fe (%)	3,75	Pb (ppm)	29,65	V (ppm)	70,96
Hg (ppb)	36,81	Pd (ppb)	10,84	W (ppm)	0,20
K (%)	0,31	Pt (ppb)	3,30	Y (ppm)	44,10
				Zn (ppm)	68,02

Individual maps of stream sediments anomalies were constructed after obtaining the values of each chemical element. Additionally, maps of individual anomalies of pan concentrate data were also organized.

### 3.1. Stream sediment individual anomalies

The individual anomalies maps were created from the combination of the kernel density maps with the stream sediment samples that presented anomalous values. Using geochemical concepts, such as tracer elements and geochemical signatures (Levinson, 1974), ten elements of interest were selected: Ag, Cu, Sn, As, Mo, W, Hg, Pb, Au and Zn.

Silver was anomalous in 90 samples, from which 59 were concentrated in the central part of the studied area, with values varying from 155 to 2133 ppb. Strong anomalies were also found in the southwestern portion of the polygon (Fig. 2). Copper anomalies were identified in the same places where silver anomalies were recognized. In the polygon, 41 samples were observed with relatively higher values of Cu, ranging from 50 and 161.33 ppm. The central area had the highest concentration of anomalous copper samples (Fig. 2). Tin was grouped in four regions of the polygon: in the southwest, east, central and northern parts (Fig. 2). For Tin, 51 anomalous samples were identified, with values between 7.5 and 62.3 ppm. With the exception of tin anomalies that occurred in the northern part of the polygon, the anomalous areas were coincident with the silver area, mainly in the central and southwest area.

In general, anomalies of As and Mo elements were coincident and concentrated in three main zones of the polygon: the northwest limit, in the center and in the south (Fig. 2). 26 samples with anomalous As were found with concentrations that ranged from 6.2 and 26.3 ppm. 46 samples showed Mo values above the *threshold*, 40 within the two main anomalous areas: the central and the northwest portions of the polygon, where the values ranged from 0.95 and 7.18 ppm.

Tungsten anomalies were located in the northern and northwest portions of the polygon (Fig. 3), in which was observed a total 51 samples with values above the *threshold*, with concentration ranging from 0.3 to 6.7 ppm. The mercury anomalies localized in the northern part of the polygon (Fig. 3), were similar to those presented by tungsten. In total, from the 49 anomalous Hg observed samples, 43 were located

in this part of the polygon, with values ranging from 37 to 1083 ppb. The highest Pb anomaly was coincident with the Hg anomaly, in the northern portion of the studied polygon (Fig. 3). In the center, another Pb anomaly was identified. The anomalous values occurred in 39 samples, with values ranging from 29.7 to 105.5 ppm. Zinc was concentrated in small areas (Fig. 3). Just 32 samples with values above the threshold were recognized, ranging from 68.7 to 308.4 ppm.

The Au anomalies, observed in 59 samples, were scattered distributed. However, two areas showed meaningful values: the first, located in the eastern part of the study area, with two samples, one with the highest content found in the polygon (106.6 ppb); and the second area, located in the southern part of the polygon, with two anomalous samples with 3.8 and 23.4 ppb values (Fig. 3).

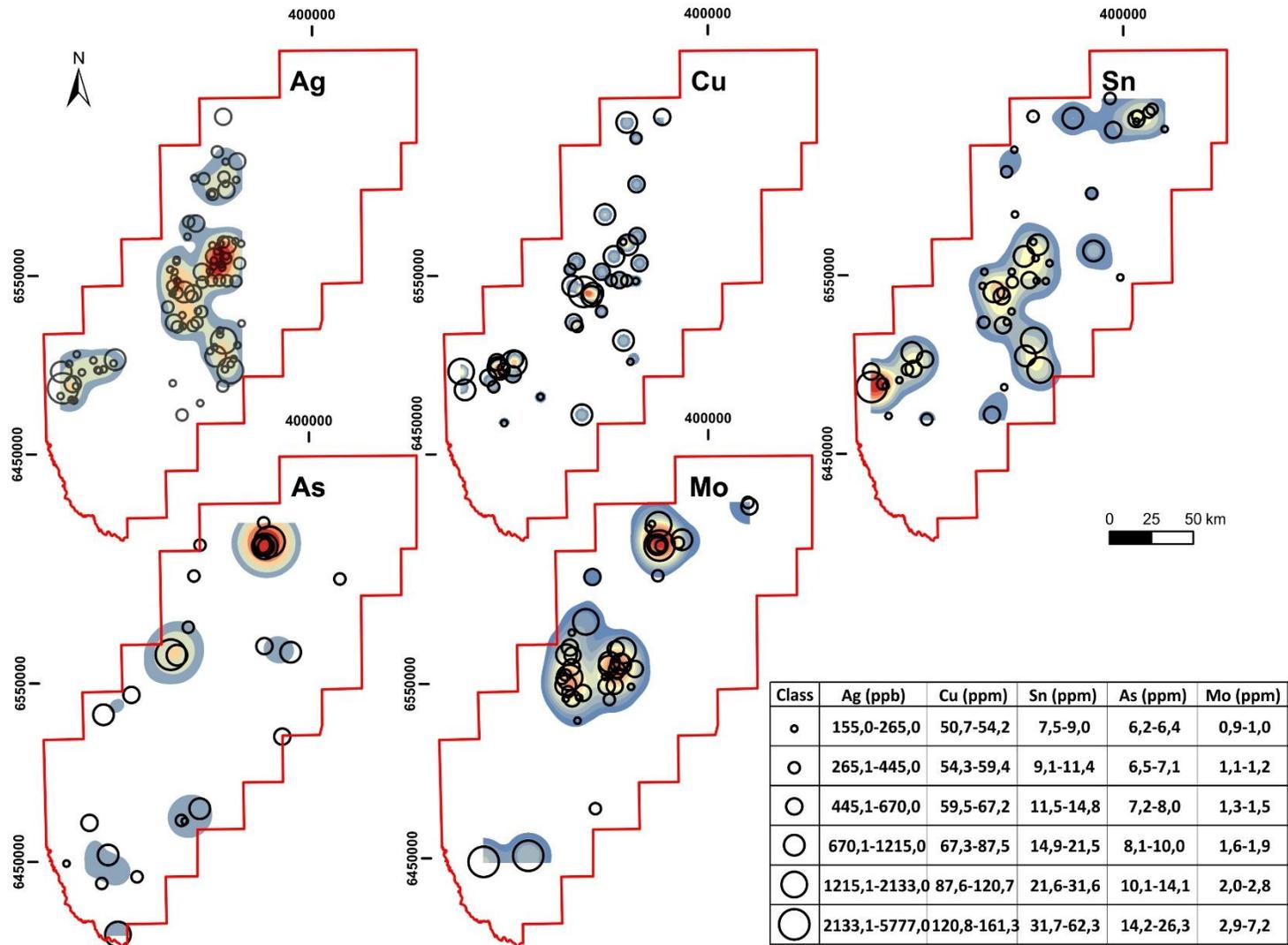


Figure 2: Individual geochemical anomaly distribution of the stream sediment data, for Ag, Cu, Sn, As and Mo.

