



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA E GEOQUÍMICA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 629

**VETORIZAÇÃO GEOQUÍMICA, CARACTERIZAÇÃO E
MODELAMENTO 3D DE ALTERAÇÕES HIDROTERMAIS
EM SISTEMAS CUPRO-AURÍFEROS: EXEMPLO DO
COMPLEXO SOSSEGO (PA), PROVÍNCIA MINERAL DE
CARAJÁS**

Dissertação apresentada por:

**ANTÔNIO FABRÍCIO FRANCO DOS SANTOS
Orientador: Prof. Carlos Marcello Dias Fernandes (UFPA)**

**BELÉM-PARÁ
2023**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

S237v Santos, Antonio Fabricio Franco dos.

Vetorização geoquímica, caracterização e modelamento 3D de alterações hidrotermais em sistemas cupro-auríferos: exemplo do Complexo Sossego (PA), Província Mineral de Carajás/ Antônio Fabricio Franco dos Santos. — 2023.

xviii, 125 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Carlos Marcello Dias Fernandes

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Belém, 2023.

1. Depósitos do tipo IOCG. 2. Unidades litogeoquímicas. 3. Beneficiamento de minério. 4. Arqueano. 5. Cráton Amazônico. I. Título.

CDD 622.1015195



Universidade Federal do Pará
Instituto de Geociências
Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica

**VETORIZAÇÃO GEOQUÍMICA, CARACTERIZAÇÃO E
MODELAMENTO 3D DE ALTERAÇÕES HIDROTERMAIS
EM SISTEMAS CUPRO-AURÍFEROS: EXEMPLO DO
COMPLEXO SOSSEGO (PA), PROVÍNCIA MINERAL DE
CARAJÁS**

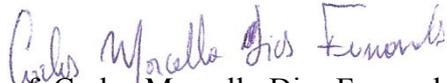
Dissertação apresentada por

ANTÔNIO FABRÍCIO FRANCO DOS SANTOS

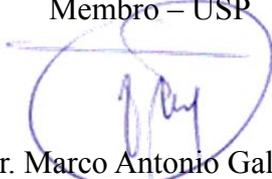
Como requisito parcial à obtenção do Grau de Mestre em Ciências na Área de
GEOQUÍMICA e Linha de pesquisa EVOLUÇÃO CRUSTAL E METALOGÊNESE

Data de Aprovação: 18 / 04 / 2023

Banca Examinadora:


Prof. Carlos Marcello Dias Fernandes
Orientador – UFPA


Prof.^a Dr.^a Lena Virgínia Soares Monteiro
Membro – USP


Prof. Dr. Marco Antonio Galarza Toro
Membro – UFPA

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, Ogum (São Jorge Guerreiro) e os espíritos de Luz que estão ao meu lado;

Meus Familiares, em especial a minha mãe Maria Luiza que sempre batalhou e incentivou para eu poder seguir nas lutas da vida e a minha esposa Belisa Barros que me acompanha, compreende e apoia nas jornadas diárias;

Aos meus filhos Antonio Pedro e Maria Flor, onde busco forças e razões para prosseguir;

Aos meus avós (em memória);

À empresa VALE S/A e aos gestores Cassio Diedrich e Marcos Alvim nos quais permitiram e proporcionaram a realização desse trabalho;

Aos colegas de trabalho Sandro Freitas, Benevides Aires, Petterson Barbosa, Rafael Sposito, Sormane Fogo e Valter Oliveira pelos apoios, ajudas e discussões geológicas;

Agradecer a Universidade Federal do Pará, ao Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica (PPGG) e ao professor Carlos Marcello Dias Fernandes por aceitar me supervisionar e orientar no desenvolvimento do projeto;

A todos que contribuíram de forma indireta para obtenção desse título.

RESUMO

O Complexo cupro-aurífero Sossego está localizado na porção sul da Província Mineral de Carajás, ao longo de uma zona de cisalhamento regional WNW-ESSE. O mesmo está dividido nos setores Pista, Sequeirinho/Baiano e Curral/Sossego. As principais litologias hospedeiras que ocorrem no complexo são granitoides, metavulcânicas félsicas, ultramáficas e intrusivas máficas. Esse trabalho envolveu a aplicação de técnicas estatísticas multivariadas para as definições de unidades geoquímicas e possíveis vetores químicos nos quais essas informações foram transformadas em modelos 3D com intuito de auxiliar nas interpretações geológicas, guias exploratórios e geometalurgia do complexo em relação às mineralizações. No geral, o uso das técnicas revelou boas correlações entre os dados químicos e as unidades geoquímicas propostas, que permitiram definir de forma coerente as unidades, principais elementos químicos e prováveis paragêneses minerais hidrotermais dos depósitos. Foram realizadas análises individualizadas e correlação de elementos selecionados em diagramas de probabilidade, histogramas, binários, ternários e Bloxplot, objetivando a identificação de características geoquímicas e suas relações com as associações mineralógicas. No setor Pista ocorrem ao menos cinco unidades geoquímicas (sódica, sódico-sílica, potássico-clorítica, magnésiana e feldspática potássica), onde se destacam as unidades com elevados conteúdos de sódio e sílica para zonas mais proximais ao minério. Os vetores geoquímicos nesse setor que predominam e podem ser consideradas como farejadores ou contaminantes com relação às zonas mineralizadas são As, Al, Ag, Hf, Sr, Te, Zr, Mo, Na, Pb, S, La, W e U, associados diretamente às unidades geoquímicas sódica-sílica e sódica. Os diagramas ternários demonstraram um possível indicador da paragênese, que compreende um vetor de uma fase inicial sódica evoluindo para potássica. No setor Sequeirinho/Baiano ocorrem nove unidades geoquímicas (sódica, sódico-sílica, sódico-férrica, sódico-cálcica, cálcico-férrica, férrica, magnésiana, potássico-clorítica e feldspática potássica) e é possível observar claramente as paragêneses geoquímicas que vão das porções mais distais até as proximais a mineralização. Nas porções distais dominam elevados conteúdos de sódio, passando gradativamente para valores medianos de sódio e cálcio, chegando a elevados conteúdos de ferro, cálcio e magnésio nas zonas proximais à mineralização, mostrando que as principais unidades geoquímicas associadas às mineralizações cupríferas de alto teor são cálcico-férrica e férrica. Os elementos Ag, As, Bi, Ca, Cd, Co, Fe, Ga, Ge, In, Ni, P, Pb, S, Se, Te e V (Mg, Mn, Re, Sb, Sn, Th e U secundários) foram considerados como principais vetores e estão diretamente associadas às mineralizações e

unidades cálcica-férrica e férrica. Os diagramas ternários do setor sugerem dois prováveis Trends de evoluções das alterações hidrotermais, ambos de estágios iniciais sódicos, porém um vetor indicando a evolução para um estágio sódico-férrico e outro vetor para um estágio sódico-cálcico e, posteriormente, cálcico-férrico. No setor Sossego/Curral existem sete unidades geoquímicas (sódica, sódico-sílica, sódico-potássica, potássica, clorítica, férrica e cálcica). Esse setor revelou complexas correlações entre o zonamento hidrotermal e as unidades geoquímicas, em função de suas feições geológicas (brechas, veios, vênulas e disseminações posteriores). Os gráficos demonstraram que as unidades geoquímicas que mais apresentam afinidade com zonas mineralizadas são clorítica, cálcica e férrica (zonas de brechas e/ou vênulas). Na unidade clorítica os vetores químicos que se destacam são Ag, Be, Bi, Ca, Ce, Cu, La, Mn, Mo, Ni, P e S (K, Al, Mg e Fe secundários). A unidade geoquímica férrica ocorre principalmente associada às zonas clorítica e cálcica, porém se diferencia pelos elevados teores de ferro (>15 % Fe) e seus principais vetores geoquímicos são As, Cd, Ce, Co, Fe, Ga, Ge, In, La, Re, S, Sb, Se, Sn, Te, U e Y (Ag, Be, Ca, Cs, Li, Mg, Mn, Mo e V secundários). A unidade cálcica corresponde a intervalos ricos principalmente em calcita, actinolita e epidoto de brechas e vênulas que seccionam as rochas cloritizadas e suas principais vetores geoquímicos são Al, Ca, Cr, Mn, Sc, Sr, V e Zn (Ag, As, Cd, Co, Fe, Ga, In, S, Se e Sr secundários). O provável vetor paragenético aponta para um estágio inicialmente sódico, evoluindo gradualmente para um estágio potássico e seguindo para uma evolução para estágio clorítico. Os modelamentos 3D implícitos implicaram na materialização espacial das unidades e vetores geoquímicos obtidos por meio dos resultados estatísticos desenvolvidos, demonstrando visualmente melhores entendimentos geológicos dos fluxos hidrotermais, suas prováveis paragêneses químicas/mineralógicas e correlações com as mineralizações. Esse trabalho irá contribuir futuramente para os entendimentos litológico, estrutural e geoquímico aplicados operacionalmente no Complexo Sossego, além de proporcionar dados para estudos geometalúrgicos. Esse trabalho pode beneficiar as operações das minas com a reduções direta e indireta dos custos, incremento de segurança, previsibilidade e melhores performances operacionais dos processos de beneficiamento do minério.

Palavras-chave: depósitos do tipo *IOCG*; unidades litogeoquímicas; beneficiamento de minério; Arqueano; Cráton Amazônico.

ABSTRACT

The copper-gold Sossego Complex, Pista, Sequeirinho/Baiano, and Curral/Sossego sectors, is in the southern portion of the Carajás Mineral Province, along with a WNW-ESSE regional shear zone. The main host lithologies that take place at the Complex are granitoids, felsic metavolcanic rocks, and mafic to ultramafic intrusive rocks. This work involved the application of multivariate statistical techniques to define geochemical units and vectors to help with geological interpretation, exploratory guides, and geometallurgy of the Complex concerning the mineralization. Overall, the use of those techniques revealed a good correlation between elemental data and the geochemical units proposed, which allowed coherently defining of the units, major elements, and probable hydrothermal mineralogical paragenesis for the deposits. Individual analyses and elemental correlation of chosen elements in probability diagrams, histograms, binary, ternary, and boxplots were carried out and aimed at identifying the geochemical features and their relation to the mineralogical association. At the Pista sector, at least five geochemical units occur (sodic, sodic-silica, potassic-chloritic, magnesian, and potassic feldspathic), where are highlighted the units with a higher concentration of sodium and silica for zones closer to the orebody. Geochemical vectors that predominate over this sector and that can be considered as trackers or contaminants about the ore zones are As, Al, Ag, Hf, Sr, Te, Zr, Mo, Na, Pb, S, La, W, and U, directly associated with sodic-silica and sodic geochemical units. Ternary diagrams have shown an indicator of paragenesis, which comprises a vector from an initial phase of sodic evolving to potassic. At Sequeirinho/Baiano sector, occur nine geochemical units (sodic, sodic-silica, sodic-ferric, sodic-calcic, calcic-ferric, ferric, magnesian, potassic-chloritic, and potassic feldspathic) in which the paragenesis is observed from the distal to the proximal zones concerning the orebody. Over distal zones, higher sodium concentration is observed, evolving to medium concentration of sodium and calcium, achieving high iron, calcium, and magnesium content nearby the mineralization, showing that the geochemical units related to the copper mineralization of high-grade are calcic-ferric and ferric. Elements such as Ag, As, Bi, Cd, Co, Fe, Ga, Ge, In, Ni, P, Pb, S, Se, Te, and V (secondary Ca, Mg, Mn, Re, Sb, Sn, Th, and U) were the main vectors directly associated with mineralization and calcic-ferric to ferric units. Ternary diagrams of this sector suggest two probable paragenesis vectors, both from initial stages of the sodic unit, although, one of them showed an evolution towards sodic-ferric and the other to a sodic-calcic stage and evolving to calcic-ferric unit afterward. In the Sossego/Curral sector occur seven geochemical units (sodic, sodic-silica,

sodic-potassic, potassic, chloritic, ferric, and calcic). This sector has revealed a complex correlation between hydrothermal zoning and geochemical units because of its geological features (breccias, veins, veinlets, and late dissemination). The graphics show that geochemical units that display an affinity with mineralized zones are chloritic, calcic, and ferric (breccia and vein zones). Over the chloritic unit, the highlighted elemental vectors are Ag, Be, Bi, Ca, Ce, Cu, La, Mn, Mo, Ni, P, and S (secondary K, Al, Mg, and Fe). Ferric geochemical unit happens mainly associated with chloritic and calcic zones, although it is not similar due to high iron concentration (>15% Fe), and the main geochemical vectors are As, Cd, Ce, Co, Fe, Ga, Ge, In, La, Re, S, Sb, Se, Sn, Te, U, and Y (secondary Ag, Be, Ca, Cs, Li, Mg, Mn, Mo, and V). The calcic unit corresponds to calcite, actinolite, and epidote-rich intervals in breccias and veinlets that cut chloritic rocks. Its main geochemical vectors are Al, Ca, Cr, Mn, Sc, Sr, V, and Zn (secondary Ag, As, Cd, Co, Fe, Ga, In, S, Se, and Sr). The probable paragenesis vector points to an initial sodic stage, evolving to a potassic stage followed by chloritic. Spatial materialization of the units and geochemical vector was made by 3D modeling obtained by statistical results that were developed, displaying a better visual geological understanding of hydrothermal flow, probable chemical/mineralogical paragenesis, and correlation with mineralization. This work will contribute in the future to the understanding of lithology, structural, and geochemistry of the Sossego Complex, besides provisioning geometallurgical data. This work can benefit open pit operations with direct or indirect reduction of cost, safety increment, and better operational performance of the ore processing.

Keywords: IOCG type deposits; lithogeochemical units; ore beneficiation; Archean; Amazonian Craton.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 - Imagem de satélite com a localização dos Alvos de Exploração e Projetos da Vale SA. Imagens RGB Worldview3 de 30/05/2021. Relatório interno Vale SA. 2
- Figura 2 - Mapa litológico e setorização do Complexo Sossego (Vale 2016)..... 3
- Figura 3 - A) Localização do estado do Pará no mapa do Brasil; B) Mapa de localização esquemático da Província Mineral de Carajás com os domínios Carajás (em vermelho) e Rio Maria (Vasquez *et al.* 2008); e C) Imagem de relevo do Domínio Carajás (*Google Earth*) mostrando as principais feições geomorfológicas, acessos, localidades e a Mina de Sossego. 4
- Figura 4 - Vetorização geoquímica em sistema hidrotermal-magmático (Halley *et al.* 2015)... 5
- Figura 5 - (A) Dados geoquímicos em 3D com base no diagrama de elemento geral de feldspato e (B) Modelo 3D derivado de dados geoquímicos em grade (Fabris *et al.* 2013)... 6
- Figura 6 - Mapa geológico simplificado (Fernandes *et al.* 2021) de parte da Província Mineral de Carajás mostrando os seus principais depósitos minerais..... 13
- Figura 7 - A) Mapa geológico simplificado do Complexo Sossego (Monteiro *et al.* 2008); B) Distribuição esquemática das zonas de alteração hidrotermais na Mina Sossego. 18
- Figura 8 - Litotipos do setor Pista representativos dos grupos definidos pelos dados geoquímicos por meio da estatística multivariada. (A) unidade sódica-sílica (Si–Na); (B) sódica (Na); (C) unidade potássico-clorítica (Mg–Fe–K(Ca)); (D) unidade feldspática potássica (E); unidade magnésiana (alto Mg); e (F) gabro com vênulas ricas em actinolita e calcita..... 22
- Figura 9 - Diagramas de correlação do setor Pista mostrando as unidades geoquímicas definidas pelos cruzamentos de dados Fe (%) x Ca (%), Fe (%) x K (%), Fe (%) x Mg (%) e Fe (%) x Na (%). 23
- Figura 10 - Diagramas de correlação do setor Pista mostrando as unidades geoquímicas definidas pelos cruzamentos de dados Fe (%) x P (ppm), Fe (%) x La (ppm), Fe (%) x Al (%) e Fe (%) x Cr (ppm). 24
- Figura 11 - Diagramas de correlação do setor Pista mostrando as unidades geoquímicas definidas pelos cruzamentos de dados Na (%) x Ca (%), Na (%) x Mg (%), Na (%) x K (%) e Na (%) x Al (%). 25
- Figura 12 - Diagramas de dispersão (Unidades geoquímicas x teores de Cu do setor Pista) utilizados para definir quais unidades geoquímicas tem relação com teores de corte