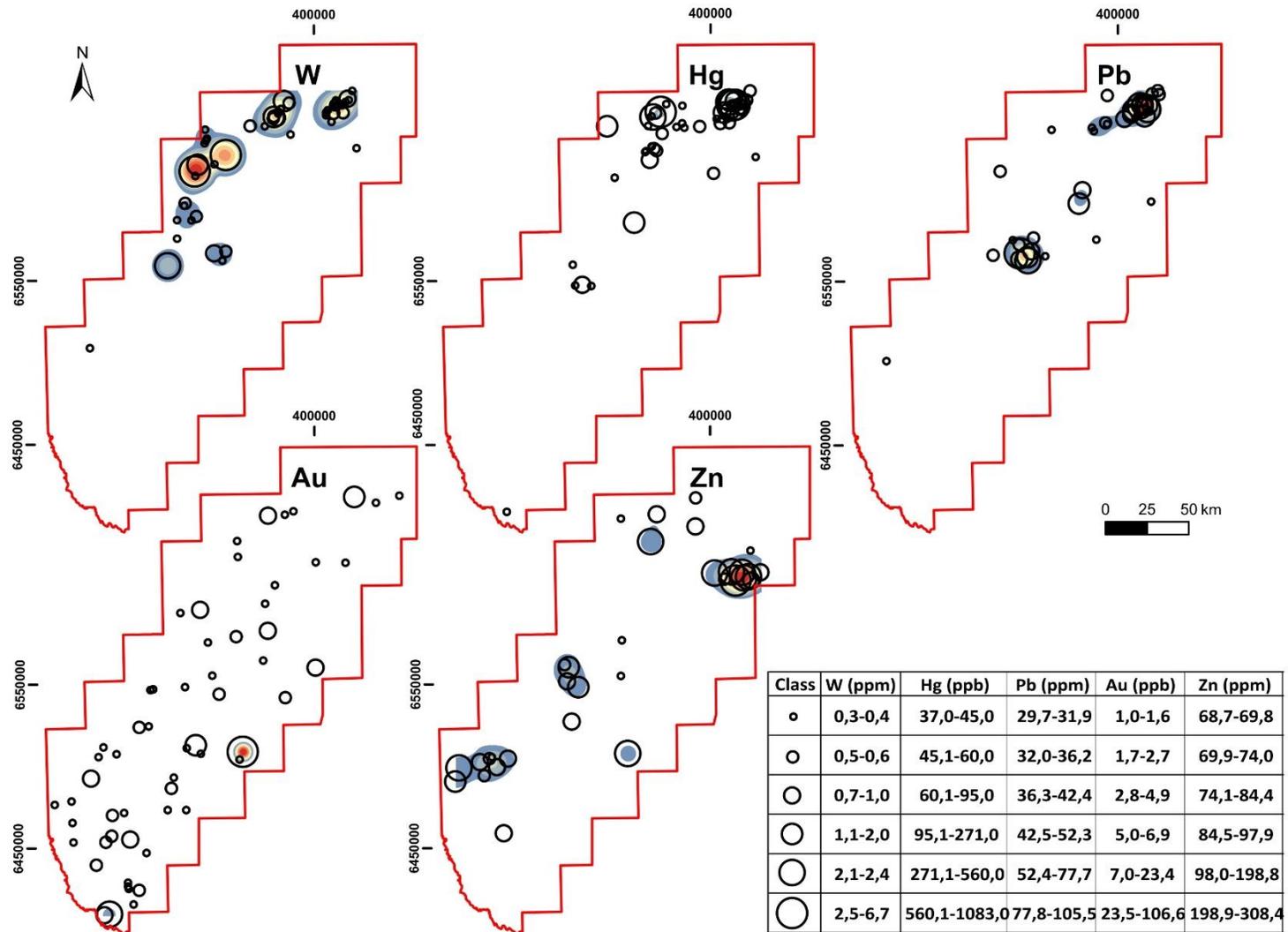


Figure 3: Individual geochemical anomaly distribution of the stream sediment data for W, Hg, Pb, Au and Zn.

### 3.2. Pan concentrate individual anomalies

For the pan concentrate anomalies, maps with the distribution of each mineral/substance of interest were constructed.

The presence of barite was observed in only 15 samples. They were considered anomalous just in two classes of concentration (<1% and 1-5%). In general, the occurrence of barite was concentrated on the northern portion of the area. Furthermore, it was possible to observe that the samples containing barite are aligned in the NE-SW direction (Fig. 4).

Cassiterite was represented in all classes of pan concentrate. To identify the most relevant values, four classes of this mineral were highlighted: 5-25%, 25-50%, 50-75% and 75-100%, totalling 74 samples. The two major classes (50-75% and 75-100%), had 21 samples that are concentrated in the northern portion of the polygon (Fig. 4).

The same process used to determine anomalous zones was applied to the magnetite and hematite. Considering that they occur frequently, the results for these minerals were considered anomalous only in the two highest classes: 50-75% and 75-100%. Thus, 27 samples of anomalous hematite and 80 for magnetite were highlighted. By comparing the anomalies map between these two minerals it was possible to observe that there was no direct relationship between them, except in the northern part of the polygon, where both coexisted (Fig. 4). Furthermore, it was observed that the hematite was concentrated in the center and in the north of the polygon and magnetite was widespread (occurring in the northern, northeast, central and southeast parts of the polygon) (Fig. 4).

The gold distribution analysis was based on particles counting. The classes and values presented in the maps followed the quantification of gold specks in each processed sample. 91 samples with positive results were considered. Between the established classes, two presented high values, with 15-19 and 20-37 grains of gold, respectively. Two zones exhibited high values of gold particles: one located in the eastern part of the polygon, considered the most interesting, and the other one with a more sparse distribution, located in the southwest part of the studied area (Fig. 4).

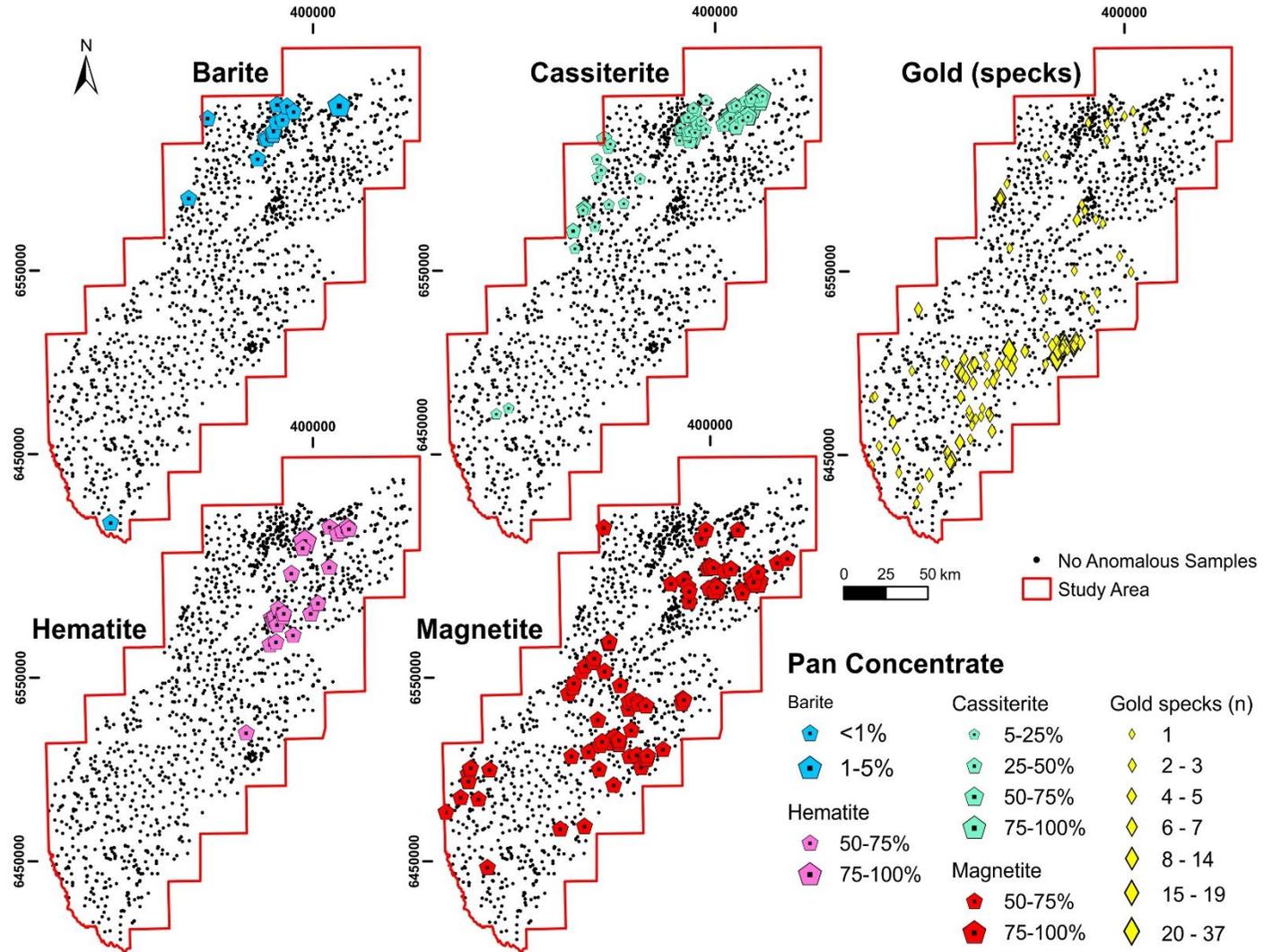


Figure 4: Anomaly distribution from pan concentrate results.