	utilizados na mina para definição de rochas estéril (<0,2 % Cu), baixo (>0,2 % Cu <0,5), médio (>0,5 % Cu <0,9) e alto teor (>0,9 % Cu).....	28
Figura 13 -	Diagramas de dispersão (Unidades geoquímicas x teores de Cu do setor Pista) utilizados para definir quais unidades geoquímicas tem relação com teores de corte utilizados na mina para definição de rochas estéril (<0,2 % Cu), baixo (>0,2 % Cu <0,5), médio (>0,5 % Cu <0,9) e alto teor (>0,9 % Cu). Símbolos conforme Figura 12.	29
Figura 14 -	<i>Boxplots</i> das unidades geoquímicas definidas do setor Pista com as distribuições estatísticas para Al, Ag, As, Be, Bi, Ca.....	30
Figura 15 -	<i>Boxplots</i> das unidades geoquímicas definidas do setor Pista com as distribuições estatísticas para Ba, Ce, Co, Cd, Cr, Cs.....	31
Figura 16 -	<i>Boxplots</i> das unidades geoquímicas definidas do setor Pista com as distribuições estatísticas para Cu, Fe, Ga, Hf, In, K	32
Figura 17 -	<i>Boxplots</i> das unidades geoquímicas definidas do setor Pista com as distribuições estatísticas para Ge, Li, Mg, La, Mn, Mo.	33
Figura 18 -	<i>Boxplots</i> das unidades geoquímicas definidas do setor Pista com as distribuições estatísticas para Na, Nb, Ni, Pb, Re, S.....	34
Figura 19 -	<i>Boxplots</i> das unidades geoquímicas definidas do setor Pista com as distribuições estatísticas para P, Sc, Se, Sb, Sn, Sr.	35
Figura 20 -	<i>Boxplots</i> das unidades geoquímicas definidas do setor Pista com as distribuições estatísticas para Ta, Te, Th, Tl, Y, V.....	36
Figura 21 -	<i>Boxplots</i> das unidades geoquímicas definidas do setor Pista com as distribuições estatísticas para Ti, Zr, W, Y, Zn.	37
Figura 22 -	Litotipos do setor Sequeirinho/Baiano representativos dos grupos definidos pelos dados geoquímicos. (A) Unidade sódica; (B) unidade sílico-sódica; (C) unidade sódico-férrica, (D) unidade sódico-cálcica; (E) unidade cálcico-férrica; (F) unidade férrica; (G) unidade magnésiana; (H) unidade potássico-clorítica e (I) unidade feldspato potássica.	40
Figura 23 -	Diagramas de correlação do setor Pista mostrando as unidades geoquímicas definidas pelos cruzamentos de dados Fe (%) x Al (%), Fe (%) x Ca (%), Fe (%) x K (%) e Fe (%) x Mg (%).	41

Figura 24 - Diagramas de correlação do setor Pista mostrando as unidades geoquímicas definidas pelos cruzamentos de dados Fe (%) x Na (%), Fe (%) x P (%), Fe (%) x La (%) e Fe (%) x Cr (%).	42
Figura 25 - Diagramas de correlação do setor Pista mostrando as unidades geoquímicas definidas pelos cruzamentos de dados Ca (%) x Na (%), Mg (%) x Na (%), K (%) x Na (%) e Al (%) x Na (%).	43
Figura 26 - Diagramas de dispersão (Unidades geoquímicas x teores de Cu do setor Sequeirinho/Baiano) utilizados para definir quais unidades geoquímicas tem relação com teores de corte utilizados na mina para definição de rochas estéril (<0,2 % Cu), baixo (>0,2 % Cu <0,5), médio (>0,5 % Cu <0,9) e alto teor (>0,9 % Cu).	47
Figura 27 - Diagramas de dispersão (Unidades geoquímicas x teores de Cu do setor Sequeirinho/Baiano) utilizados para definir quais unidades geoquímicas tem relação com teores de corte utilizados na mina para definição de rochas estéril (<0,2 % Cu), baixo (>0,2 % Cu <0,5), médio (>0,5 % Cu <0,9) e alto teor (>0,9 % Cu).	48
Figura 28 – <i>Boxplots</i> das unidades geoquímicas definidas do setor Sequeirinho/Baiano com as distribuições estatísticas para Al, Ag, As, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Ce, Co, Cr e Cs. ...	49
Figura 29 - <i>Boxplots</i> das unidades geoquímicas definidas do setor Sequeirinho/Baiano com as distribuições estatísticas para Cu, Fe, Ga, Ge, Hf, In, K, La, Li, Mg, Mn e Mo. ...	50
Figura 30 - <i>Boxplots</i> das unidades geoquímicas definidas do setor Sequeirinho/Baiano com as distribuições estatísticas para Na, Nb, Ni, P, Pb, Re, S, Sb, Sc, Se, Sn e Sr.	51
Figura 31 - <i>Boxplots</i> das unidades geoquímicas definidas do setor Sequeirinho/Baiano com as distribuições estatísticas para Ta, Te, Th, Ti, Tl, U, V, W, Y, Zn e Zr.	52
Figura 32 – Litotipos do setor Sossego/Curral representativos das unidades geoquímicas denominadas: (A) sódica, (B) sódico-sílica, (C) sódico-potássica (baixo Ca), (D) potássica, férrica (E); clorítica (F e G) e cálcica (H e I).	55
Figura 33 - Diagramas de correlação do setor Sossego/Curral mostrando as unidades geoquímicas definidas pelos cruzamentos de dados Fe (%) x Al (%), Fe (%) x Ca (%), Fe (%) x K (%) e Fe (%) x Mg (%).	56
Figura 34 - Diagramas de correlação do setor Sossego/Curral mostrando as unidades geoquímicas definidas pelos cruzamentos de dados Fe (%) x Na (%), Fe (%) x P (%), Fe (%) x La (%) e Fe (%) x Cr (%).	57

- Figura 35 - Diagramas de correlação do setor Sossego/Curral mostrando as unidades geoquímicas definidas pelos cruzamentos de dados Ca (%) x Na (%), Mg (%) x Na (%), K (%) x Na (%) e Al (%) x Na (%). 58
- Figura 36 - Diagramas de dispersão (Unidades geoquímicas x teores de Cu do setor Sossego/Curral) utilizados para definir quais unidades geoquímicas tem relação com teores de corte utilizados na mina para definição de rochas estéril (<0,2 % Cu), baixo (>0,2 % Cu <0,5), médio (>0,5 % Cu <0,9) e alto teor (>0,9 % Cu). 62
- Figura 37 - Diagramas de dispersão (Unidades geoquímicas x teores de Cu do setor Sossego/Curral) utilizados para definir quais unidades geoquímicas tem relação com teores de corte utilizados na mina para definição de rochas estéril (<0,2 % Cu), baixo (>0,2 % Cu <0,5), médio (>0,5 % Cu <0,9) e alto teor (>0,9 % Cu). 63
- Figura 38 - *Boxplots* das unidades geoquímicas definidas do setor Sossego/Curral com as distribuições estatísticas para Al, Ag, As, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Ce, Co, Cr e Cs. .. 64
- Figura 39 - *Boxplots* das unidades geoquímicas definidas do setor Sossego/Curral com as distribuições estatísticas para Cu, Fe, Ga, Ge, Hf, In, K, La, Li, Mg, Mn e Mo. .. 65
- Figura 40 - *Boxplots* das unidades geoquímicas definidas do setor Sossego/Curral com as distribuições estatísticas para Na, Nb, Ni, P, Pb, Re, S, Sb, Sc, Se e Sn. 66
- Figura 41 - *Boxplots* das unidades geoquímicas definidas do setor Sossego/Curral com as distribuições estatísticas para Ta, Te, Th, Ti, Tl, U, V, W, Y, Zn e Zr. 67
- Figura 42 - Planos de falhas baseados nos mapas estruturais. A) Lineamentos magnéticos interpretados e zonas mineralizadas projetadas (Domingos 2009); B) Interpretações de falhas e lineações em mapa aerogeofísico (Relatório Interno Vale) e C) Planos 3D de falhas no *software Leapfrog*. 70
- Figura 43 - Utilização de técnicas de modelagem para criação de tendências estruturais (*Structural trends*) a serem aplicadas nos modelos. 71
- Figura 44 - (A) Modelo geológico mostrando uma visão panorâmica em planta das unidades geoquímicas propostas para os setores Pista e Sequeirinho/Baiano. 73
- Figura 45 - (B) Corte longitudinal do modelo geológico das unidades geoquímica do setor Sequeirinho/Baiano e (C) Corte longitudinal mostrando uma seção das unidades geoquímicas do setor Pista. 74
- Figura 46 - (D) Modelo com a visão em planta das unidades geoquímicas dos setores Sossego/Curral e (E) Corte longitudinal mostrando um panorama das distribuições das unidades geoquímicas em uma seção no setor Sossego/Curral. 74

Figura 47 - (A) Modelo com a visão em planta das distribuições dos teores e indicadores dos vetores de Fe dos setores Sequeirinho/Baiano e Pista. (B) Visão das distribuições 3D dos vetores de Fe dos setores Sequeirinho/Baiano e Pista.....	76
Figura 48 - (C) Modelo com a visão em planta das distribuições dos teores e indicadores dos vetores de Na dos setores Sequeirinho/Baiano e Pista. (D) Visão das distribuições 3D dos vetores de Na dos setores Sequeirinho/Baiano e Pista.....	76
Figura 49 - (E) Modelo com a visão em planta das distribuições dos teores e indicadores dos vetores de Cu dos setores Sequeirinho/Baiano e Pista. (F) Visão das distribuições 3D dos vetores de Cu dos setores Sequeirinho/Baiano e Pista.....	76
Figura 50 - (G) Modelo com a visão em planta das distribuições dos teores e indicadores dos vetores de Na do setor Sossego/Curral. (H) Visão das distribuições 3D dos vetores de Na do setor Sossego/Curral.....	77
Figura 51 - (I) Modelo com a visão em planta das distribuições dos teores e indicadores dos vetores de Ca do setor Sossego/Curral. (J) Visão das distribuições 3D dos vetores de Ca do setor Sossego/Curral.....	77
Figura 52 - (L) Modelo com a visão em planta das distribuições dos teores e indicadores dos vetores de Cu do setor Sossego/Curral e (M) Visão das distribuições 3D dos vetores de Cu do setor Sossego/Curral.....	77
Figura 53 - Diagramas de probabilidades (<i>split</i>) no setor Pista mostrando as curvas de cada unidade geoquímica x elementos químicos maiores.	80
Figura 54 - Diagramas de probabilidades (<i>split</i>) no setor Pista mostrando as curvas de cada unidade geoquímica x elementos químicos maiores..	81
Figura 55 - Diagramas de probabilidades (<i>split</i>) no setor Pista mostrando as curvas de cada unidade geoquímica x elementos químicos maiores..	82
Figura 56 - Histogramas do setor Pista mostrando as distribuições das quantidades e frequências absolutas globais que ocorrem nas unidades geoquímica x elementos químicos maiores.....	83
Figura 57 - Histogramas do setor Pista mostrando as distribuições das quantidades e frequências absolutas individualizadas das unidades geoquímica sódica e sódica-sílica x elementos químicos maiores.....	84
Figura 58 - Histogramas do setor Pista mostrando as distribuições das quantidades e frequências absolutas de maneira individualizadas das unidades geoquímica potássica e magnésiana x elementos químicos maiores.....	85

Figura 59 - Histogramas do setor Pista mostrando as distribuições das quantidades e frequências absolutas de maneira individualizadas da unidade geoquímica feldspática potássica x elementos químicos maiores.....	86
Figura 60 - Diagramas de probabilidades (<i>split</i>) no setor Sequeirinho/Baiano mostrando as curvas de cada unidade geoquímica x elementos químicos maiores.....	88
Figura 61 - Diagramas de probabilidades (<i>split</i>) no setor Sequeirinho/Baiano mostrando as curvas de cada unidade geoquímica x elementos químicos maiores.....	89
Figura 62 - Diagramas de probabilidades (<i>split</i>) no setor Sequeirinho/Baiano mostrando as curvas de cada unidade geoquímica x elementos químicos maiores.....	90
Figura 63 - Histogramas do setor Sequeirinho/Baiano mostrando as distribuições das quantidades e frequências absolutas globais que ocorrem nas unidades geoquímica x elementos químicos maiores.....	91
Figura 64 - Histogramas do setor Sequeirinho/Baiano mostrando as distribuições das quantidades e frequências absolutas de maneira individualizadas das unidades geoquímica sódica e sódica-sílica x elementos químicos maiores.	92
Figura 65 - Histogramas do setor Sequeirinho/Baiano mostrando as distribuições das quantidades e frequências absolutas de maneira individualizadas das unidades geoquímica sódico-férrica e sódico-cálcica x elementos químicos maiores.	93
Figura 66 - Histogramas do setor Sequeirinho/Baiano mostrando as distribuições das quantidades e frequências absolutas de maneira individualizadas das unidades geoquímica cálcico-férrica e férrica x elementos químicos maiores.....	94
Figura 67 - Histogramas do setor Sequeirinho/Baiano mostrando as distribuições das quantidades e frequências absolutas de maneira individualizadas das unidades geoquímica magnésiana e potássico-clorítica x elementos químicos maiores.	95
Figura 68 - Histogramas do setor Sequeirinho/Baiano mostrando as distribuições das quantidades e frequências absolutas de maneira individualizadas da unidade geoquímica feldspática potássica x elementos químicos maiores.	96
Figura 69 - Diagramas de probabilidades (<i>split</i>) no setor Sossego/Curral mostrando as curvas de cada unidade geoquímica x elementos químicos maiores.	98
Figura 70 - Diagramas de probabilidades (<i>split</i>) no setor Sossego/Curral mostrando as curvas de cada unidade geoquímica x elementos químicos maiores.	99
Figura 71 - Diagramas de probabilidades (<i>split</i>) no setor Sossego/Curral mostrando as curvas de cada unidade geoquímica x elementos químicos maiores.	100

Figura 72 - Histogramas do setor Sossego/Currall mostrando as distribuições das quantidades e frequências absolutas de maneira individualizadas das unidades geoquímica x elementos químicos maiores.....	101
Figura 73 - Histogramas do setor Sossego/Currall mostrando as distribuições das quantidades e frequências absolutas individualizadas das unidades geoquímica sódica e sódico-silica x elementos químicos maiores.....	102
Figura 74 - Histogramas do setor Sossego/Currall mostrando as distribuições das quantidades e frequências absolutas individualizadas das unidades geoquímica sódico-potássica e potássica x elementos químicos maiores.....	103
Figura 75 - Histogramas do setor Sossego/Currall mostrando as distribuições das quantidades e frequências absolutas individualizadas das unidades geoquímica clorítica e férrica x elementos químicos maiores.....	104
Figura 76 - Histogramas do setor Sossego/Currall mostrando as distribuições das quantidades e frequências absolutas individualizadas da unidade geoquímica cálcica x elementos químicos maiores.....	105
Figura 77 - Diagramas ternários do setor Pista (A) cruzamentos de Fe x Na x Mg e (B) cruzamentos de K x Na x Ca; ambos mostrando uma provável evolução dos fluidos hidrotermais.....	108
Figura 78 - Diagramas ternários do setor Pista (C) cruzamentos de Mg x Na x K e (D) cruzamentos de Mg x Na x Ca; ambos mostrando uma provável evolução dos fluidos hidrotermais.....	109
Figura 79 - Diagramas ternários do setor Sequeirinho/Baiano (E) cruzamentos de Fe x Na x Mg e (F) cruzamentos de Fe x Na x Ca; ambos mostrando duas prováveis evoluções dos fluidos hidrotermais.....	110
Figura 80 - Diagramas ternários do setor Sequeirinho/Baiano (G) cruzamentos de Mg x Na x Al; (H) cruzamentos de Mg x Al x Ca; ambos mostrando duas prováveis evoluções dos fluidos hidrotermais.....	111
Figura 81 - Diagramas ternários do setor Sossego/Currall (I) cruzamentos de Fe x Na x Ca; (J) cruzamentos de Ca x Na x K; ambos mostrando uma provável evolução dos fluidos hidrotermais.....	112
Figura 82 - Diagramas ternários do setor Sossego/Currall (L) cruzamentos de Mg x Na x Al; (M) cruzamentos de Mg x Al x Ca; ambos mostrando uma provável evolução dos fluidos hidrotermais.....	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Separação dos elementos químicos que podem ser utilizados como vetores para as unidades geoquímicas do setor Pista.....	38
Tabela 2 - Separação dos elementos químicos que podem ser utilizados como vetores para as unidades geoquímicas do setor Sequeirinho/Baiano.....	53
Tabela 3 - Separação dos elementos químicos que podem ser utilizados como vetores para as unidades geoquímicas do setor Sossego/Curral.	68
Tabela 4 - Parâmetros utilizados para modelar as unidades geoquímicas dos setores Sequeirinho/Baiano, Pista e Sossego/Curral.....	72