### 3.3. Purely Statistical Anomalies (PSA)

The Purely Statistical Anomalies (PSA) were defined by grouping micro-basins where many individual stream sediment anomalies were identified. Using this approach, nine areas were delimited (Fig. 5). In the table, it was possible to observe the number of samples with higher value than the *threshold*, the elements with higher anomalous behaviour in each specific area and the elements with weak anomalies (Fig.5).

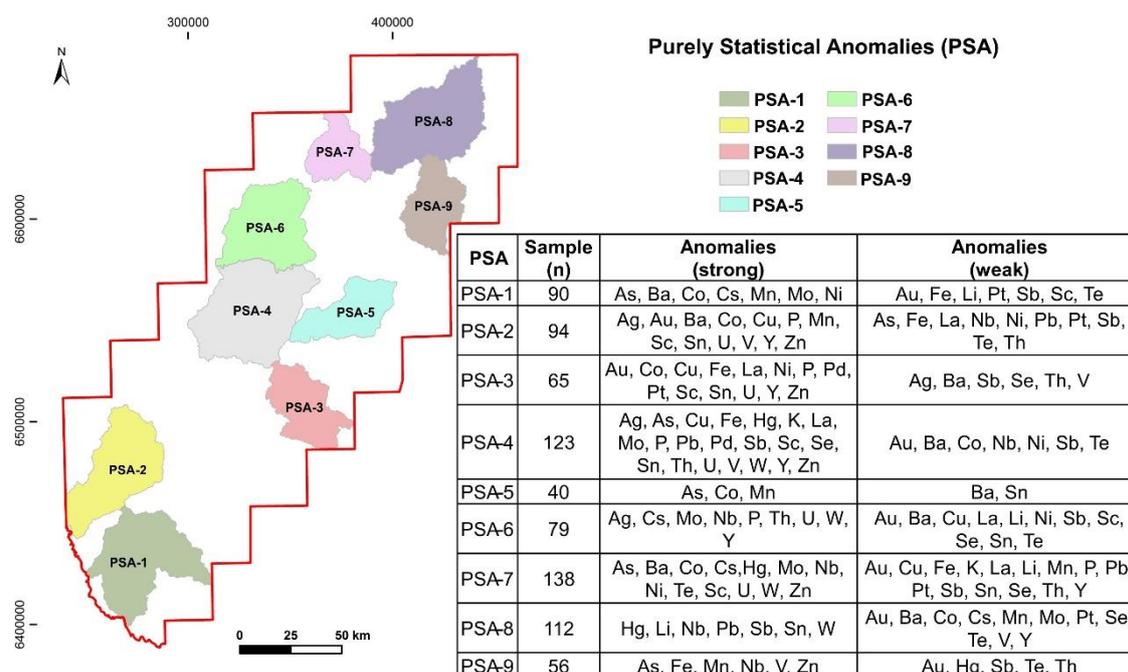


Figure 5: Map and table of the purely statistical anomalies (PSA).

### 3.4. Prospective Anomalies (PA)

Expected geochemical signatures and minerals/substances in three different styles of mineral deposits - porphyry-epithermal, IOCG and granitic stanniferous deposits - were considered as guidelines to define the prospective anomalies (PA) in the studied area. The stream sediment data and the pan concentrate results were considered together to reveal possible potential areas. The elements and minerals/substances considered as fingerprints were: Ag, Au, Cu, Hg, Mo, Pb, Sb, Zn, barite and gold specks to porphyry-epithermal type of deposit (Carlile et al., 1998; Eppinger et al., 2013); As, Au, Co, Cu, Fe, La, Mo, Ni, P, Sc, U, V, apatite, barite, hematite, ilmenite, magnetite and gold particles for IOCG type of deposit (Williams et al., 2005); and Sn, W, cassiterite and wolframite for granitic stanniferous deposits (Skirrow et al., 2013).

Figure 6 illustrates the prospective anomalies obtained after this induced approach. The geology information was also exhibited in the figure to contextualize the environment. In the figure 6 was also possible to see a table that summarized the information for each defined PA.

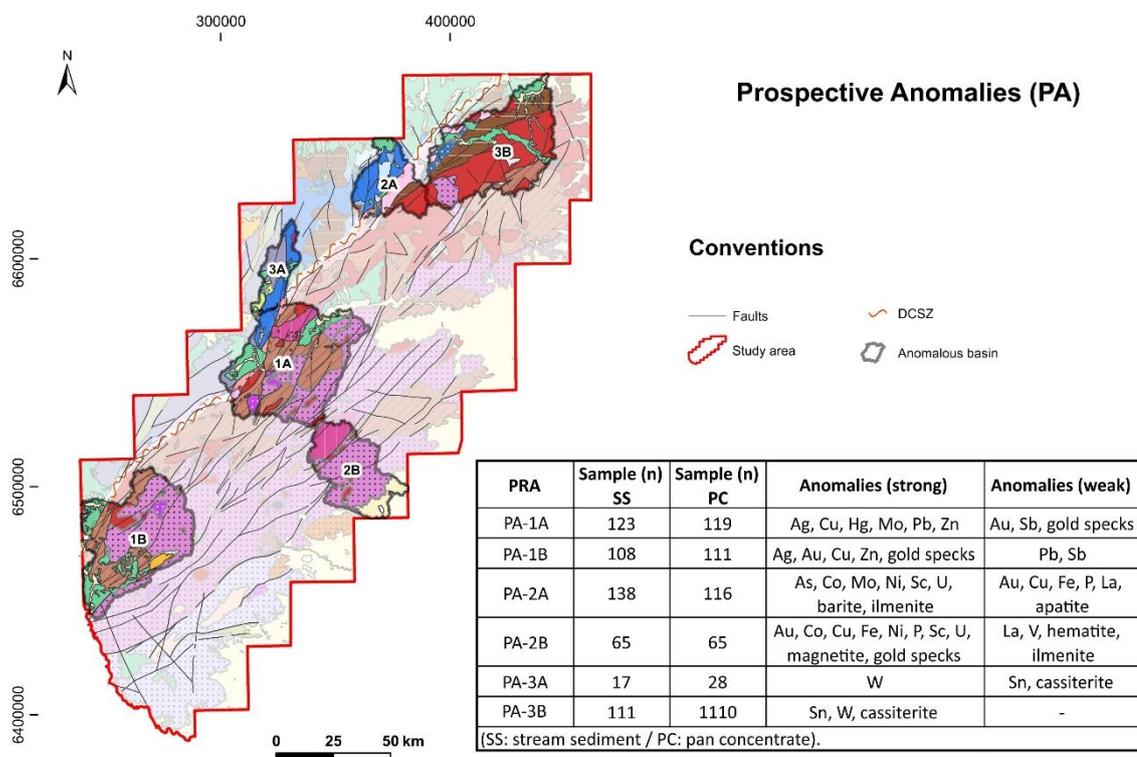


Figure 6: Prospective anomalies map showing geology information (legend in figure1). Table inserted summarizes the data for each PA

### 3.4.1. Porphyry-epithermal

For the Porphyry-epithermal deposit, two main anomalous areas were identified: one in the centre-west portion of the polygon (PA-1A), near to the Canguçu city, and another in the southeast portion (PRA-1B), in the vicinities of the Pinheiro Machado city.

The anomalous basin PA-1A (Fig. 7) occupied an area with approximately 2177 km<sup>2</sup> and had 123 samples stations of stream sediment and 119 of pan concentrate. This anomalous area was coincident with the statistical anomaly PSA-04. The relation with a porphyry-epithermal signature was complete in this basin. Among the eight selected elements, six presented high degree of anomaly (Ag, Cu, Hg, Mo, Pb and Zn) and two occurred as subordinates anomalies (Au, Sb). The results that can be highlighted include: (1) the Ag that was anomalous in 35 samples; (2) the As that showed two samples with the highest values from all studied area (10 and 23.6 ppm each); (3) the

Cu that also showed the highest values from all studied area (161.3 ppm); and (4) the Pb that had two of the five highest values from all the polygon (up to 105.5 ppm). Regarding the pan concentrate results, the only fingerprint observed was gold, but not very relevant.