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	iv
RESUMO	v
ABSTRACT	vii
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	ix
LISTA DE TABELAS	xvi
1 INTRODUÇÃO	1
2 LOCALIZAÇÃO E ACESSO Á ÁREA	4
3 JUSTIFICATIVA	5
4 OBJETIVOS	8
5 MÉTODOS APLICADOS	9
5.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
5.2 ATIVIDADES DE CAMPO	9
5.3 PETROGRAFIA E LITOGEOQUÍMICA.....	9
5.4 PROCESSAMENTO DOS DADOS	10
5.5 APOIO FINANCEIRO	10
6 ARTIGO A SER TRADUZIDO E SUBMETIDO AO PERIÓDICO <i>JOURNAL OF GEOCHEMICAL EXPLORATION</i>	11
6.1 INTRODUÇÃO.....	13
6.2 CONTEXTO GEOTECTÔNICO DO CRÁTON AMAZÔNICO	15
6.3 SÍNTESE SOBRE A GEOLOGIA DA PROVÍNCIA MINERAL DE CARAJÁS	16
6.4 GEOLOGIA E ALTERAÇÕES HIDROTERMAIS DO COMPLEXO SOSSEGO	17
6.5 MÉTODOS.....	19
6.6 LITOGEOQUÍMICA, MINERALIZAÇÕES E UNIDADES HIDROTERMAIS	20
6.6.1 Unidades geoquímicas e zonamento hidrotermal do setor Pista	21
6.6.2 Unidades geoquímicas e zonamento hidrotermal do setor Sequeirinho/Baiano	39
6.6.3 Unidades geoquímicas e zonamento hidrotermal do setor Sossego/Curral	54
6.7 MODELAMENTO 3D DAS UNIDADES E VETORES GEOQUÍMICOS	69
6.7.1 Modelos das unidades geoquímicas	69
6.7.2 Modelos de vetores geoquímicos	75
6.8 DISCUSSÃO.....	78
6.8.1 Resultados estatísticos	78

6.8.1.1 Diagramas de probabilidade e histogramas	78
6.8.1.2 Diagramas binários e ternários	106
6.8.1.3 <i>Boxplots</i>	114
6.8.2 Modelos implícitos	116
7 CONCLUSÕES	117
REFERÊNCIAS	119

1 INTRODUÇÃO

A Província Mineral de Carajás (DOCEGEO 1988) representa a área melhor conhecida geologicamente do Cráton Amazônico (Almeida *et al.* 1981) em função dos seus importantes depósitos de ferro, cobre, ouro e metais de base que atraem e motivam pesquisadores do País e do exterior para o desenvolvimento de estudos na região (Santos 1986, Villas & Santos 2001, Monteiro *et al.* 2008, Bettencourt *et al.* 2016, Lacasse *et al.* 2020). Isso tem possibilitado a elucidação de parte dos processos metalogenéticos e suas relações com a evolução crustal. Essa província representa o núcleo mais antigo do cráton, cuja formação e estabilização tectônica datam do Arqueano (Tassinari & Macambira 1999, Santos *et al.* 2000) e foi recentemente dividida em dois domínios tectônicos distintos, Carajás ao norte e Rio Maria ao sul (Dall’Agnol *et al.* 2006, Vasquez *et al.* 2008, Feio *et al.* 2013).

Na porção sul do Domínio Carajás há depósitos economicamente importantes de cobre e ouro que perfazem aproximadamente 600–800 Mt@0,5–1,4 % Cu e 0,18–0,7 g/t Au (Fig. 1), e são usualmente classificados como sistemas hidrotermais do tipo *IOCG* (*iron oxide copper-gold*) (Monteiro *et al.* 2008, Moreto *et al.* 2011, 2015a). Ocorrem ao longo de uma zona de cisalhamento dúctil-rúptil denominada “Cinturão Sul do Cobre” (CSC), com extensão aproximada de 130 km e direção WNW–ESE, limitado pela Bacia Carajás e rochas do embasamento arqueano (Villas *et al.* 2005, Oliveira *et al.* 2010, Xavier *et al.* 2012, Feio *et al.* 2013, Moreto *et al.* 2015b). No CSC, esses sistemas *IOCG* são neoarqueanos (2,72–2,68 Ga), formados em níveis crustais profundos, ou do Paleoproterozoico (1,90–1,88 Ga), desenvolvidos em níveis crustais mais rasos e controlados estruturalmente por regime rúptil (Xavier *et al.* 2012, 2017). Esses depósitos comumente apresentam zonas de alterações hidrotermais com tipos, estilos e intensidade variáveis do Arqueano ao Proterozoico, sugerindo eventos mineralizantes distintos no tempo e no espaço (Monteiro *et al.* 2008, Xavier *et al.* 2012, Moreto *et al.* 2015a).

O depósito do tipo *IOCG* do Complexo Sossego (Lancaster *et al.* 2000, Monteiro *et al.* 2008) é formado por granitoides alcalinos, granófiros finos, gabros e dioritos (Fig. 2) que formam os alvos exploratórios Sequeirinho, Sossego, Pista, Baiano e Curral. Alterações hidrotermais em distintos tipos, estilos e intensidade usualmente estão associadas às mineralizações cupro-auríferas (Villas *et al.* 2005, Monteiro *et al.* 2008, Moreto *et al.* 2015a).

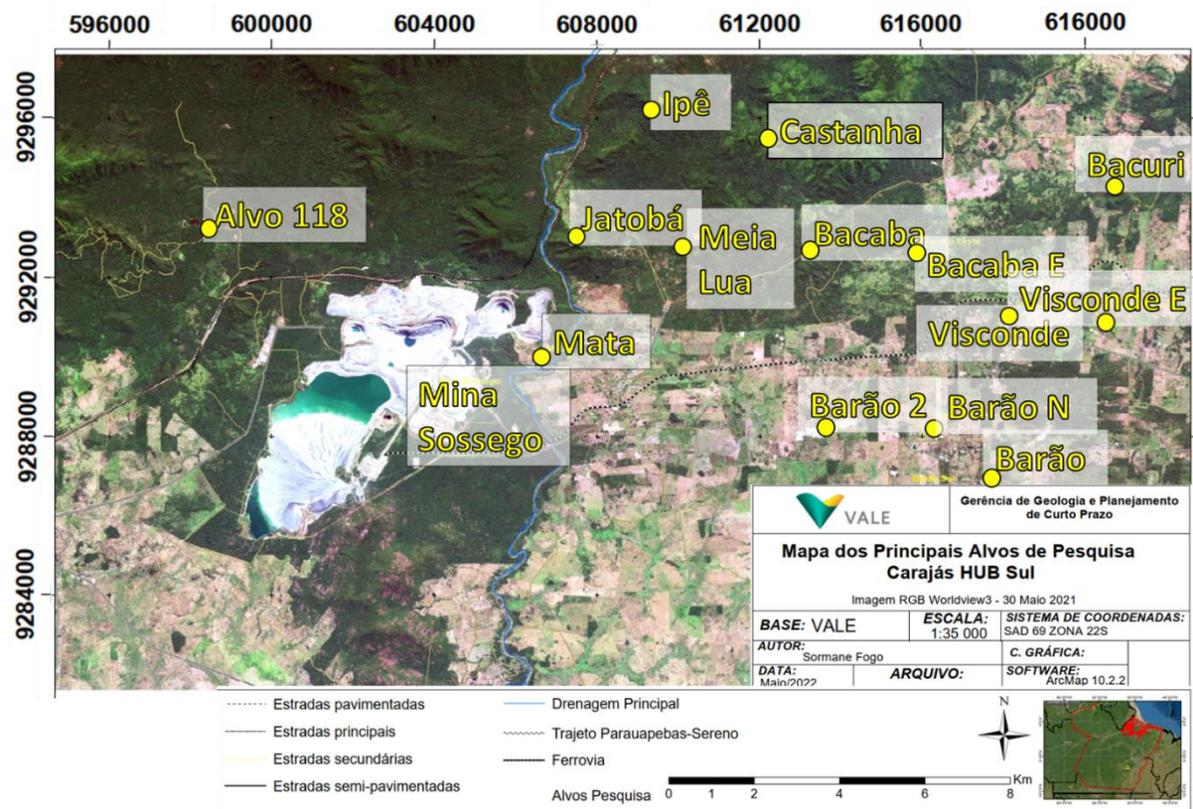


Figura 1 - Imagem de satélite com a localização dos Alvos de Exploração e Projetos da Vale SA. Imagens RGB Worldview3 de 30/05/2021. Relatório interno Vale SA.

Essa Dissertação de Mestrado teve como foco esse repositório e versa sobre a aplicação de modelamento 3D com vetores geoquímicos naquelas faixas de alteração hidrotermal. É baseada em um grande banco de dados geoquímicos em rocha total e minério, descrições de furos de sondagem e lâminas petrográficas. A definição de grupos de elementos químicos na vetorização geoquímica, aliados às faixas de alterações hidrotermais, contribuem para as diversas áreas operacionais das minas do complexo.

A lavra dos setores Sequeirinho, Baiano, Pista, Sossego e Curral permitiram estudos que contemplam os zonamentos das alterações hidrotermais por meio de suas assinaturas geoquímicas, objetivando melhor operação, planejamento de mina e beneficiamento na usina. Esses resultados para as equipes de desmonte e beneficiamento são fundamentais, diante de dificuldades operacionais com a inexistência de vetores geoquímicos. Isso ocasiona falta de previsibilidade dos corpos de minério em pequenas escalas, não mapeados no modelamento geológico, proporcionando divergências nas reconciliações estatísticas entre operação e planejamento de mina. Outras dificuldades são as inconsistências das litologias e as variabilidades dos zonamentos geoquímicos dos processos hidrotermais que são apresentados nos modelos litológicos e usado no planejamento de desmontes, gerando ineficácias desse

processo em alguns setores. No beneficiamento do minério, há necessidade de associar geoquímica e mineralogias das prováveis zonas de alterações hidrotermais às zonas mineralizadas.

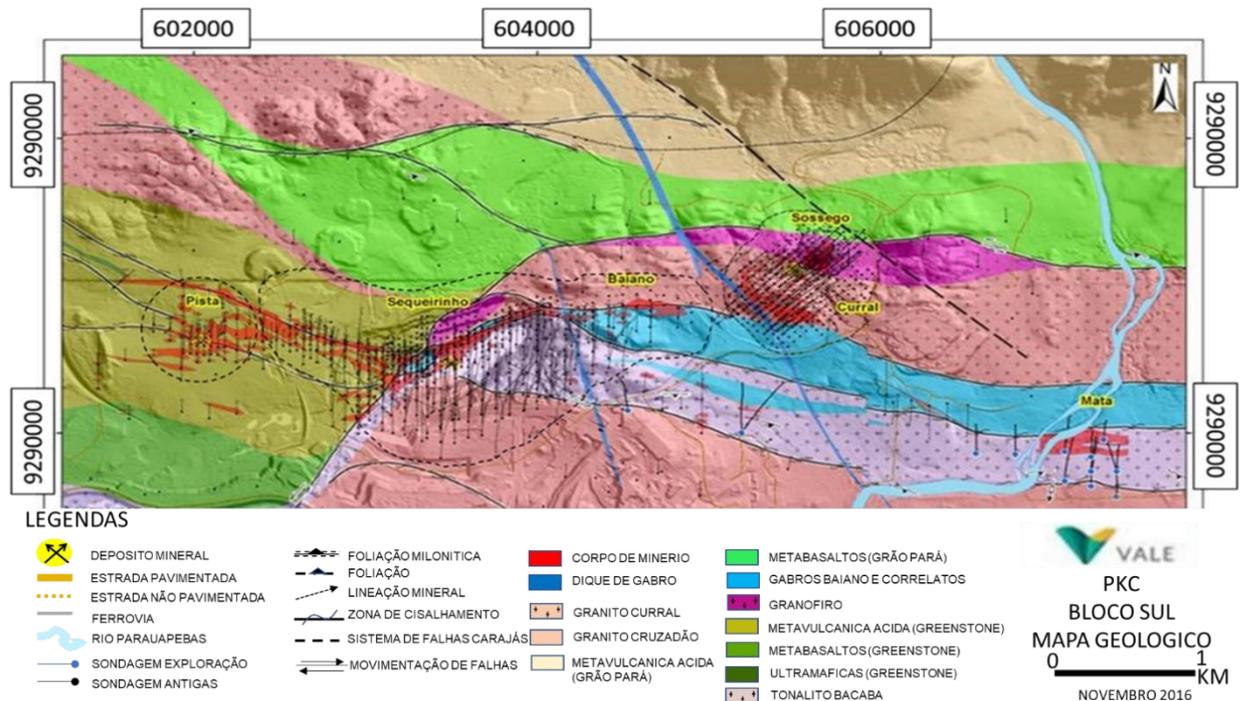


Figura 2 - Mapa litológico e setorização do Complexo Sossego (Vale 2016).

Diante desse quadro, se buscou com esse trabalho contribuir para os entendimentos litológico, estrutural e geoquímico do Complexo Sossego. Fornece dados para estudos geometalúrgicos, auxiliando interpretações geotécnicas com as características e qualidade do material; orientação em relação aos tipos de materiais a serem carregados e desmontados, proporcionado um melhor controle na razão de carga e parâmetros para uma fragmentação otimizada. O estudo também objetivou fornecer dados para estudos geometalúrgicos para melhores resultados na operação e usina.

2 LOCALIZAÇÃO E ACESSO À ÁREA

A área de estudo está localizada aproximadamente 47 km do município de Canaã dos Carajás, sudeste do estado do Pará, norte do Brasil (Fig. 3). O acesso é realizado por uma malha rodoviária que interliga as cidades de Parauapebas (80 km), Marabá (200 km) e um aeroporto comercial em Carajás (100 km). O deslocamento de Belém para Canaã dos Carajás pode ser pelas rodovias PA-150 até Marabá; PA-155 até o município de Eldorado dos Carajás; PA-275 até Parauapebas e por fim PA-160 até o município de Canaã dos Carajás. Por via aérea há voo comercial até o município de Parauapebas. O acesso ao Projeto Sossego é realizado por estradas e/ou vicinais a partir de Canaã dos Carajás ou Parauapebas.