The anomalous basin that represents the PA-1B (Fig. 7) occupied 1924 km<sup>2</sup> and had 108 and 111 analysed samples from stream sediment samples and pan concentrate, respectively. The area of this basin coincided roughly with the statistical anomaly PSA-2. The PA-1B has a minor number of anomalous samples when compared to PA-1A area and less variety of porphyry-epithermal typical elements than the PA-1A. Between them, Ag (14 anomalous samples), Au (7 anomalous samples), Cu (12 anomalous samples) and Zn (8 anomalous samples) were highlighted. Two samples showed the highest values of Ag from all studied area (with 1215 ppb and 5777 ppb each). Although occurring in low levels in the PA-1B, gold was anomalous in 7 stream sediment samples and in four pan concentrate stations. Copper was also found in a significant way in the basin, presenting two of the five highest sample values of this element in the project (up to 120.7 ppm). Zinc was also meaningful (up to 121.2 ppm). Pb and Sb showed subordinated anomalies, and anomalous values of Hg and Mo were absent.

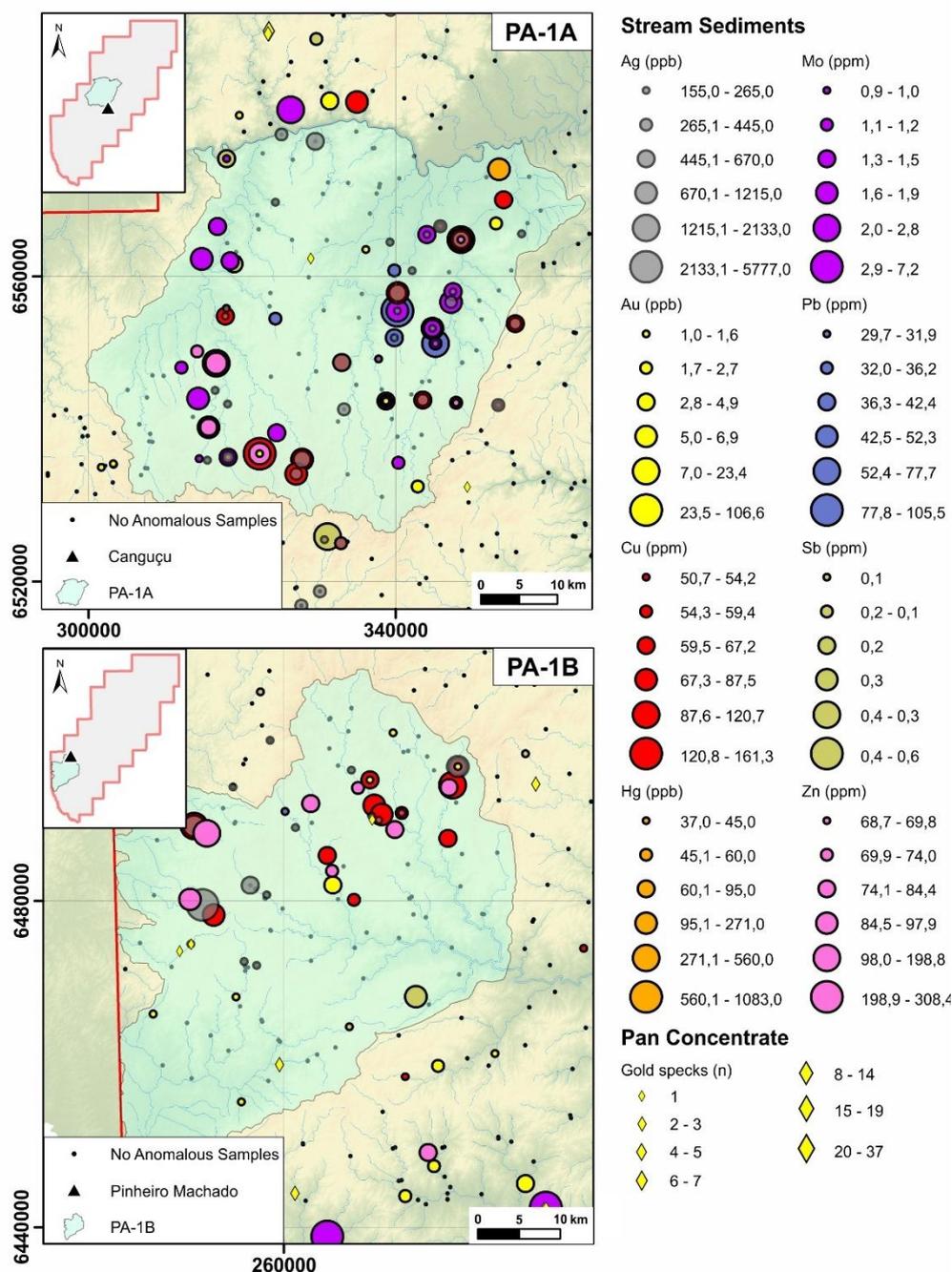


Figure 7: Anomalous basins (PA-1A and PA-1B) considered as holding a porphyry-epithermal signature.

### 3.4.2. IOCG

Considering the IOCG deposit, two anomalous areas were defined: PA-2A, localized at the northwest area of the study polygon, near the Encruzilhada do Sul city, and PA-2B at the southeast, near the Morro Redondo city.

The basin that characterized the prospective anomaly PA-2A (Fig. 8) had 720 km<sup>2</sup> of area and fully coincides with the purely statistical anomaly PSA-7. From the 138

stream sediment samples studied in this basin, anomalies of As, Co, Mo, Ni and U were highlighted. The As presented two of the five highest values in the whole polygon (10 and 23.6 ppm respectively), the Cot had the highest value (26.4 ppm) and Mo also had the higher concentrations (2.8 and 7.1 ppm each) in comparison to other anomalous samples. Gold anomaly was only subordinated in two stream sediment samples above the threshold and in two positive pan concentrate samples. The other IOCG selected elements occurred in a subordinate way. Copper and iron had only one anomalous sample each. From the 116 pan concentrate samples, barite was the only interest mineral that showed some relevance. Hematite and magnetite were not anomalous in this basin.

The anomalous basin that represents the PA-2B had an area of 1028 km<sup>2</sup> and coincided with the purely statistical anomaly PSA-3. In this basin, 65 stream sediment and pan concentrate samples were analysed, and demonstrated significant Au, Co, Cu, Fe, Ni and U anomalies. Cobalt had the second highest anomalous sample found in all polygon (26.1 ppm) and nickel had the third highest value (46.1 ppm) from all studied area. No samples had As and Mo above the *threshold*. In the pan concentrate data, gold and the iron oxides (hematite and magnetite) were relevant. The most important gold anomaly observed in the study was found in this basin. In this area, 17 gold anomalous samples were found compared to the 91 anomalous samples found in all polygon. From these 17 gold anomalous samples, five had the highest number of gold specks found in the polygon, varying from 14 to 37 particles. Besides that, it is important to point out that the station with the highest number of gold specks (37 grains) was coincident with the highest value of gold in the stream sediment data (106.6 ppm).

Magnetite anomaly occurred in 11 samples and was another feature that needed to be highlighted. Hematite was anomalous in just one sample.

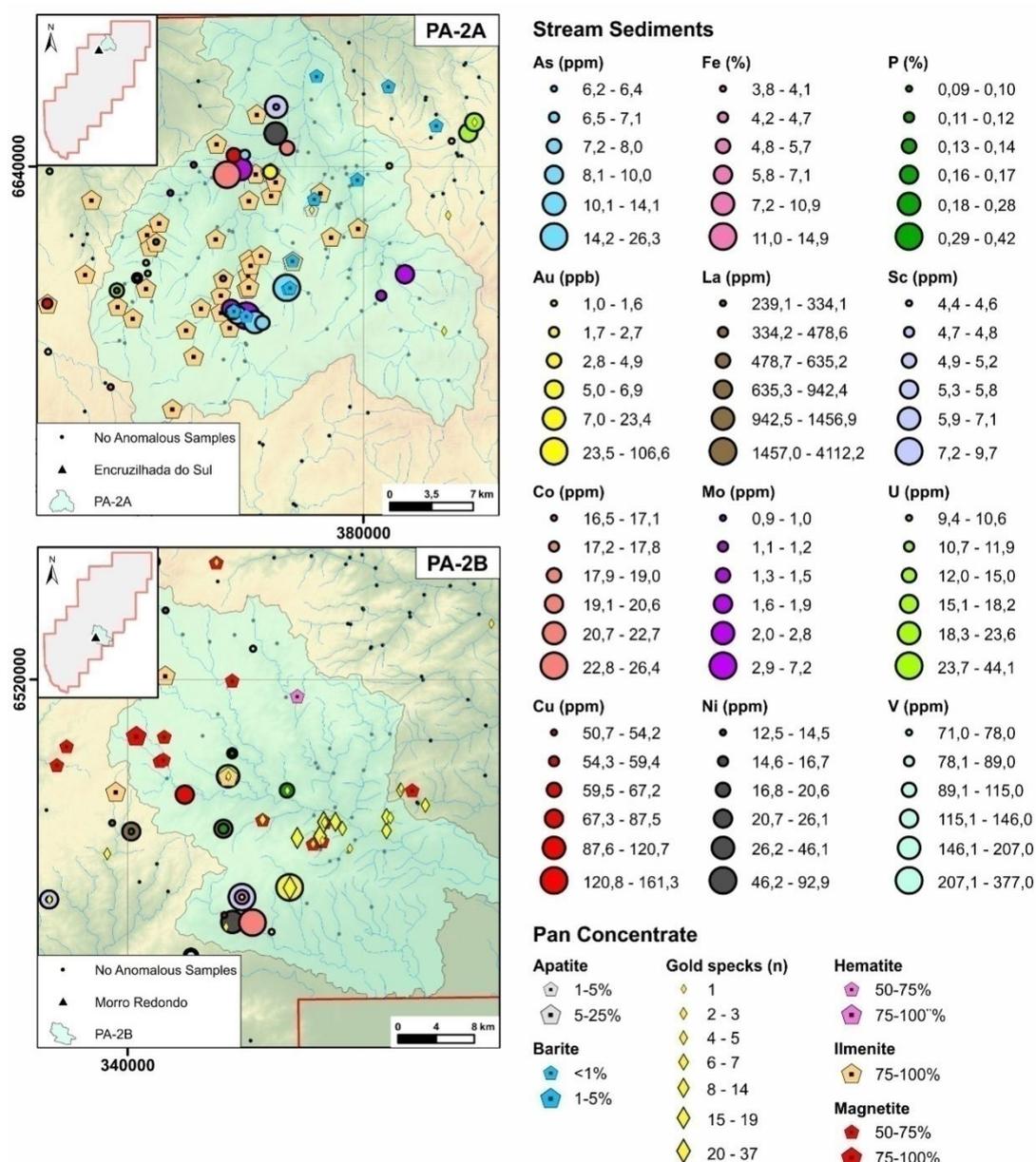


Figure 8: Anomalous basins (PA-2A and PA-2B) considered as holding an IOCG signature.

### 3.4.3. Stanniferous Granite Deposits

The stanniferous granite deposits signature was observed in two areas: the PA-3A area, situated in the northwest limit of the studied polygon, near the Santana da Boa Vista city, and the PA-3B situated in the north of the studied area, near the Barão do Triunfo city.

The basin that characterized the PA-3A appeared in a 399 km<sup>2</sup> delimited area, which partially corresponded of the statistical anomaly PSA-6. In this basin, the data of 17 stream sediment samples were analysed. Only a few anomalous samples were found, nevertheless with high values. These data revealed a high tungsten anomaly,

represented by five anomalous samples, in which one revealed a 6.7 ppm value, the highest value of all studied polygon. On the other hand, tin was only a subordinate anomaly, with only one sample. The pan concentrate data were represented by 28 samples, five with cassiterite and none of them with wolframite.

The PA-3B had a 1935 km<sup>2</sup> total area and corresponded entirely with the PSA-8 statistical anomaly area. 111 stream sediment (SS) and 110 pan concentrate (PC) samples were studied and revealed Sn and cassiterite anomalies. The Sn anomalies were constituted by 7 anomalous samples with values that reached up to 14.1 ppm. Cassiterite was considered anomalous in 55 samples, in four classes intervals. 14 of them were classified in the highest-class range, the maximum concentration found in all studied polygon. Tungsten was anomalous in 17 samples, but its values were relatively low (up to 0.7 ppm). The pan concentrate data did not reveal the presence of wolframite.

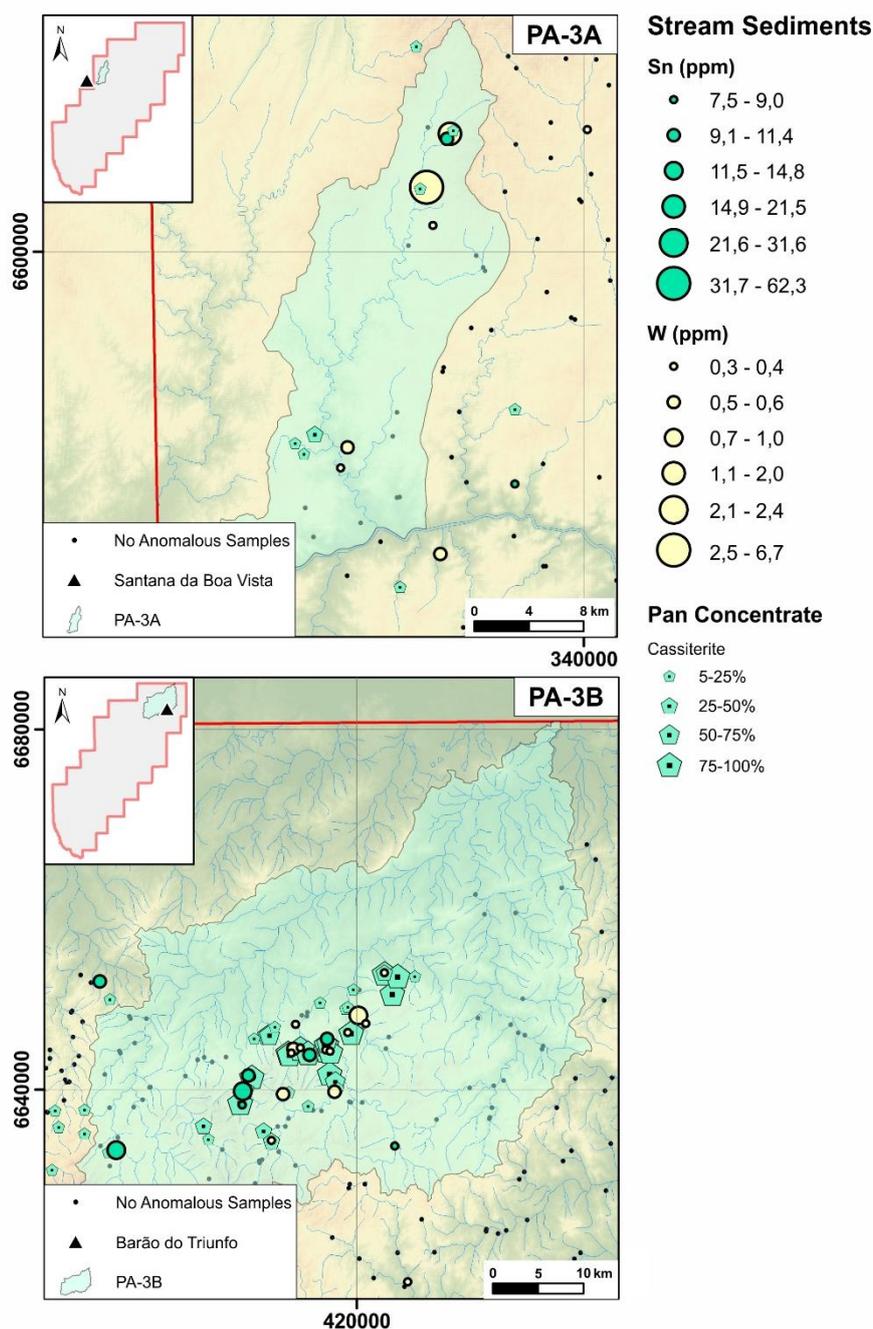


Figure 9: Anomalous basins (PA-3A and PA-3B) considered as holding a stanniferous granite deposits signature.