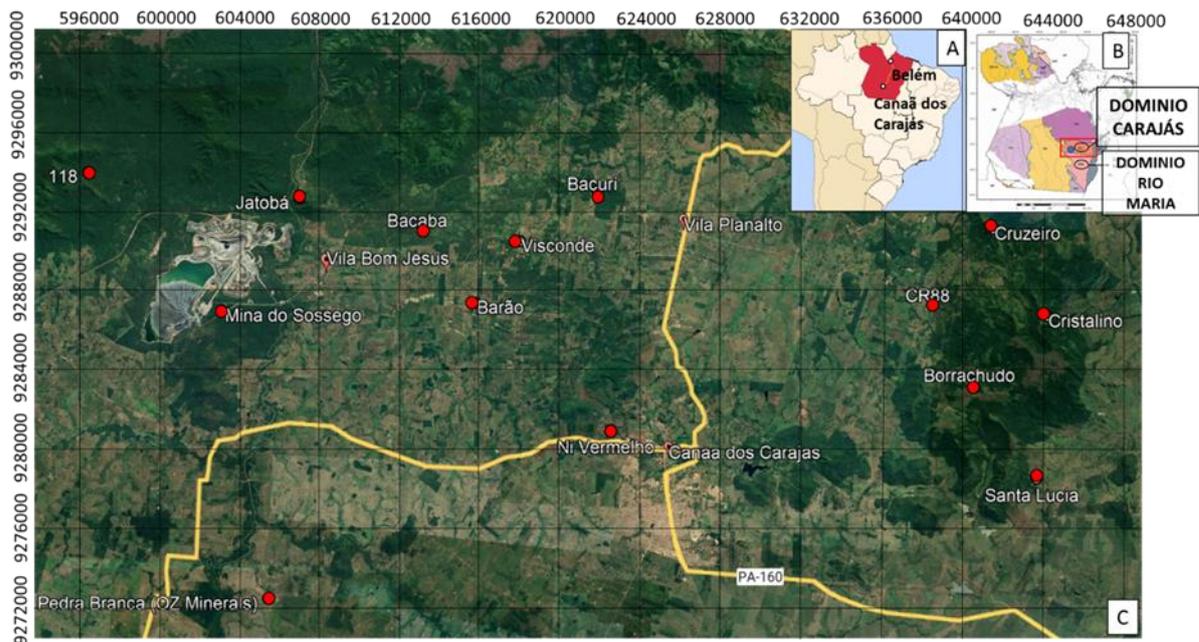


Figura 3 - A) Localização do estado do Pará no mapa do Brasil; B) Mapa de localização esquemático da Província Mineral de Carajás com os domínios Carajás (em vermelho) e Rio Maria (Vasquez *et al.* 2008); e C) Imagem de relevo do Domínio Carajás (Google Earth) mostrando as principais feições geomorfológicas, acessos, localidades e a Mina de Sossego.

3 JUSTIFICATIVA

A vetorização vem sendo bastante utilizada para localizar ou aprofundar o conhecimento de inúmeros depósitos minerais (Galley 1995, Brand 1999) indicando tendências de variações em direções ao provável corpo de minério, podendo gerar padrões e assinaturas químicas distais e proximais as mineralizações. Os vetores geoquímicos desempenham um papel vital nesses reconhecimentos, classificações e quantificações das alterações, uma vez que esses processos de alteração provocam o enriquecimento de certos elementos em detrimento de outros, fornecendo pistas sobre o grau e o tipo das alterações (Hosseini-Dinani & Aftabi 2016). A vetorização representa um guia de exploração essencial para depósitos minerais hidrotermais (Large *et al.* 2001, Pirajno 2009, Mathieu 2018), fornecendo várias tendências de alteração e relações entre mineralogia, litogeoquímica e intensidade de alteração em sistemas de alteração zonada dos depósitos hidrotermais (Fig. 4) A vetorização geoquímica envolve a análise de dados geoquímicos de rocha total ou mineral por meio de métodos estatísticos multivariados, objetivando-se a identificação de agrupamentos de elementos químicos que podem ser associados à determinada litologia (Fig. 5), mineralização e/ou alteração hidrotermal (Mark *et al.* 2005).

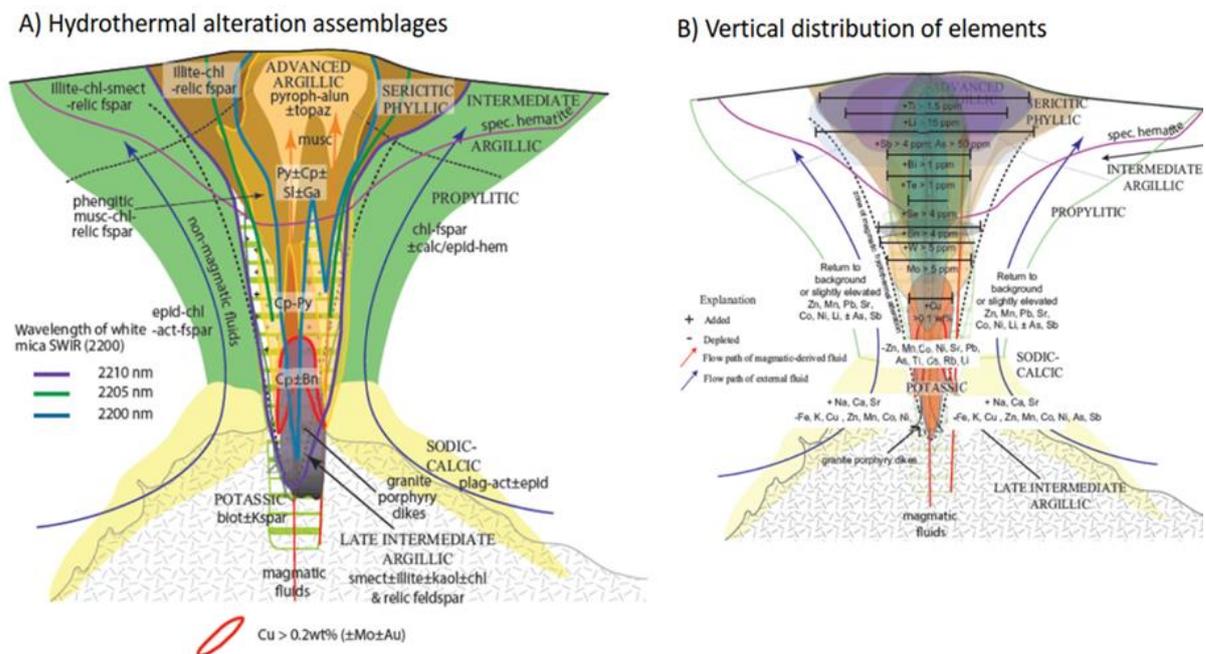


Figura 4 - Vetorização geoquímica em sistema hidrotermal-magmático (Halley *et al.* 2015).

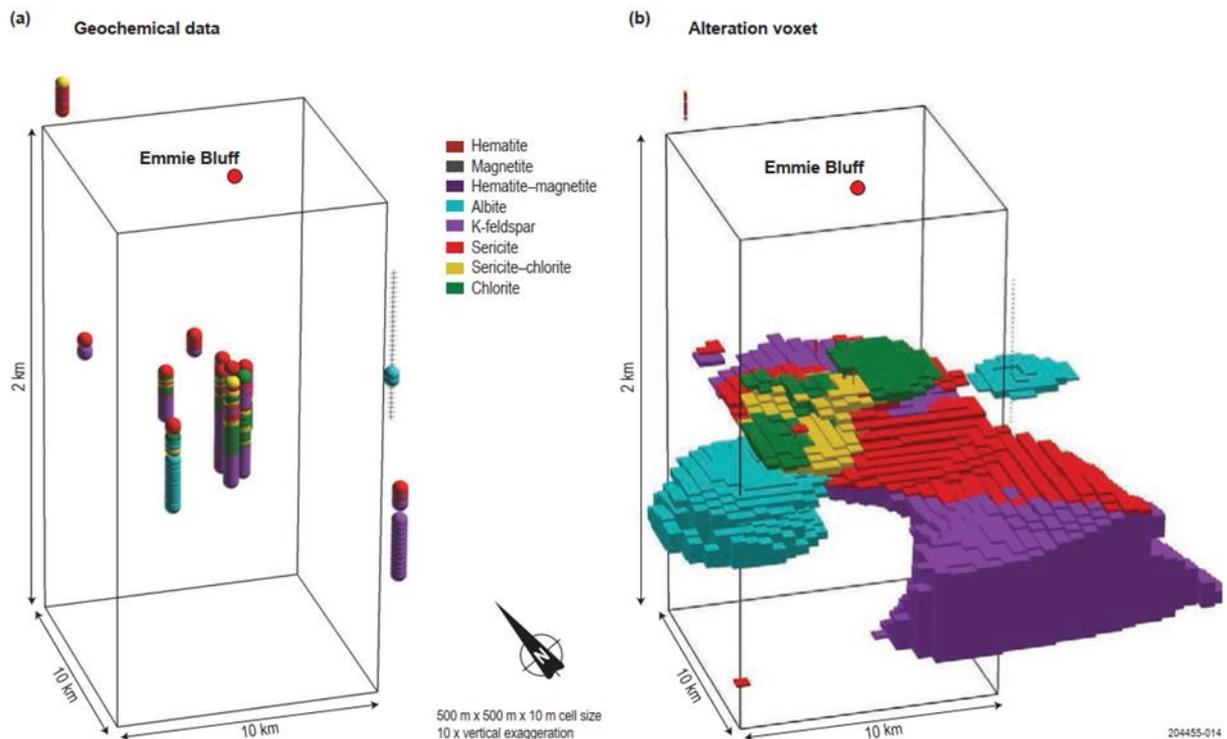


Figura 5 - (A) Dados geoquímicos em 3D com base no diagrama de elemento geral de feldspato e (B) Modelo 3D derivado de dados geoquímicos em grade (Fabris *et al.* 2013).

Os resultados do modelamento vetorial contribuem para o entendimento litológico, estrutural e geoquímico e, assim, para o aperfeiçoamento de um projeto de mineração em produção como um todo, ajudando no complemento de estudos geometalúrgicos e interpretações geotécnicas com as características e qualidade do material (O'Driscoll 1985). Diante desse quadro, o grande volume de dados disponíveis nessa Dissertação de Mestrado para o Complexo Sossego representa uma ótima oportunidade para testar a aplicação de modelamento vetorial geoquímico. A integração e interpretação desses dados representa uma ferramenta extremamente importante para as minas do complexo na definição de assinaturas químicas das zonas hidrotermalmente alteradas que hospedam as mineralizações (Mazdab *et al.* 2008).

No Complexo Sossego, existem diversos trabalhos que mostram os zonamentos hidrotermais de forma bastante consistente (Monteiro *et al.* 2008, Moreto *et al.* 2015a). Contudo, durante as operações de lavra e beneficiamento que ocorrem nas minas do Complexo Sossego, foi necessário acrescentar estudos complementares mais específicos a serem aplicados na indústria, baseados na metodologia de vetorizações geoquímicas para o entendimento das distribuições mineralógicas e elementos químicos associados às mineralizações, buscando a redução dos impactos que correm nos processos de beneficiamento da usina. O conhecimento

da distribuição espacial dos elementos químicos e dos zonamentos hidrotermais no depósito permite o monitoramento e previsão das taxas de elementos contaminantes, bem como a definição das proporções dos minerais que entraram na alimentação da planta de beneficiamento.

No geral, esses resultados são importantes principalmente para as equipes de planejamento de mina e de processo de usina, representando um guia a mais na elaboração dos seus planos de lavras ou no melhor beneficiamento dos minerais de minério (Fabris *et al.* 2013). O modelo vetorial 3D propicia uma melhor programação dos polígonos a serem desmontados no decorrer dos avanços da lavra nas cavas. Com o conhecimento das características mineralógica do material, a equipe de engenharia de mina poderá direcionar seus planejamentos visando a melhoria dos desmontes da rocha pelo controle das quantidades de explosivos a serem utilizados e conseqüentemente otimizar a fragmentação da rocha. Para a equipe de beneficiamento mineral as caracterizações composicionais químicas, definidas pelos vetores, servirão como importante suporte nas dosagens de reagentes durante o processo de flotação e previsibilidade do consumo de revestimento e de corpo moedor do moinho, reduzindo desperdícios e custos desnecessários.

4 OBJETIVOS

O objetivo da presente Dissertação de Mestrado foi a elaboração de um modelamento geoquímico 3D baseado nas assinaturas litogeoquímicas disponíveis para as amostras de furos de sondagens e de mapeamento geológico do Complexo Sossego. Esses dados foram obtidos a partir das zonas alteradas hidrotermalmente em frente de lavra das minas que compõem o complexo, incluindo Sossego/Curral, Sequeirinho/Baiano e Pista. Assim, os objetivos específicos dessa pesquisa foram:

- Determinar um método efetivo de análise dos dados litogeoquímicos de testemunhos de sondagem envolvendo comparações com os resultados já existentes (mapeamentos e descrições de *log* geológico);
- Definir grupos de elementos químicos com técnicas estatísticas multivariadas, a fim de encontrar assinaturas geoquímicas específicas para diferentes zonas de alterações hidrotermais e sua vetorização;
- Gerar interpretações com os dados geoquímicos que permitam direcionar as equipes de planejamento de mina e beneficiamento mineral nos trabalhos operacionais;
- Descrever as características e assinaturas específicas da mineralização;
- Gerar modelos 3D para melhor interpretação espacial das continuidades, propiciando desta forma previsibilidade durante a operação de mina ou assinalar áreas com maior potencial prospectivo.

5 MÉTODOS APLICADOS

5.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Foram realizados levantamentos bibliográficos sobre a geologia da Província Mineral de Carajás e outras províncias metalogenéticas no mundo. Também foram priorizados trabalhos sobre a evolução e modelos genéticos de sistemas hidrotermais cupro-auríferos, incluindo os depósitos *IOCG*, bem como sobre a geoquímica aplicada aos estudos metalogenéticos e determinação de fontes de metais e fluidos. Essas atividades envolveram consultas ao Portal de periódicos da CAPES e bibliotecas da UFPA.

Foram catalogados e revisados os dados de furos de sondagem e dados geoquímicos disponíveis, fundamentais para o trabalho.

5.2 ATIVIDADES DE CAMPO

A primeira etapa consistiu no mapeamento de cava que resultou na aquisição dos dados de campo, tais como medidas estruturais (fraturas; foliações; lineações; falhas e dobras) e refinamento litológico.

No galpão de testemunhos foram realizadas descrições detalhadas e criteriosas de 55 furos de sondagem (27 do Pista, 16 do Sequeirinho/Baiano e 12 Sossego/Curral). Objetivou-se nessa etapa o detalhamento das descrições e definição dos tipos de alterações hidrotermais existentes em cada corpo e melhor compreensão desses processos.

5.3 PETROGRAFIA E LITOGEOQUÍMICA

Os dados petrográficos aqui apresentados foram compilados de estudos realizados no Centro de Desenvolvimento Mineral da Vale (CDM) em Santa Luzia (MG). Envolveram a identificação das rochas hospedeiras e das mineralizações, evolução paragenética, quantificação mineralógica e relações texturais entre os minerais de minério e de ganga.

Foram utilizadas 7834 análises químicas (2963 do Sequeirinho/Baiano, 2313 do Pista e 2558 do Sossego/Curral) realizadas no Laboratório *ALS Minerals* (Brasil) e no laboratório da mina dos Sossego. Na *ALS*, as amostras foram analisadas pelo seu pacote padrão ME-MS61 e leituras por *ICP-MS*. No Laboratório do Sossego, Cu total, Fe, Ni e Ag—Abertura ácida, com

finalização em EAA (Espectrometria de absorção atômica); Au–*Fire Assay* (Ensaio ao fogo–fusão e copelação), com finalização em EAA (Espectrometria de Absorção Atômica) e S–Analisador Simultâneo por infravermelho.

5.4 PROCESSAMENTO DOS DADOS

O tratamento dos dados foi automatizado no *software IoGAS Reflex*, envolvendo os principais elementos químicos presentes nas rochas dos corpos estudados: Na; Al; K; Mg; Fe e Ca. Essas variáveis maiores (exceto Si) foram confrontadas com Ag, As, Ba, Be, Bi, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Ga, Ge, Hf, In, La, Li, Mn, Mo, Nb, Ni, P, Pb, Re, S, Sb, Sc, Se, Sn, Sr, Ta, Th, Ti, Tl, U, V, W, Y, Zn e Zr em diversos diagramas.

A etapa final envolveu o processamento do modelamento geológico no *software LEAPFROG Geo 2021.2* para ajuste do traçado do zonamento de alterações hidrotermais e litologias mapeadas. Após unificação de todas as etapas anteriores, foi desenvolvido o modelamento 3D com foco exclusivo nos corredores estruturais e zonamentos das alterações hidrotermais.

5.5 APOIO FINANCEIRO

Todas as despesas de logística e disponibilização dos dados e softwares foram de responsabilidade da Vale S.A., empresa na qual o autor dessa dissertação é funcionário há 15 anos.

6 ARTIGO A SER TRADUZIDO E SUBMETIDO AO PERIÓDICO *JOURNAL OF GEOCHEMICAL EXPLORATION*

Alterações hidrotermais e vetores geoquímicos em sistemas cupro-auríferos na Província Mineral de Carajás (PA), Cráton Amazônico: Exemplo do Complexo Sossego

Antonio Fabricio Franco dos Santos^{1,*}, Carlos Marcello Dias Fernandes²

¹Vale S.A – Gerência de Planejamento Estratégico, Metais Básicos Atlântico Sul, Mina do Sossego, Pará, Brasil.

²Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará (UFPA). Rua Augusto Corrêa 1, CEP 66075-110, Belém–PA, Brasil.

*Autor correspondente:

Antonio Fabricio Franco dos Santos

Vale S.A – Gerência de Planejamento Estratégico, Metais Básicos Atlântico Sul, Mina do Sossego, Pará, Brasil.

Telefone:+55(91)993000303

e-mail: geoaffs@hotmail.com

RESUMO

O complexo Sossego está localizado na porção sul da Província de Carajás, ao longo de uma zona de cisalhamento regional com direção WNW–ESE, com forte mergulho para sul. O mesmo está dividido em 3 setores de oeste para leste denominados de Pista, Sequeirinho/Baiano e Curral/Sossego. As principais litologias hospedeiras que ocorrem no complexo são granitoides, metavulcânicas félsicas e intrusivas máficas e ultramáficas. Esses setores apresentam altos teores de Cu–Au ($> 0.9\%$ Cu). Na primeira etapa do trabalho, o mapeamento geológico de detalhe foi efetuado nas exposições da mina a céu aberto e seguido de descrições de testemunhos de sondagem. Nessa etapa, teve-se intuito de abstrair características descritivas visuais e possíveis assembleias mineralógicas. Na etapa seguinte, foi realizado tratamento dos dados geoquímicos através de diversos diagramas a partir das principais características mineralógicas e composições químicas definidas na etapa anterior, tais como (Si, Na, Al, K, Mg, Fe e Ca) como elementos principais e somados a elementos secundários (Ti, Cr, Ni, Co, Rb, Ce, La, P, V, Y e Cu) no qual definiram parâmetros e limites para caracterização das unidades litogeoquímicas. Os resultados no setor Pista permitiram a definição de 5 unidades litogeoquímicas, onde se destaca as unidades que demonstraram altos valores de sódio e sílica e baixíssimos valores de ferro para zonas mais proximais ao minério. Para o setor Sequeirinho/Baiano se destacam os zonamentos graduais distais até as proximais a mineralização. Nas porções distais, altos valores de sódio, passando gradativamente para valores medianos de sódio e cálcio, chegando a altos valores de Fe–Ca–Mg para as zonas proximais à mineralização. No setor Sossego/Curral vale ressaltar unidades mais distais as mineralizações apresentam valores altos de sódio, mais proximais ao minério ocorrem unidades K–Mg–Fe e unidade ricas em cálcio, para ambos estão associados a mineralização. Para conclusão do trabalho foi gerado um modelamento tridimensional usando técnicas de modelamento implícito para geração de distribuição espacial das unidades e vetores geoquímicos para uma melhor caracterização e entendimento dos fluxos.

Palavras-chave: depósitos do tipo *IOCG*; fluidos hidrotermais; unidades litogeoquímicas; beneficiamento de minério; arqueano; Cráton Amazônico.

6.1 INTRODUÇÃO

A Província Mineral de Carajás (Fig. 6), sudeste do estado do Pará (norte do Brasil), abriga diversos depósitos de classe mundial de óxidos de ferro, cobre, ouro, níquel, metais de base, Cráton Amazônico, entre outros (Santos 1986, DOCEGEO 1988). Esses depósitos, na maioria de idade arqueana, são considerados os únicos de grande porte nessa Era e tem importância bastante relevante na economia do país, na evolução do conhecimento científico sobre o cráton e na modernização da indústria mineral nos âmbitos local e mundial (Tallarico *et al.* 2004, Bettencourt *et al.* 2016, Juliani *et al.* 2016, Xavier *et al.* 2017).

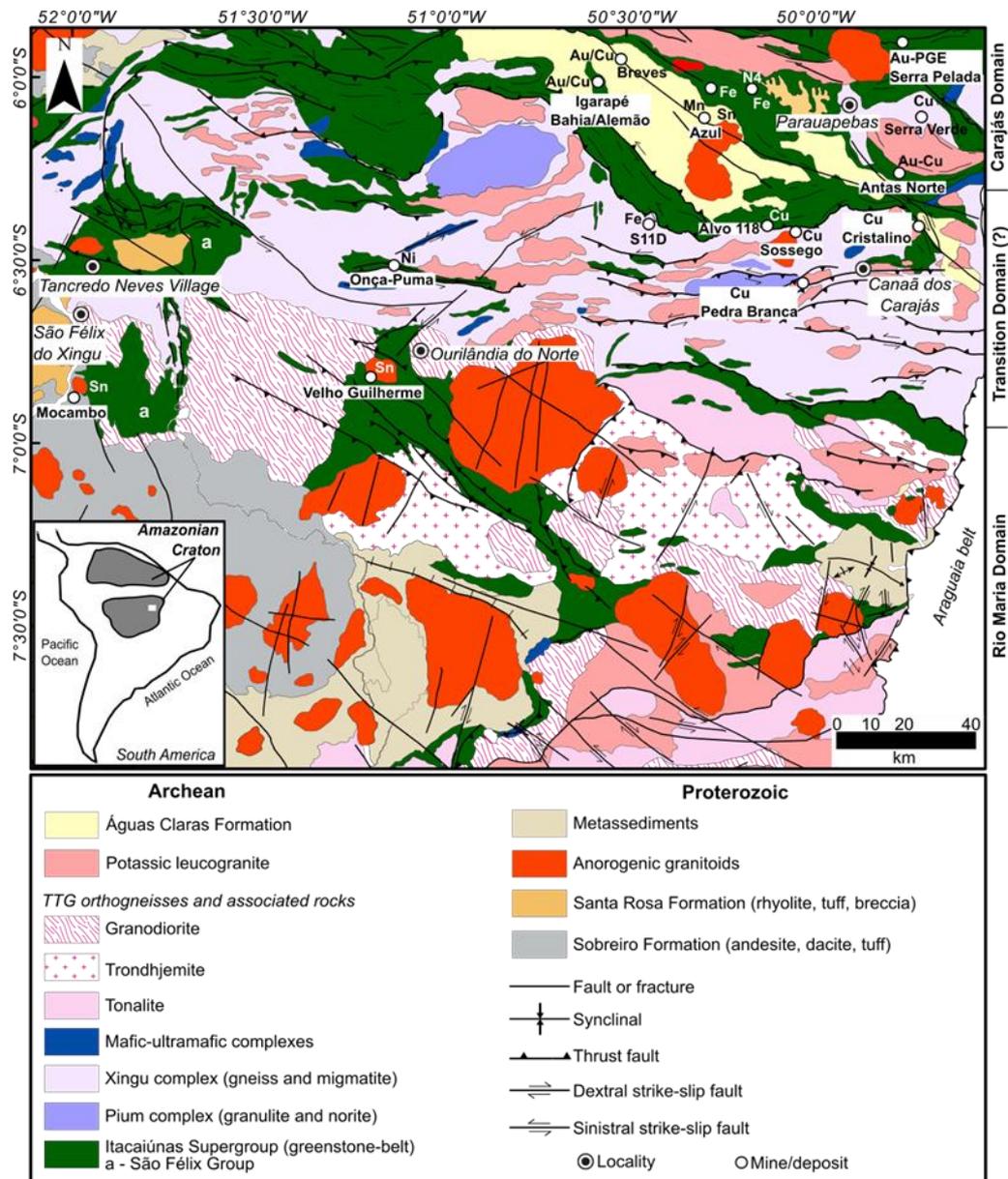


Figura 6 - Mapa geológico simplificado (Fernandes *et al.* 2021) de parte da Província Mineral de Carajás mostrando os seus principais depósitos minerais.

Na porção sul dessa província, ao longo de uma zona de cisalhamento regional WNW–ESE, com forte mergulho para sul (Pinheiro & Holdsworth 1997, Holdsworth & Pinheiro 2000) ocorre uma ampla área mineralizada denominada de “Cinturão Sul de Carajás”. Nela há uma faixa de aproximadamente 5 km de extensão de depósitos de Cu–Au de alto teor (>1 % Cu) que coletivamente formam o Complexo Sossego, denominados como Sequeirinho, Sossego, Pista, Baiano e Curral e atualmente são explotados pela mineradora Vale S.A. Falhas NE e NW seccionam transversalmente o cisalhamento regional e as interseções destas estruturas agem como zonas alimentadoras e hospedeiras para as mineralizações cupro-auríferas (Domingos 2009). Os depósitos do Complexo Sossego (Lancaster *et al.* 2000) são formados geologicamente por granitoides alcalinos equigranulares e granófiros de granulação fina, gabros e dioritos. Ocorrências de alterações hidrotermais pervasivas com albita, biotita, actinolita, carbonato, epídoto e escapolita, junto com magnetita em abundância, formam um envelope quase contínuo circundando a mineralização cupro-aurífera (Monteiro *et al.* 2008, Moreto *et al.* 2015b, a). Os dados geocronológicos mostram que os sistemas de IOCG da Província Mineral de Carajás (PMC) se instalaram no Neoarqueano e Paleoproterozoico durante diversos eventos hidrotermais com formações de mineralizações, no caso Sequeirinho/Baiano e Pista (245 Mt@1,1 % Cu e 0,28 g/t Au), datadas com idades Arqueanas (2,72–2,68 Ga) e Sossego (64 Mt @0,6 % Cu e 0,14 g/t Au) datado como evento Paleoproterozoico (1.90–1.88 Ga) (Moreto *et al.* 2011, 2015b).

Desde o início do desenvolvimento da lavra dos setores Pista, Sequeirinho/Baiano e Sossego/Curral foram identificadas dificuldades operacionais com a ausência de integração dessas alterações hidrotermais com os dados geoquímicos e seus vetores. Esses problemas ocasionam a falta de previsibilidade dos corpos de minério menores ou não mapeados no modelamento geológico, proporcionando divergências nas reconciliações estatísticas entre operação e planejamento de mina. Além disso, há inconsistências da litologia e as variabilidades dos zonamentos geoquímicos resultantes de processos hidrotermais que são apresentados nos modelos litológicos e compartilhados, gerando ineficácias em alguns setores da lavra e no beneficiamento. Assim, os dados disponíveis permitem a elaboração de um modelo de zonamento das alterações hidrotermais por meio de suas assinaturas geoquímicas que auxiliem no planejamento de mina e beneficiamento do minério.

O objetivo desse artigo é contribuir com o entendimento litológico, estrutural e geoquímico do Complexo Sossego (setores Pista, Sequeirinho/Baiano e Sossego/Curral) com um modelo 3D que mostre as distribuições espaciais e relações geoquímicas por meio de vetores.

Esses resultados fornecerão subsídios para os estudos geometalúrgicos que permitam interpretações geotécnicas baseadas na qualidade do material, bem como orientar na seleção dos materiais a serem carregados e desmontados. Na usina fornecerá as características composicionais químicas do minério que permitem a definição de proporções ideais para melhor processamento.

6.2 CONTEXTO GEOTECTÔNICO DO CRÁTON AMAZÔNICO

O estudo da evolução do Cráton Amazônico ainda é controverso, polêmico e desafiador. Historicamente, com base em dados estruturais e geofísicos, tem sido considerado uma grande plataforma arqueana retrabalhada durante o evento Transamazônico (Hurley *et al.* 1967, Almeida *et al.* 1981). Dados isotópicos de Sm-Nd, U-Pb e Pb-Pb (*TIMS*) permitiram outros pesquisadores a interpretá-lo como um produto de sucessivos eventos de acreção relacionados a ambientes orogênicos do tipo arcos de ilha em torno do núcleo arqueano da Província Mineral de Carajás. O cráton foi então dividido em seis (Tassinari & Macambira 1999) ou sete (Santos *et al.* 2000) províncias geocronológicas.

Modelo alternativo foi desenvolvido para a parte sul do cráton com base em dados geológicos, geocronológicos e metalogenéticos (Fernandes *et al.* 2011, Fernandes & Juliani 2019, Juliani *et al.* 2021), que sugere a existência de possível zonamento (2,0–1,88 Ga) das mineralizações de Au–Cu–Mo do tipo pórfiro, epitermais de Au–Ag, e metais de base relacionados a granitoides do tipo I e A. Este zonamento se estende desde a Província Mineral do Tapajós até São Félix do Xingu (PA) e pode estar relacionado à zona de subducção do tipo andina aproximadamente E–W com a geração inicial de magmatismo cálcio-alcálico de alto potássio. Nesse contexto a ocorrência das associações cálcio-alcálicas mais jovens (1,88 Ga) na região de São Félix do Xingu pode ser explicada pela diminuição no ângulo da placa subductada, evento esse conhecido como *flat subduction* (Sacks 1983), como descrito no Cinturão Vulcânico Trans-Mexicano (Ferrari *et al.* 1999) e no Cinturão Andino (Kay *et al.* 2005).

Estudos geofísicos corroboram esta interpretação para a Província Mineral do Tapajós (Carneiro *et al.* 2019). O *trend* regional NW–SE nesta província está relacionado a grandes falhas e zonas de cisalhamento transcorrente que controlaram a colocação de associações vulcano-plutônicas félsicas pós-tectônicas, enquanto estruturas E–W são significativas na porção norte. Essas estruturas apresentam características aeromagnetométricas que sugerem

maior penetrabilidade crustal. O caráter mais profundo dessas estruturas E–W, inferido a partir do campo magnético residual, revela o sentido mais provável do cinturão móvel e arcos magmáticos mais antigos gerados na porção sul do Cráton Amazônico. Dados geocronológicos recentemente obtidos para esta região permitiram a definição de novos arcos magmáticos, conhecidos como Arcos Tapajônicos (Juliani *et al.* 2015, Tokashiki *et al.* 2015).

6.3 SÍNTESE SOBRE A GEOLOGIA DA PROVÍNCIA MINERAL DE CARAJÁS

A Província de Carajás, leste do Cráton Amazônico, foi dividida nos domínios Rio Maria e Carajás (Dall’Agnol *et al.* 2006, Feio *et al.* 2013, Oliveira 2018). Um Domínio de Transição semelhante ao Domínio Rio Maria, que foi intensamente afetado pelos eventos neoarqueanos tectônicos e magmáticos, foi proposto entre esses domínios (Dall’Agnol *et al.* 2006). O limite, no entanto, é impreciso, controverso e estimula uma discussão acalorada sobre o assunto (Feio & Dall’Agnol 2012, Feio *et al.* 2013, Silva *et al.* 2015, Lacasse *et al.* 2020).