#### 4. Discussion

The results of the PSA, which were based in a purely statistical method, did not reflect a clear relation between the geochemical data and the geologic/metallogenic associations. Thus, the induced prospective anomalies provided more direct information when the geochemical signature and minerals/substances fingerprints of each mineral deposit were considered. The comparison between the results obtained

from purely statistical method (PSA) and those revealed after inducing a geological scenario (PA) showed that many of the PSA anomalies are coincident with the PA anomalies. This coincidence supported the interpretation that the prospective anomalies were robust. The prospective anomalies disclosed six potential areas, two for porphyry-epithermal deposits, two for IOCG deposits and two for stanniferous granite deposits.

#### **4.1. Porphyry-epithermal system signature**

Many of the world-class porphyry deposits found in the American continent, extend from the North America cordillera to the South America cordillera, including the greater Cu-Au-Mo- porphyry deposit situated in Chile (Valencia-Moreno et al., 2006). Generally, the epithermal and porphyry deposits occur associated to arc-related volcanic and plutonic rocks adjacent to subduction zones. The eastern portion of the Rio Grande do Sul's Shield is mainly composed by different types of granites, remnants of a Neoproterozoic magmatism, some of them considered as intruded in shallow depths. The geochemical and mineral/substance association Ag, Au, Cu, Hg, Mo, Pb, Sb, Zn, barite and gold specks (Carlile et al., 1998; Eppinger et al., 2013) are considered as suggestive of porphyry-epithermal potential and were pointed in two studied areas (PA-1A and PA-1B). The PA-1A exhibited positive anomaly results for all the stream selected sediment elements. Small gold particles were observed in the pan concentrate. However, in the PA-1B area, gold specks occurred in greater quantity. In relation to the stream sediments, significant anomalies were only identified for Ag, Au, Cu, and Zn elements, with subordinate Pb and Sb.

The prospective anomaly PA-1A showed a strong association between Ag-Cu-Mo-Pb-Zn, which pointed to a correlation with porphyry deposits (cf. Jones, 1992). The background values of the considered elements were similar to those observed in granitic rocks of the Domeyko Cordillera in Chile, an important porphyry deposits host terrain (Cáceres, 2008). The PA-1B relevance must probably be restricted to the epithermal type deposit, considering that Au, Ag and Zn (White and Hedenquist, 1995) were important elements in this system.

The geological context of these two anomalous areas reveals that they are concentrate in a preferential NE-SW direction alignment, where the rocks of the Dom Feliciano Granitic Suite (Serra do Herval Facies and Cerro Grande Facies) occur. These lithologies are the same that outcrop in the Galena Mine area, first identified

occurrence of a mineralization with epithermal characteristics in the east portion of the Rio Grande do Sul's Shield (Rost, 2006; Henrichs et al., 2011). The Galena Mine area is positioned in the continuity of the PA-1A anomaly, to NE. In addition, the NE-SW trend is also the same direction that controls the individual anomalies of Zn, Pb and Hg (Fig.3).

The PA-1A is here considered as the best target if a porphyry-epithermal system is the focus of a mineral exploration in the studied area. The preferential NE-SW trend observed is a relevant information, considering that the structural continuity connecting metallogenetic belts is also one characteristic of porphyry-epithermal systems (Mpodozis and Kay, 2003; Vilella Olavarría and Araya, 2016).

#### **4.2. Iron Oxide Copper-Gold Signature**

The first IOCG provinces described worldwide were Proterozoic, however the age of this type of deposits can vary from the Archean to the Cenozoic (Williams et al., 2005; Groves et al., 2010). In Brazil, the best-known world-class IOCG deposit is the Archean Salobo in the Carajás Province (Requia et al., 2003).

The geochemical signature and pathfinders minerals/substances considered to be related to IOCG deposits are As, Au, Co, Cu, Fe, La, Mo, Ni, P, Sc, U, V, apatite, barite, hematite, ilmenite and magnetite minerals together with gold specks (Williams et al., 2005). When this combination of elements and minerals/substances were used, two anomalous areas, the PA-2A and PA-2B, could be highlighted

The PA-2A showed a large quantity of anomalous elements. Six (As, Co, Mo, Ni, Sc and U) exhibited a strong anomaly and were associated to the presence of ilmenite and barite, which are common alteration minerals in IOCG deposits (Ehrig et al., 2013; Case et al., 2015). On the other hand, the iron oxides hematite and magnetite, typical in IOCG deposits, were not observed as anomalies in this area.

The PA-2B stream sediment data exhibited just a few samples with anomalous values. Nevertheless, they showed high Au, Co, Cu, Fe, Ni, P, Sc and U combined with a strong concentration of magnetite suggestive of an IOCG signature. One of the most relevant findings of the CPRM geochemical survey at the Dom Feliciano Belt was the strong gold anomaly found in this basin. This anomaly occurred in both stream sediments and pan concentrate and coincided with the IOCG signature. This

coincidence points out that the prospective anomaly PA-2B would be the most relevant target to be addressed in future works.

In opposition to the Carajás IOCG deposits, the PA-2A and PA-2B targets found in this study are situated in younger rocks, with Neoproterozoic age (630 - 550 Ma). On the other hand, some similarities with the Carajás deposits can be highlighted, such as the anomalous elements and minerals, and the structural context of these areas. It is important to notice that the PA-2A basin shows anomalies of Au, Co, Cu, Fe, Ni, P, U and La together with the intense presence of magnetite and hematite, which is analogous to the Carajás deposits (Monteiro et al., 2008a, b).

The PA-2A basin presented less intense and less significant mineralogical similarities than the PA-2B in relation to Carajás deposits. However, some anomalous elements such as Co, Mo and Ni and subordinately Au, Cu, Fe, P and La can be considered as similar to signatures observed in Carajás IOCG deposits. Nevertheless, the iron oxides hematite and magnetite did not present any anomaly. The structural context where this anomaly occurred is represented by a major regional shear zone (DCSZ), resembling the structural context of the Carajás deposits where important faults contribute to develop mineralized zones (Figure 6).

At the IOCG deposits of Carajás there is a group of mafic rocks considered to have a direct relation with the mineralization (Williams et al., 2005; Monteiro et al., 2008; Tornos Arroyo et al., 2007). In the eastern part of the Sul-Riograndense shield, 25 km to southeast of the PA-2B anomalous area, a small mafic body, denominated Passo da Fabiana gabbro, occurs and may have a relation with the identified anomaly, but requires further studies.

### **4.3. Stanniferous granite signature**

The Brazilian states Rondônia and Rio Grande do Sul host important stanniferous granite deposits. In Rondônia, the deposits are located in southwestern Amazonian craton, in Paleoproterozoic to Neoproterozoic rocks (Bettencourt, 1999). In Rio Grande do Sul State, the Encruzilhada do Sul stanniferous Districts was related to Neoproterozoic (Frantz et al., 2003). In both deposits, the tin mineralization was related to peraluminous granite originated from crustal fusion (Leite Junior, 2002; Frantz et al., 2003).

The tin mineralization in Rio Grande do Sul State is related to two kinds of granitic rocks controlled by transcurrent shear zones (Frantz, 1997; Frantz et al., 1998). The first is a two mica leucogranite sin to tardi-kinematic of the Cordilheira Intrusive Suite, which have pervasive micaceous and tourmaline hydrothermal alteration (Frantz et al., 1998). The second is represented by the tardi to post-kinematics biotite granitoids of the Campinas Intrusive Suite, which presents micaceous hydrothermal alteration limited to its cupola (Frantz et al., 1998).

The assessment for areas with strong potential to host stanniferous granite deposits was based on the simple association of Sn-W elements added to the presence of cassiterite (Skirrow et al., 2013). Two areas revealed this signature, the PA-3A and PA-3B.