O Domínio Rio Maria abrange *greenstone belts* mesoarqueanos (3,04–2,97 Ga); suítes TTG formadas em 2,98–2,92 Ga e 2,96 Ga; séries sanukitoides ricas em Mg (2,87 Ga); anfibólio-biotita cálcio-alcálico monzogranito, leucogranodiorito, granito, leucogranito potássico (2,87–2,86 Ga) e bacias sedimentares paleoproterozoicas (Macambira & Lancelot 1996, Althoff *et al.* 2000, Souza *et al.* 2001, Almeida *et al.* 2011). Intrusões gabroicas proterozoicas, diabásio e coberturas sedimentares continentais ocorrem localmente. Por sua vez, o Domínio Carajás compreende principalmente granitoides mesoarqueanos cobertos por rochas neoarqueanas da Bacia de Carajás, incluindo formações ferríferas bandadas de 2,76–2,74 Ga e amplo magmatismo contemporâneo (Gibbs *et al.* 1986, Machado *et al.* 1991, Trendall *et al.* 1998). Sequência metassedimentar de baixo grau com camadas alternadas de arenito, siltito e pelito depositada em ambiente fluvial a marinho raso (Formação Águas Claras) capeia sucessões vulcano-sedimentares (Nogueira *et al.* 1995, Araújo Filho *et al.* 2020). Rochas mesoarqueanas como gnaisses do tipo TTG e migmatitos geneticamente associados (3,06 Ga), granulitos máficos e félsicos (3,0 Ga), tonalito-granodiorito cálcio-alcálico (3,00 Ga), *greenstone belts* (2,97 Ga) e granitoides (2,96 Ga e 2,87–2,83 Ga) foram formados em um ambiente de arco magmático sin-colisional (Pidgeon *et al.* 2000, Feio *et al.* 2013, Bettencourt *et al.* 2016). Eventos metamórficos de médio a alto grau que afetaram a região de Carajás em 2,96 e 2,86 Ga coincidiram com o magmatismo granítico mesoarqueano (Machado *et al.* 1991, Silva *et al.* 2015, Tavares *et al.* 2018). Diques máficos e félsicos relacionados a eventos

vulcano-plutônicos anorogênicos do tipo A (1,88–1,86 Ga) ocorrem em ambos os domínios e são disseminados por todo o Cráton Amazônico (Lafon *et al.* 1995, Dall’Agnol *et al.* 2005, Juliani & Fernandes 2010). Depósitos aluvionares completam a estratigrafia.

Os dados disponíveis apontam para a existência de eventos metamórficos policíclicos e distintos no núcleo arqueano da Província Mineral de Carajás. Um evento anatético de ~2,85 Ga foi identificado por datação U-Pb em zircão de gnaiss granítico (Machado *et al.* 1991). O mesmo método aplicado em gnaiss ortopiroxênio-diopsídio de alto grau metamórfico (~3,06 Ga) e seu leucossoma (~ 2,95 Ga) mostrou a geração de metatexito e diatexito (Silva *et al.* 2015). Estudos detalhados compreendendo petrografia e geocronologia U-Pb de zircão (LA-ICPMS) aplicada a gnaisses e rochas relacionadas apontam para anatexia (2,88–2,86 Ga) das rochas do embasamento mesoarqueano no nordeste do Domínio Carajás (Faustinoni *et al.* 2016). Dados integrados estruturais, petrológicos e de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ sugerem dez estágios evolutivos durante o Mesoarqueano e Mesozoico para o nordeste da Província Mineral de Carajás (Tavares *et al.* 2018). Cinco estão relacionados à extensão regional e alterações magmático-hidrotermais, e outros cinco a processos compressivos e orogênicos. O primeiro evento destacado é a colisão entre os blocos (2,87–2,83 Ga) Rio Maria–Carajás (Faixa de Cisalhamento Itacaiúnas); a segunda é a extensão que levou à formação da Bacia de Carajás (2,76–2,68 Ga), e a terceira é uma etapa compressiva da inversão da Bacia de Carajás e reativação da Faixa de Cisalhamento Itacaiúnas (2,68–2,63 Ga).

6.4 GEOLOGIA E ALTERAÇÕES HIDROTERMAIS DO COMPLEXO SOSSEGO

Os depósitos do tipo *IOCG* (*iron oxide copper-gold*) (Hitzman *et al.* 1992) do Complexo Sossego (Lancaster *et al.* 2000) estão localizados ao sul da Província Mineral de Carajás, ao longo de uma zona de cisalhamento regional WNW–ESE de 2,76 Ga com forte mergulho para sul (Wirth *et al.* 1986, Machado *et al.* 1991, Morais & Alkmin 2005) e que está em contato com várias gerações de granitoides arqueanos isotrópicos, ou foliados ou metamorfisados em fácies xisto verde a anfíbolito por eventos regional a dinâmico (Machado *et al.* 1991, Jesus *et al.* 2015, Tavares *et al.* 2018). Esse complexo contém depósitos cupro-auríferos de alto teor (>0.9 % Cu) descobertos em 1997 (Fig. 7A) denominados Sequeirinho, Sossego, Pista, Baiano e Cural. Falhas NE e NW afetaram transversalmente esse cisalhamento regional e a interseção desses atuaram como zonas alimentadoras e hospedeiras das mineralizações (Domingos 2009).

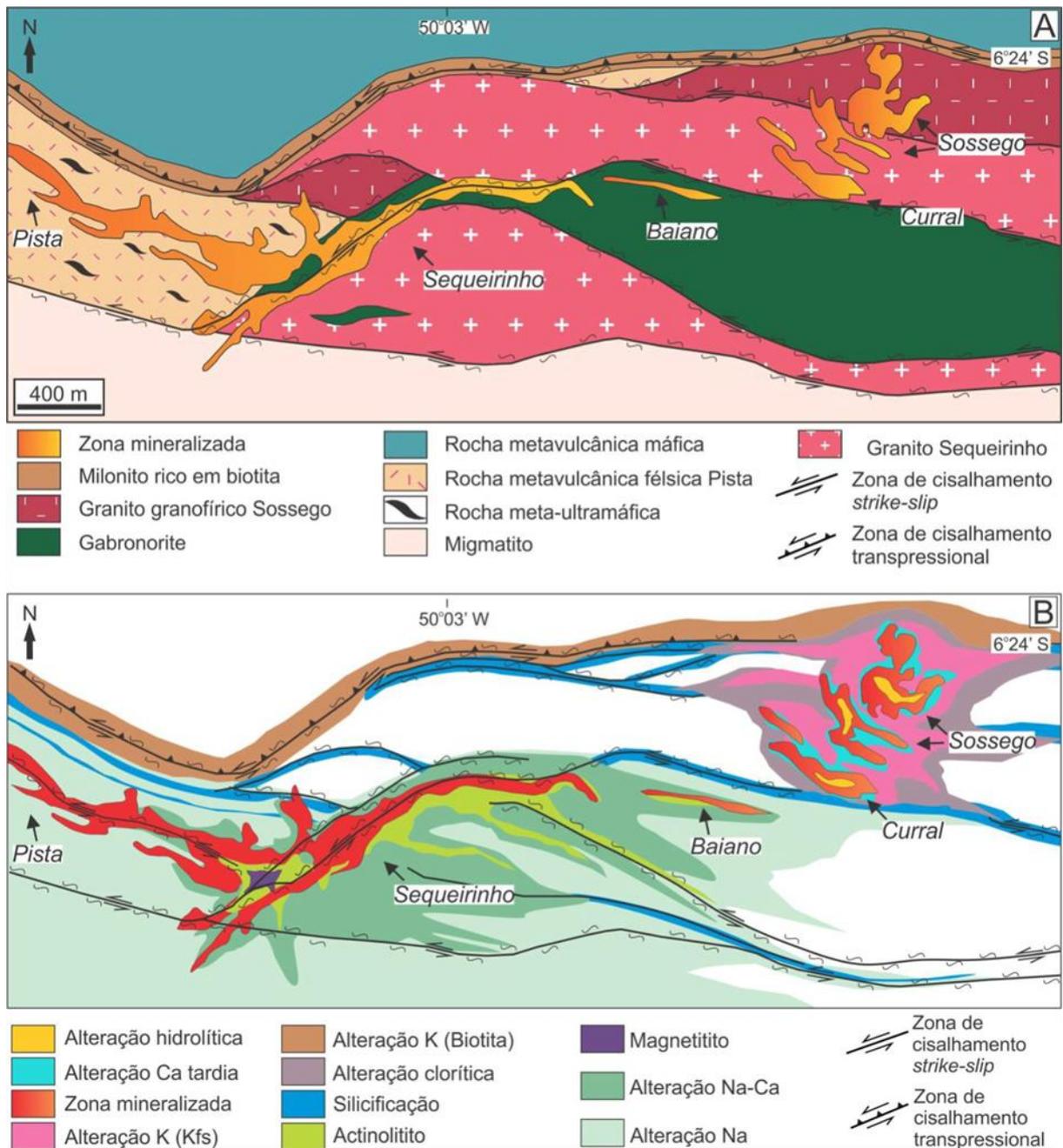


Figura 7 - A) Mapa geológico simplificado do Complexo Sossego (Monteiro *et al.* 2008); B) Distribuição esquemática das zonas de alteração hidrotermais na Mina Sossego.

O Complexo Sossego é formado predominantemente por granitoides alcalinos equigranulares, granófiros, gabros e dioritos (Villas *et al.* 2005, Monteiro *et al.* 2008, Moreto *et al.* 2011). O setor Sossego/Curral são formados por granitoides finos a médios, com tendência mais máfica, variando de granito a granodiorito que gradam para álcali-feldspato granito leucocrático e granófiro. Localmente afloram diques de diabásio e de gabro, orientados segundo WNW–ESSE. A área do setor Sequeirinho/Baiano revela predomínio de rochas graníticas a sul, vulcânicas félsicas a oeste, brechas heterolíticas na parte central com faixas estreitas e contínuas

de actinolitos e a norte ocorrem intrusões gabroicas e lentes de quartzo-clorita-biotita xisto. No setor Pista predominam dacito, andesito e lentes de ultramáficas metamorfasadas e hidrotermalizadas em diferentes graus. Diques de diabásio, gabro e aplito invadem toda a área do complexo (Monteiro *et al.* 2008, Moreto *et al.* 2011).

No geral, o Complexo Sossego revela alterações hidrotermais de diferentes tipos (Fig. 7B), estilos e intensidade (Monteiro *et al.* 2008, Moreto *et al.* 2015b, a), que em conjunto formam um envelope quase contínuo que circunda a mineralização cupro-aurífera (Tallarico *et al.* 2004, Villas *et al.* 2005, Xavier *et al.* 2012). Nos setores Sequeirinho/Baiano e Pista ocorre a predominância de alteração sódica (albita+hematita) ou sódico-cálcica (actinolita+albita+titanita+epídoto+allanita) que gradam para alterações cálcica e cálcico-férrica (Monteiro *et al.* 2008). São identificadas ainda zonas de alteração potássica no *footwall* da mineralização e seccionando outras do tipo sódico-cálcicas (Moreto *et al.* 2015a). Por sua vez, no setor Sossego/Curral ocorrem zonas com predominância de alterações potássica, principalmente pela formação de feldspato potássico e biotita rica em cloro, que substituem minerais do granófiro fino que hospeda as mineralizações (Moreto *et al.* 2013). As ocorrências de alteração clorítica são observadas em halos externos, ao passo que alteração hidrolítica com sericita, hematita e quartzo é típica de partes bastante rasas de sistemas do tipo *IOCG* (Hitzman *et al.* 1992, Hitzman 2000). Em grande parte, os corpos de minério estão associados às alterações potássico-clorítica (Carvalho *et al.* 2005, Williams *et al.* 2005, Monteiro *et al.* 2008, Moreto *et al.* 2015a).

6.5 MÉTODOS

Foram utilizados 55 furos representativos de sondagem (27 do setor Pista, 16 do Sequeirinho/Baiano e 12 do Sossego/Curral) que fazem parte do portfólio da Vale S.A. Descrições petrográficas de detalhe revelaram feições ígneas, metamórficas ou hidrotermais das rochas encaixantes e da mineralização.

Os dados geoquímicos compreendem 7834 análises em rocha total (Sequeirinho/Baiano 2963, Pista 2313 e Sossego/Curral 2558) realizadas no Laboratório *ALS Minerals* (Brasil) com o seu pacote padrão de elementos ME-MS61 e leituras por *ICP-MS* para elementos maiores e traço. No Laboratório do Sossego (Brasil) foram realizadas análises para Cu total, Fe, Ni e Ag-Abertura ácida, com finalização em EAA (Espectrometria de absorção atômica); Au-*Fire Assay*

(Ensaio ao fogo–fusão e copelação), com finalização em EAA (Espectrometria de Absorção Atômica); e S–Analisador Simultâneo por Infravermelho.

O tratamento estatístico dos dados foi realizado nos *softwares IoGAS 7.3 Reflex*, com base em diagramas binários, de probabilidade, *Boxplots* e ternários para definições de grupos de elementos químicos com técnicas de estatística multivariada na busca de vetores geoquímicos específicos para as zonas hidrotermais e delimitação das características específicas da mineralização. Essa análise é baseada em elementos químicos contidos nos minerais dos depósitos, como Si, Na, Al, K, Mg, Fe e Ca, somados a outros como Cr, Ni, Co, Rb, Ce, La, P, Cu. A etapa final compreendeu o modelamento 3D no *software LEAPFROG 2021.2.4* a partir das avaliações geoestatísticas e definições dos prováveis vetores geoquímicos e zonamentos hidrotermais.

6.6 LITOGEOQUÍMICA, MINERALIZAÇÕES E UNIDADES HIDROTERMAIS

As descrições dos testemunhos de sondagem e dados petrográficos permitiram a separação de minerais hidrotermais índices presentes nos três setores do Complexo Sossego, tais como: albita, escapolita, clorita, actinolita, tremolita, biotita, epidoto, turmalina, feldspato potássico, quartzo, apatita, talco, titanita, carbonatos, allanita e sulfetos. As principais variáveis químicas das litologias utilizadas como suportes fundamentais foram os elementos químicos maiores tais como Na, Al, K, Mg, Fe e Ca.

As relações das unidades litogeoquímicas com as mineralizações foram comparadas, classificadas e definidas de acordo com as faixas de teores praticadas nas operações do complexo. Essas faixas são definidas em estudos estatísticos de características das populações, estilo do minério (disseminados, veios/vênulas, brechas e/ou maciços), viabilidade econômica e planejamento operacional definidos por profissionais qualificados (*QP–Qualify Person*) responsáveis pelas avaliações de recurso e reserva da Mina do Sossego. As faixas de teores de Cu utilizadas na mina com guias de controles de teores no planejamento e alimentação da planta de beneficiamento variam em: estéril (*Est*): $0,06 \leq \text{Cu} < 0,2 \%$; mineralização de baixo teor (*Ore*): $0,2 \leq \text{Cu} < 1 \%$; e mineralização de alto teor: $\text{Cu} \geq 1 \%$. Essas informações permitiram a geração de diagramas binários comparando elementos químicos diversos e unidades geoquímicas definidas com as faixas de teor de Cu, buscando definir quais grupos e vetores estariam associados direta e indiretamente com a mineralização dos depósitos do Complexo Sossego.

6.6.1 Unidades geoquímicas e zonamento hidrotermal do setor Pista

No setor Pista as rochas predominantes são metavulcânicas félsicas. Elas apresentam lentes de rochas metaultramáficas, bem como diques de gabro. No geral revelam marcante foliação milonítica, além de silicificação que é síncrona à foliação metamórfica ou posterior, sugerindo ao menos dois eventos dessa natureza. As rochas metaultramáficas apresentam paragêneses retro-metamórficas e apresentam aspecto sedoso (talco/tremolita) e são compostas predominantemente por talco (12 %), olivina (60 %), crisotila (25 %) e magnetita (3 %). O gabro mostra granulação média a grossa e textura subofítica frequente. Apresenta piroxênio, hornblenda e plagioclásio euédricos, com forte magnetismo e porções intensamente hidrotermalizadas (actinolita, magnetita, biotita, epidoto e escapolita). As amostras dos testemunhos de sondagem revelam as características e os principais estilos de mineralização de calcopirita, pirita, molibdenita e pirrotita, tais como: a) na forma de *strings ore* (lentes de minério com sulfetos muito finos) ao longo da foliação milonítica; b) como níveis sulfetados associados às zonas de silicificação concordantes ou não com a foliação milonítica; c) como disseminações associadas a quartzo e/ou turmalina; d) em fraturas que seccionam as zonas silicificadas e foliação milonítica; e) em veios com quartzo e calcita com textura de preenchimento de espaços abertos; e f) na matriz de brechas hidrotermais semelhantes àquelas descritas no setor Sequeirinho/Baiano. A integração dos dados permitiu a definição das unidades geoquímicas sódica, sódico-sílica, potássico-clorítica, magnésiana e feldspática potássica (Figs. 8–11).