The prospective anomaly PA-3A exhibited anomalous samples with a predominance of W in relation to Sn. This basin presented the highest value of tungsten from all studied polygon. Two anomalous samples containing cassiterite were also recognized. Here, the Granito Campinas and the Figueira Facies units, that belong to the Campinas Intrusive Suite, out crop and can be indicated as contributing to the tungsten and cassiterite anomalies observed.

The prospective anomaly PA-3B showed also a predominance of tungsten in comparison to Sn in the stream sediment data. Cassiterite occurred frequently and was considered anomalous in 55 samples. Therefore, is possible to assure that the PA-3B is the most relevant area to find stanniferous granite deposits. Regarding lithologies in this area, granites from the Cordilheira Intrusive Suite out croups and can be considered as linked to the high cassiterite occurrences.

Despite no new areas of tin mineralization in the Rio Grande do Sul's Shield were identified, the geochemical anomalies found in this well-known tin district contribute to endorse the methodology applied in this study.

## **5. Conclusions**

1. The statistical analysis and geoprocessing using the data provided by the Geological Survey of Brazil (CPRM) after the geochemical survey titled "Prospecting in Dom Feliciano Belt" pointed out six potential areas for mineral exploration in the Dom Feliciano Eastern Belt.

2. The search for prospective anomalies by the induction of specific elements and minerals proved to be an effective technic to discover potential areas to host porphyry-epithermal, IOCG and stanniferous granite deposits.
3. The search for porphyry-epithermal signatures resulted in the PA-1A and PA-1B anomalies. The PA-1A presented the highest number of anomalous samples. It is important to notice that these areas occurred in a NE-SW trend and over the Dom Feliciano Granitic Suite rocks (Cerro Grande and Serra do Herval facies). Such features also occur in the Galena Mine area previously interpreted as related to an epithermal context (Henrichs et. al., 2011), which reinforces the potential of these areas to host porphyry-epithermal deposits.
4. The anomalies found when an IOCG deposit signature was considered revealed two potential areas. The most relevant was the PA-2B, which presented a high amount of anomalous elements and minerals, and showed the highest concentrations of gold in both stream sediments and pan concentrates data.
5. The prospective anomalies PA-3A and PA-3B were expected, since crustal melting granites (two mica granite) occur in these areas and host well-known cassiterite deposits in the Rio Grande do Sul's shield. The fact that anomalies were found in these areas helped to consider the employed methodology as successful.

The results of this regional scale geochemical study revealed new anomalous areas in the Rio Grande do Sul's shield with an interesting potential for future exploration. Considering the geological context, it is possible to point out a green field for IOCG type of deposits, especially in the area nearby PA-2B at Morro Redondo city.

## 6. References

- Bettencourt, J.S., Tosdal, R.M., Leite, W.B., Payolla, B.L., 1999. Mesoproterozoic rapakivi granites of the Rondônia Tin Province, southwestern border of the Amazonian craton, Brazil—I. Reconnaissance U–Pb geochronology and regional implications. *Precambrian Research*, 95(1-2), 41-67.
- Cáceres Vegas, D.H., 2008. Exploración Geológica y Geoquímica del Prospecto de Cobre Texas, Cordillera de Domeyko, II Región, Chile. Memoria para optar al título de Geólogo, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 84 pp. Retrieved from: [http://www.tesis.uchile.cl/tesis/uchile/2008/caceres\\_d/sources/caceres\\_d.pdf](http://www.tesis.uchile.cl/tesis/uchile/2008/caceres_d/sources/caceres_d.pdf)
- Camprubí, A., Albinson, T., 2006. Depósitos epitermales en México-Actualización de su conocimiento y reclasificación empírica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 58(1), 27-81.
- Carlile, J.C., Davey, G.R., Kadir, I., Langmead, R. P., Rafferty, W. J., 1998. Discovery and exploration of the Gosowong epithermal gold deposit, Halmahera, Indonesia. *Journal of Geochemical Exploration*, 60(3), 207-227.
- Case, G., Chang, Z., Huizenga, J.M., Lilly, R., Blenkinsop, T., 2015. The evolution and potential sources of mineralizing fluids of the E1 group of IOCG deposits, Cloncurry District, Northwest Queensland, Australia: implications from fluid inclusion and SHRIMP S isotope analyses. In: Abstracts from SEG 2015 Conference. From: SEG 2015: World-Class Ore Deposits: discovery to recovery, pp. 27-30.
- Chemale Jr, F., 2000. Evolução geológica do Escudo Sul-rio-grandense. *Geologia do Rio Grande do Sul*. In: M. Holz and L.F. De Ros (eds.) *Geologia do Rio Grandedo Sul*. CIGO-UFRGS, pp. 13-52.
- Costa, J.F., Koppe, J.C., 1999. Assessing uncertainty associated with the delineation of geochemical anomalies. *Natural Resources Research*, 8(1), 59-67.
- Cox, D.P., Singer, D.A., 1992. Grade and tonnage model of distal disseminated Ag-Au. *Developments in mineral deposit modeling: US Geological Survey Bulletin*, 2004, 20-22.
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Prospecção no cinturão Dom Feliciano. 2010 In: *Geobank: geoquímica, sedimentos de corrente*. Salvador: CPRM, 2010. Retrieved from: [http://geobank.cprm.gov.br/pls/publico/geoquimica.consulta\\_geoquimica.Cons\\_g eoq](http://geobank.cprm.gov.br/pls/publico/geoquimica.consulta_geoquimica.Cons_g eoq).

- Ehrig, K., McPhie, J., and Kamenetsky, V., 2013. Geology and mineralogical zonation of the Olympic Dam iron oxide Cu-U-Au-Ag deposit, South Australia. *Society of Economic Geologists Special Publication*, 16, 237-268.
- Eppinger, R.G., Fey, D.L., Giles, S.A., Grunsky, E.C., Kelley, K.D., Minsley, B.J., Smith, S.M., 2013. Summary of exploration geochemical and mineralogical studies at the giant Pebble porphyry Cu-Au-Mo deposit, Alaska: Implications for exploration under cover. *Economic Geology*, 108(3), 495-527.
- Fernandes, L.A.D., Menegat, R., Costa, A.F.U., Koester, E., Porcher, C.C., Tommasi, A., Camozzato, E., 1995. Evolução tectônica do cinturão Dom Feliciano no Escudo Sul-rio-grandense: Parte I - uma contribuição a partir do registro geológico. *Brazilian Journal of Geology*, 25(4), 351-374.
- Frantz, J.C. 1997. Petrologia e Hidrotermalismo dos Granitóides Estaníferos do Rio Grande do Sul. Ph.D. Thesis. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 264 pp.
- Frantz, J.C., Botelho, N.F., 1997. Os Granitóides Estaníferos do Rio Grande do Sul, Zonas de Cisalhamento Transcorrente e Geração de Greisen Estruturalmente Controlados. In: SBG/ Núcleo Brasília/ IG-UnB, Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos, VI, Pirenópolis, Anais, 313-315
- Frantz, J.C., Coelho, C.E., Botelho, N.F., 1998. Gênese e evolução dos fluidos envolvidos na alteração hidrotermal e na mineralização de estanho dos granitos do Rio Grande do Sul. *Brazilian Journal of Geology*, 28(3), 301-306.
- Frantz, J.C., & Botelho, N.F., 2000. Neoproterozoic granitic magmatism and evolution of the eastern Dom Feliciano Belt in southernmost Brazil: a tectonic model. *Gondwana Research*, 3(1), 7-19.
- Frantz, J.C., McNaughton, N.J., Marques, J.C., Hartmann, L.A., Botelho, N.F., Caravaca, G., 2003. SHRIMP U-Pb zircon ages of granitoids from southernmost Brazil: constrains on the temporal evolution of the Dorsal de Canguçu transcurrent Shear Zone and Eastern Dom Feliciano Belt. In: SBG, South American Symposium on Isotope Geology, IV, Short Papers, Salvador, 1, 174-177
- Groves, D.I., Bierlein, F.P., Meinert, L.D., Hitzman, M.W., 2010. Iron oxide copper-gold (IOCG) deposits through Earth history: Implications for origin, lithospheric setting, and distinction from other epigenetic iron oxide deposits. *Economic Geology*, 105(3), 641-654.
- Henrichs, I.A., Marques, J.C., Frantz, J.C., 2011. Paragênese epitermal da Mina Galena, Cinturão Dom Feliciano Leste, Amaral Ferrador-RS. In: XIII Congresso