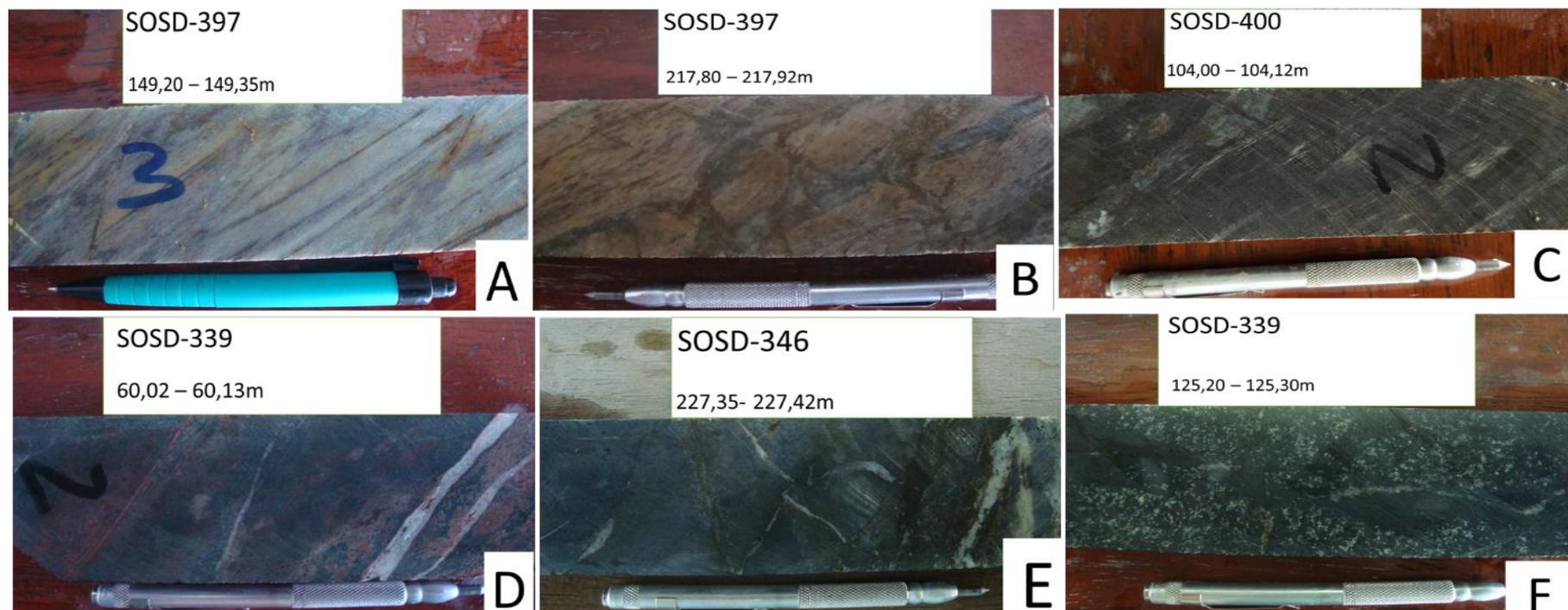


Figura 8 - Litotipos do setor Pista representativos dos grupos definidos pelos dados geoquímicos por meio da estatística multivariada. (A) unidade sódica-sílica (Si-Na); (B) sódica (Na); (C) unidade potássico-clorítica (Mg-Fe-K(Ca)); (D) unidade feldspática potássica (E); unidade magnésiana (alto Mg); e (F) gabro com vênulas ricas em actinolita e calcita.

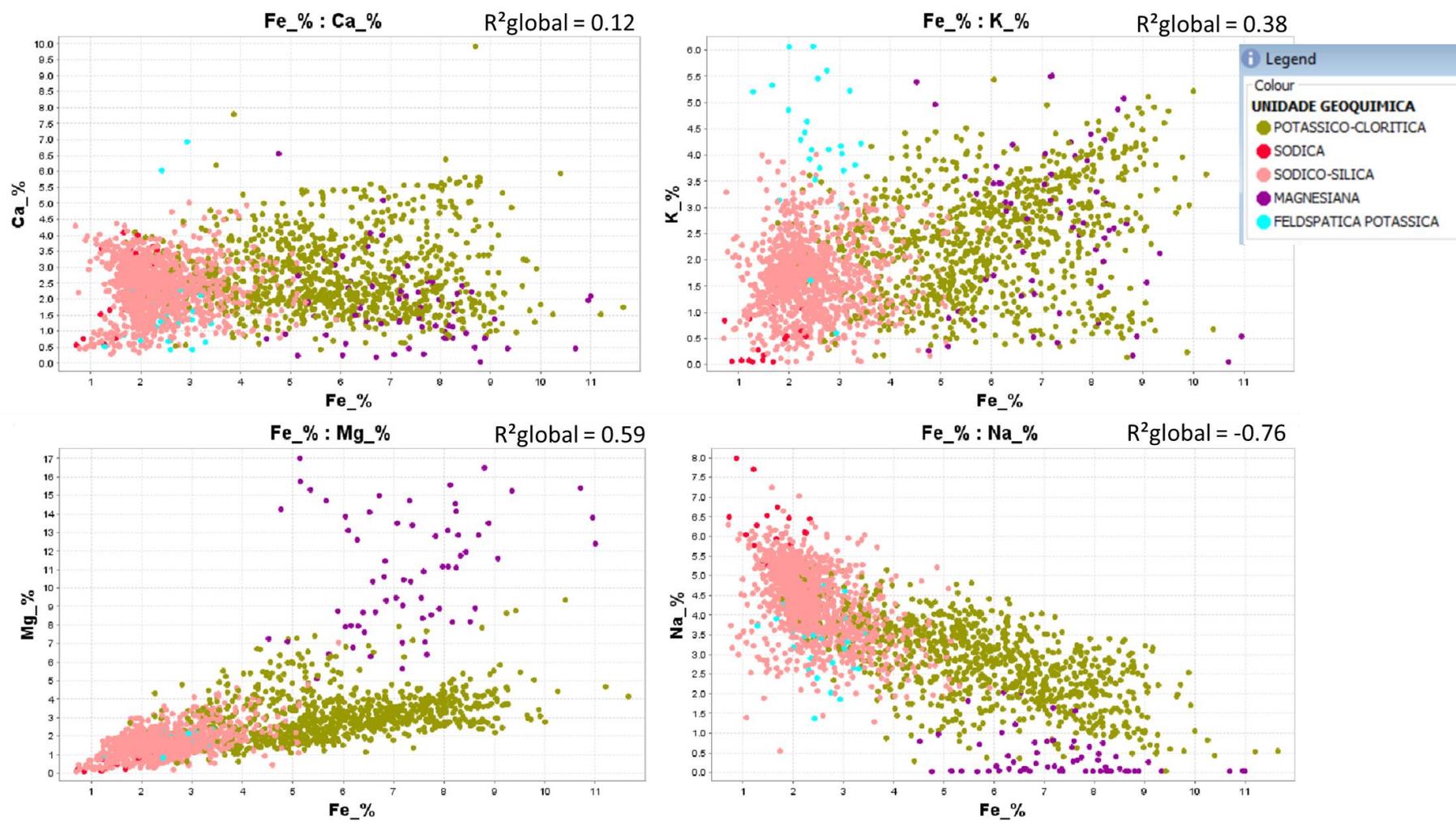


Figura 9 - Diagramas de correlação do setor Pista mostrando as unidades geoquímicas definidas pelos cruzamentos de dados Fe (%) x Ca (%), Fe (%) x K (%), Fe (%) x Mg (%) e Fe (%) x Na (%).

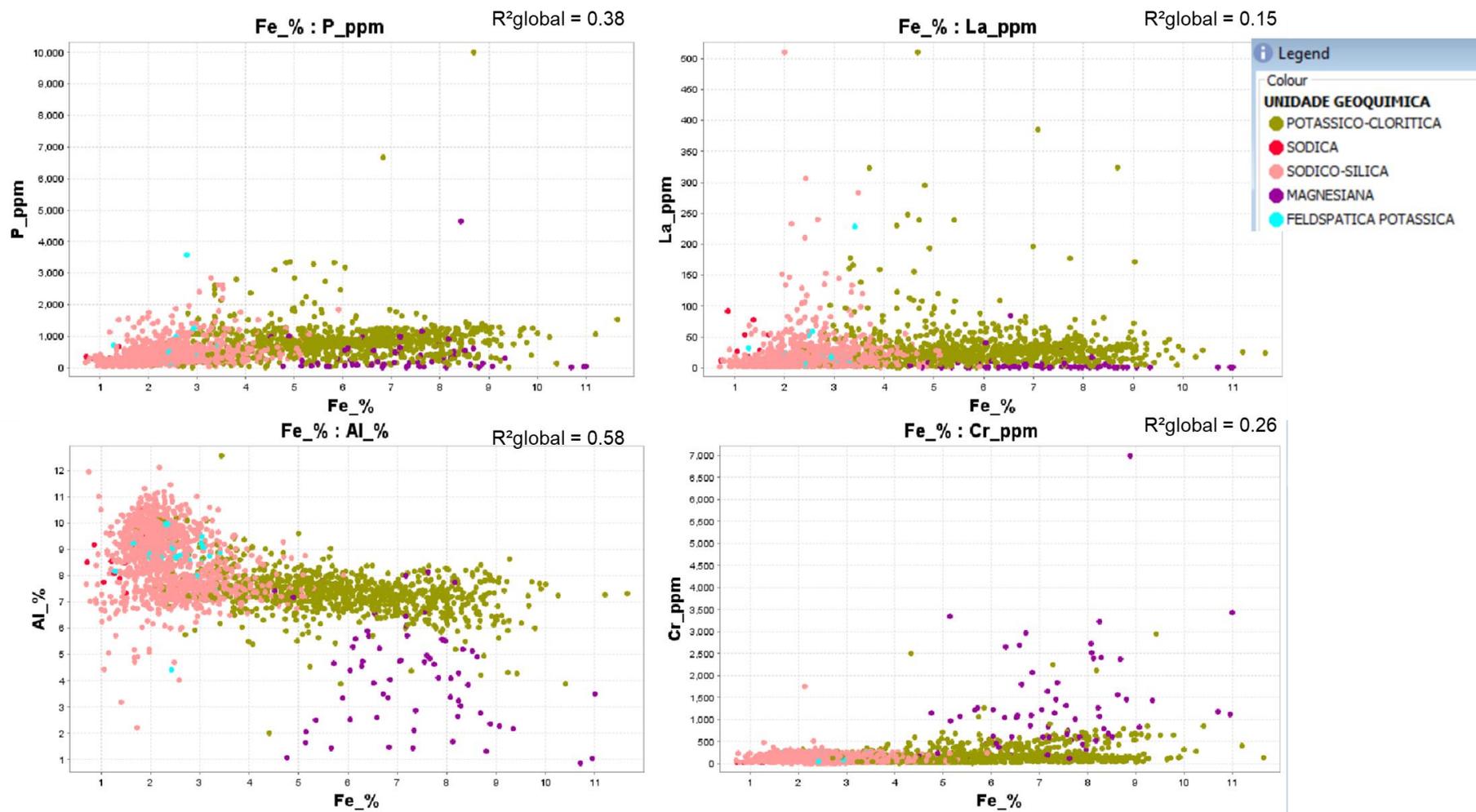


Figura 10 - Diagramas de correlação do setor Pista mostrando as unidades geoquímicas definidas pelos cruzamentos de dados Fe (%) x P (ppm), Fe (%) x La (ppm), Fe (%) x Al (%) e Fe (%) x Cr (ppm).

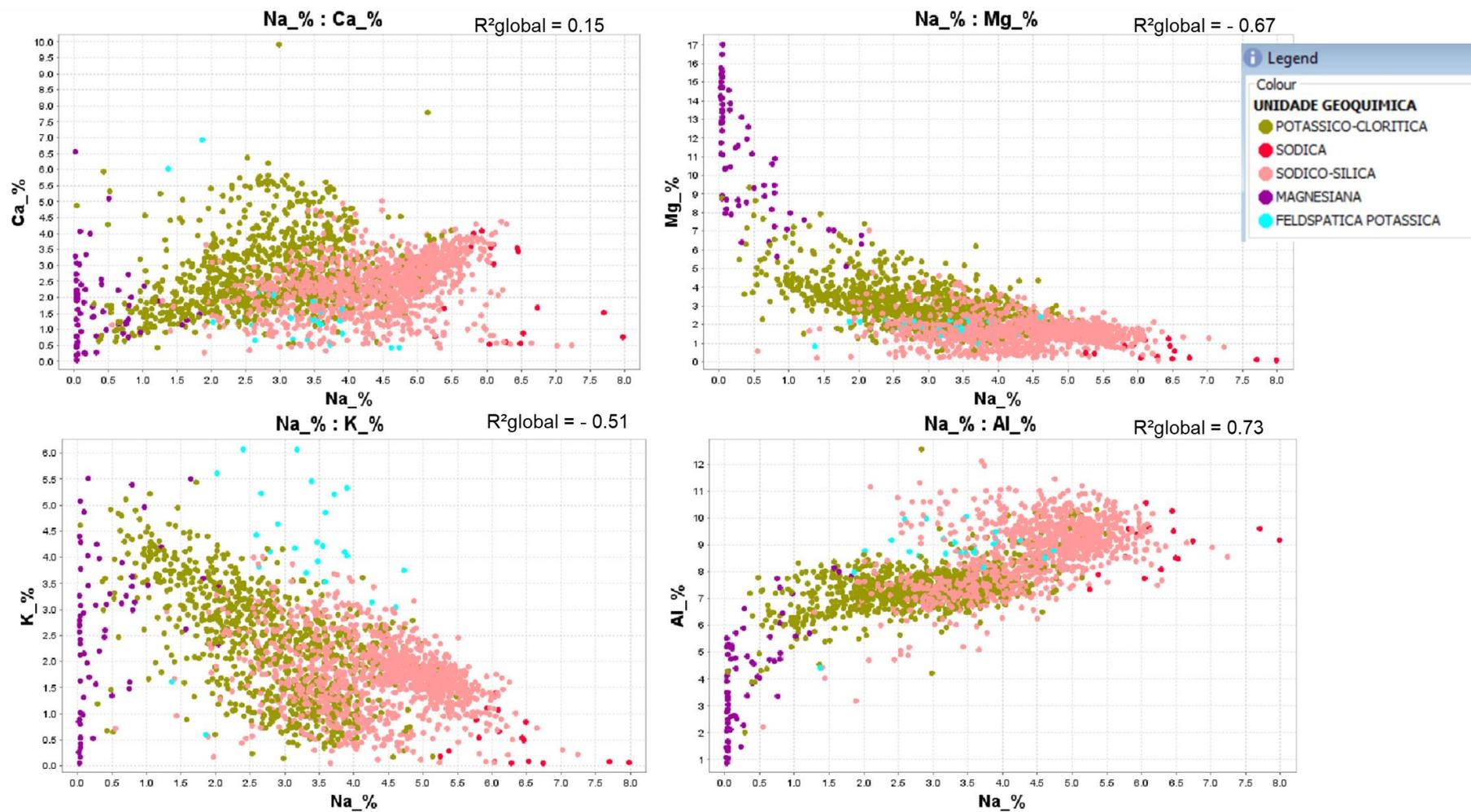


Figura 11 - Diagramas de correlação do setor Pista mostrando as unidades geoquímicas definidas pelos cruzamentos de dados Na (%) x Ca (%), Na (%) x Mg (%), Na (%) x K (%) e Na (%) x Al (%).

A unidade sódica (37–50% de SiO₂) corresponde às rochas vulcânicas félsicas e silicificadas com baixos teores de Fe (<4,0 %), Mg (<4,0 %) e Na (>3,0 %). Predominam cristais de quartzo com subordinados cristais de feldspato potássico, biotita, clorita, albita, escapolita e epídoto. Essa unidade teve boas correlações com Ca x Fe ($r^2=0.73$), Ca x K ($r^2=0.72$), Fe x Mg ($r^2=0.86$), Ca x Mg ($r^2=0.84$).

A unidade sódico-sílica é relacionada às rochas silicosas (>50% de SiO₂) com alteração albitica e mostra teores relativamente elevados de Na (2,0–6,0 %) e baixos de Fe, Mg (2,0–6,0 %) e K (1,0–4,0 %). Predominam cristais de quartzo e albita, ao passo que clorita, escapolita, epídoto e biotita são subordinados. A unidade apresentou baixas correlações entre os elementos, apresentando melhor resultado para Fe x Na ($r^2=0.46$).