- Brasileiro de Geoquímica, Anais do XIII Congresso Brasileiro de Geoquímica, p. 1469-1472.
- Henrichs, I.A., 2010. Caracterização do sistema hidrotermal da Mina-Galena, Amaral Ferrador–RS. Porto Alegre: IGEO-UFRGS, 66 pp.
- Jones, B.K., 1992. Application of metal zoning to gold exploration in porphyry copper systems. *Journal of Geochemical Exploration*, 43(2), 127-155.
- Jost, H., Frantz, J.C., Lindenmayer, Z.G., 2007. Assinatura Geoquímica de Depósitos Minerais Metálicos e Não-Metálicos. In: Licht, O.A.B, De Mello, C.S.B. e Da Silva, C.R. (eds.) *Prospecção Geoquímica–Depósitos minerais metálicos, não-metálicos, óleo e gás*. CPRM. Editora Planeta Terra, 153-172.
- Knust, S.S.A., Eberhardt, D.B., 2011. Geoquímica Prospectiva da Folha Porto dos Gaúchos, Noroeste do Estado de Mato Grosso. In: XIII Congresso Brasileiro de Geoquímica, III Simpósio de Geoquímica dos Países do Mercosul, p. 1797-1800.
- Lehmann, B., Mahawat, C., 1989. Metallogeny of tin in central Thailand: a genetic concept. *Geology*, 17(5), 426-429.
- Leinz, V., Pinagel, H., 1945. Estanho e tungstênio no Rio Grande do Sul. *Boletim da Divisão de Fomento a Produção Mineral*. DNPM, 70,1-80.
- Leite Junior, W. B., 2002. A Suíte Intrusiva Santa Clara (RO) e a mineralização primária polimetálica (Sn, w, Nb, Ta, Zn, Cu, Pb) associada. Ph.D. Thesis. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 337 pp.
- Levinson, A.A., 1974. *Introduction to exploration geochemistry*. Calgary: Applied Publishing.
- Lima, A., De Vivo, B., Cicchella, D., Cortini, M., Albanese, S., 2003. Multifractal IDW interpolation and fractal filtering method in environmental studies: an application on regional stream sediments of (Italy), Campania region. *Applied Geochemistry*, 18(12), 1853-1865.
- Mattoso, S.Q., Formoso, M.L.L., 2007. Princípios Básicos para Prospecção Geoquímica. In: Licht, O.A.B, De Mello, C.S.B. e Da Silva, C.R. (eds.). *Prospecção Geoquímica – Depósitos minerais metálicos, não-metálicos, óleo e gás*. CPRM. Editora Planeta Terra, 97-152.
- Mpodozis, C., Kay, S.M., 2003. Neogene tectonics, ages and mineralization along the transition zone between the El Indio and Maricunga mineral belts (Argentina and Chile 28–29°) [abs.]. In *Congreso Geológico Chileno, 10th*, Universidad de Concepción, Concepción, Chile.

- Monteiro, L.V.S., Xavier, R.P., Hitzman, M.W., Juliani, C., de Souza Filho, C.R., Carvalho, E.D.R., 2008a. Mineral chemistry of ore and hydrothermal alteration at the Sossego iron oxide–copper–gold deposit, Carajás Mineral Province, Brazil. *Ore Geology Reviews*, 34(3), 317-336.
- Monteiro, L.V.S., Xavier, R.P., Carvalho, E.R., Hitzman, M.W., Johnson, C.A., Souza Filho, C.R., Torresi, I., 2008b. The Sossego iron oxide-copper-gold deposit, Carajas Mineral Province, Brazil: hydrothermal alteration paragenesis and stable Isotope constraints on the system evolution. *Mineralium Deposita*, 43:129–159.
- Orris, G.J., 1998. Additional descriptive models of industrial mineral deposits (No. 98-505). US Geological Survey, 49 pp.
- Orris, G.J., Bliss, J.D., 1991. Some industrial mineral deposit models: descriptive deposit models. US Geological Survey, 16 pp.
- Philipp, R.P., Machado, R., Nardi, L.V.S., Lafon, J.M., 2008. O magmatismo granítico Neoproterozóico do Batólito Pelotas no sul do Brasil: novos dados e revisão da geocronologia regional. *Brazilian Journal of Geology*, 32(2), 277-290.
- Rattenbury, M., and Partington, G. A., 2003, Prospectivity models and GIS data for the exploration of epithermal gold mineralisation in New Zealand: In *Epithermal Gold in New Zealand GIS Data Package and Prospectivity Modelling*, Crown Minerals, Ministry of Commerce, New Zealand, 68 pp.
- Requia, K., Stein, H., Fontboté, L., & Chiaradia, M., 2003. Re–Os and Pb–Pb geochronology of the Archean Salobo iron oxide copper–gold deposit, Carajás mineral province, northern Brazil. *Mineralium Deposita*, 38(6), 727-738.
- Rost, M.C., 2006. Mapeamento estrutural do paleoambiente hidrotermal de Amaral Ferrador-RS. Salão de Iniciação Científica. Livro de resumos. Porto Alegre: UFRGS, 2006.
- Silveira, F.V., Larizatti, J.H., de Brito, R.S., Abram, M.B., Bahiaenses, I.C., 2011. Geoquímica prospectiva aplicada em projetos da CPRM executados pelo departamento de recursos minerais-Derem. In: XIII Congresso Brasileiro de Geoquímica, III Simpósio de Geoquímica dos Países do Mercosul, pp. 1761-1764
- Skirrow, R.G., Huston, D.L., Mernagh, T.P., Thorne, J.P., Dulfer, H., & Senior, A.B. 2013. Critical commodities for a high-tech world: Australia's potential to supply global demand. *Geoscience Australia*, Canberra, 118 pp.
- Teixeira, R.D.S., Frantz, J.C., Mexias, A.S., Marques, J.C., & Costa, J.A., 2007. Caracterização da alteração hidrotermal micácea do tipo greisen e dos reequilíbrios de baixa temperatura em áreas graníticas: o exemplo do Distrito

- Estanífero de Encruzilhada do Sul, RS. Pesquisas em Geociências. Porto Alegre, RS. Vol. 34, n. 2 (2007), pp. 75-87.
- Tornos Arroyo, F., Carriedo, J., Velasco Roldán, F., Galindo Francisco, M., & Casquet, C., 2007. The relationship between large deep mafic sills, crustal contamination and the formation of Ni-(Cu) and IOCG deposits. Proceedings of the Ninth Biennial SGA Meeting, pp. 975-978
- Valencia-Moreno, M., Landin, L.O., Alcántara, B.N., Gómez, J.R., Segura, E.P., 2006. Características metalogenéticas de los depósitos de tipo pórfido cuprífero en México y su situación en el contexto mundial. Boletín de la sociedad geológica Mexicana, 58(1), 1-26.
- Villela Olavarría, D.C., Araya, J.C., 2016. Franjas metalogénicas de los Andes Centrales: blancos clave para la exploración minera. Comisión Chilena del Cobre. 61 pp.
- White, N.C., Hedenquist, J.W., 1995. Epithermal gold deposits: styles, characteristics and exploration. SEG newsletter, 23(1), 9-13.
- Wildner, W., Ramgrab, G. E., Lopes, R. D., Iglesias, C. D. F., 2008. Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: CPRM. Escala 1:1.750.000.
- Williams, P.J., Barton, M.D., Johnson, D.A., Fontboté, L., De Haller, A., Mark, G., Oliver, N.H.S., Marschik, R., 2005. Iron oxide copper-gold deposits: Geology, space-time distribution, and possible modes of origin. Economic Geology, 371-405.
- Zheng, Y., Sun, X., Gao, S., Wang, C., Zhao, Z., Wu, S., Wu, X., 2014. Analysis of stream sediment data for exploring the Zhunuo porphyry Cu deposit, southern Tibet. Journal of Geochemical Exploration, 143, 19-30.