A unidade potássico-clorítica é fortemente foliada com veios e vênulas de quartzo, formando localmente bandas com porções de cor verde-escuro (biotita, clorita, anfibólios (actinolita–tremolita) e quartzo). As melhores correlações que essa unidade apresentou foram K x Ca ($r^2=0.70$), Na x Fe ($r^2=-0.64$) e Mg x Na ($r^2=-0.59$). A mineralização nessa unidade ocorre como *strings* que acompanham a foliação milonítica, bem como disseminada e associada a veios e vênulas de quartzo. Usualmente os teores de Cu são baixos (0,2–0,5 % Cu). Os elementos maiores revelam conteúdos médios a elevados de Fe (5,0–8,0 %) e K (2,0–5,0 %), médios de Mg (3,0–7,0 %) e elevados de Al (6,0–9,0 %). Em relação aos elementos traço, ser observa altos teores de Co (107 ppm), Ag (0,74 ppm), Ti (0,56 %), V (280 ppm), Li (50 ppm) e teores médios de Ni (377 ppm), Bi (0,08 ppm), P (1080 ppm), Sn (8,5 ppm) e S (0,91 %).

A unidade magnésiana está claramente definida nos diagramas de correlação Na x Fe, Mg x Fe, Al x Fe, Fe x Cr, Na x Ca, Na x Mg, Na x K e Na x Al nos quais se destaca em relação às demais (Fig.9, 10 e 11). Corresponde às rochas ultramáficas compostas de talco e tremolita/actinolita. A mesma revelou maior correlação para Na x Mg ($r^2=-0.67$), onde houve boas definições geoquímicas com base em elementos maiores, tais como Fe (>7,0 %), Cr (> 706 ppm) e Mg (>7,0 %). Apresenta conteúdos elevados de Co (75 ppm), Ni (560 ppm) e V (189 ppm), porém teores baixos para os demais elementos, principalmente Cu (0,2 a 0,6%), Mo (0,76 ppm), S (0,19 ppm), P (220 ppm), In (0,02 ppm), Bi (<0,005 ppm).

A unidade feldspática potássica ocorre associada à unidade silícica e contém conteúdo elevado de K (>3,5 %) e relativamente baixos de Fe e Mg (<6,0 %). Predomina feldspato potássico oriundo de rocha vulcânica félsica e de origem hidrotermal. As correlações tiveram bons resultados para K x Ca ($r^2=-0.75$), Mg x Fe ($r^2=0.67$) e Ca x Na ($r^2=-0.62$). Nessa unidade ocorrem maioria dos elementos químicos presentes em todas as unidades descritas acima,

principalmente Co (54 ppm), Nb (10 ppm), In (0,15 ppm), Te (0,2 ppm) e Sn (7,6 ppm), além de variáveis conteúdos de Cu (0,2–0,5 %). Essas características sugerem que os fluidos tardios, responsáveis pelo desenvolvimento dessa unidade geoquímica, possivelmente remobilizaram os elementos contidos nas rochas que hospedam aquelas unidades previamente definidas.

O tratamento geoquímico dos elementos Ca, Fe, K, Mg, Na, P, Ag, Cu, In, Mo, Ce e La revelaram que no setor Pista as unidades sódica e sílico-sódica são às quais se associam a maior parte do minério de Cu de alto (>0,9 % Cu) e médio (0,5–0,9 % Cu) teores (Figs. 12– 13). Além disso, ocorrem associados metais raros e de base, tais como Au (0,2 ppm), Ag (0,21 ppm), Mo (3,44 ppm), Ce (17,35 ppm), In (0,19 ppm), La (9,9 ppm) Sn (11 ppm) e Bi (0,12 ppm). Ressalta-se que os níveis com alto conteúdo de sulfetos estão associados diretamente às zonas extremamente silicificadas, embora também ocorram zonas estéreis com as mesmas características silicificadas.

Após as definições das unidades geoquímicas e tratamentos geoestatísticos dos elementos químicos que se destacaram nas análises multivariáveis por meio de gráficos de probabilidade, binários e principalmente *Boxplots* (Figs. 14–21), foram possíveis separar elementos químicos que se destacaram para cada unidade e assim sinalizar prováveis vetores geoquímicos de acordo com teores e distribuições espaciais para cada unidade do Setor Pista (Tabela 1).

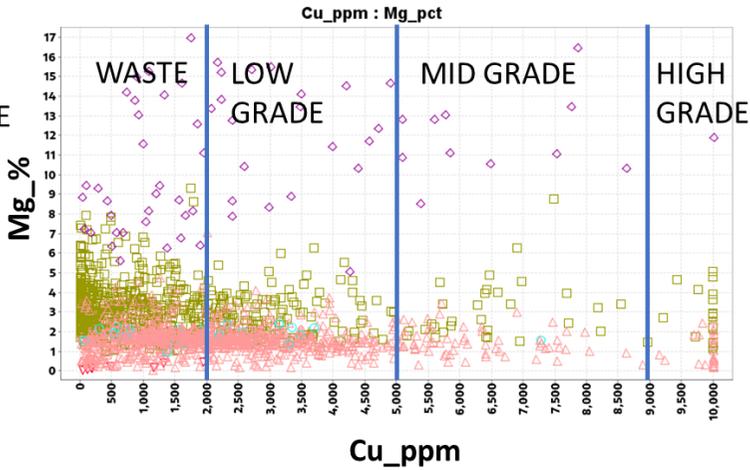
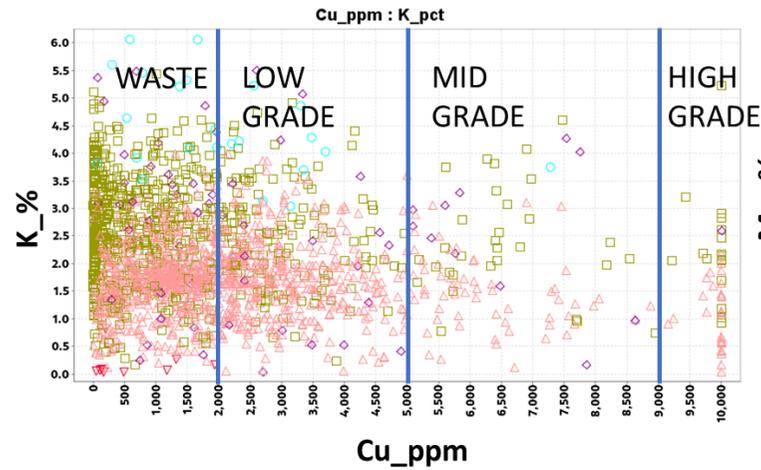
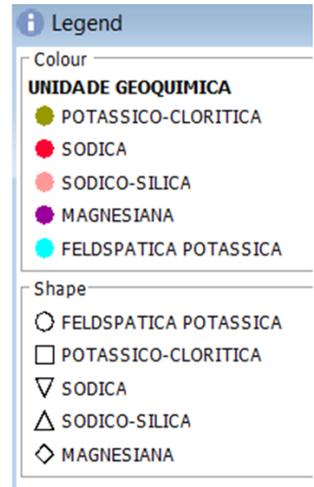
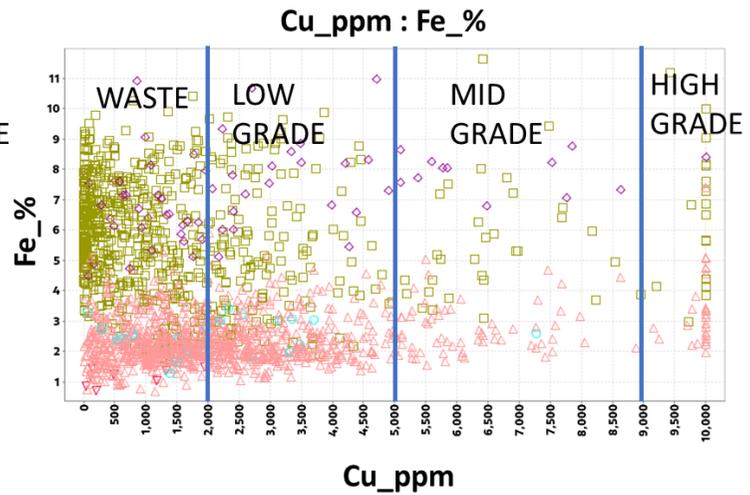
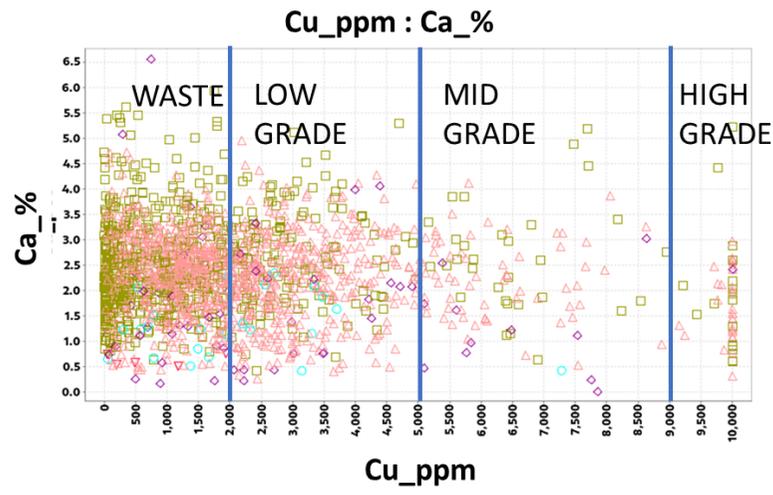


Figura 12 - Diagramas de dispersão (Unidades geoquímicas x teores de Cu do setor Pista) utilizados para definir quais unidades geoquímicas tem relação com teores de corte utilizados na mina para definição de rochas estéril (<0,2 % Cu), baixo (>0,2 % Cu <0,5), médio (>0,5 % Cu <0,9) e alto teor (>0,9 % Cu).

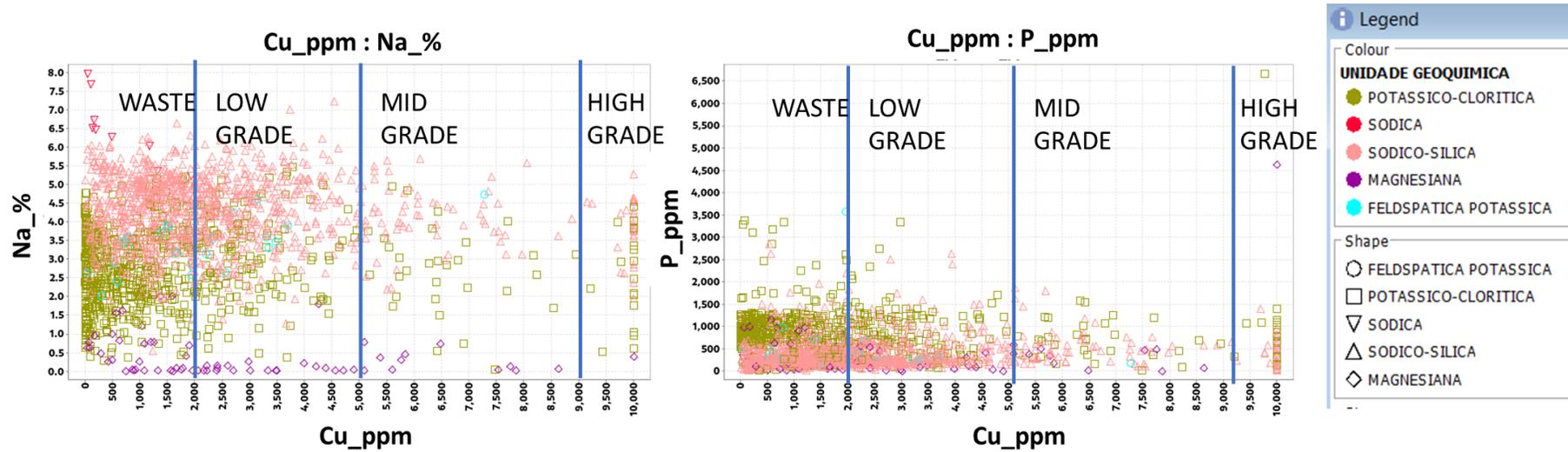


Figura 13 - Diagramas de dispersão (Unidades geoquímicas x teores de Cu do setor Pista) utilizados para definir quais unidades geoquímicas tem relação com teores de corte utilizados na mina para definição de rochas estéril (<0,2 % Cu), baixo (>0,2 % Cu <0,5), médio (>0,5 % Cu <0,9) e alto teor (>0,9 % Cu).

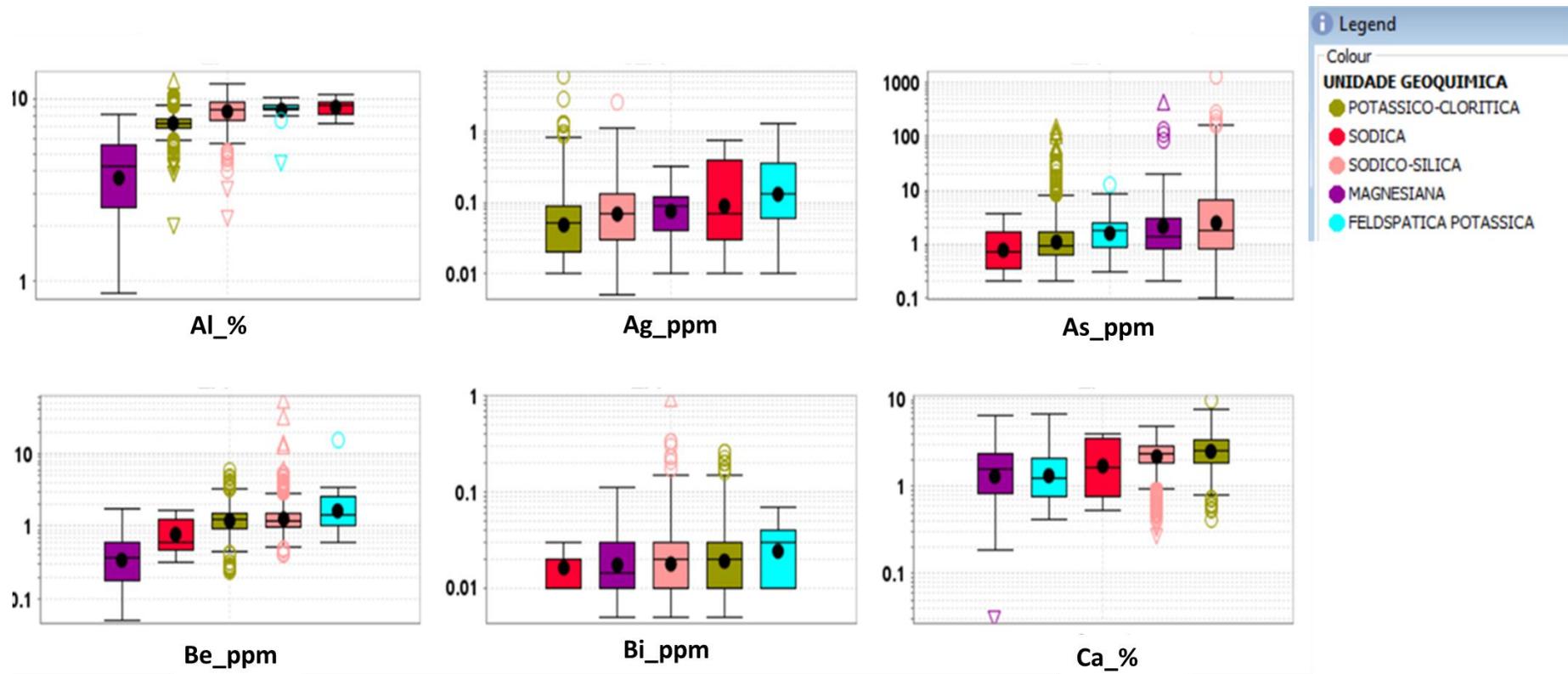


Figura 14 - Boxplots das unidades geoquímicas definidas do setor Pista com as distribuições estatísticas para Al, Ag, As, Be, Bi, Ca.

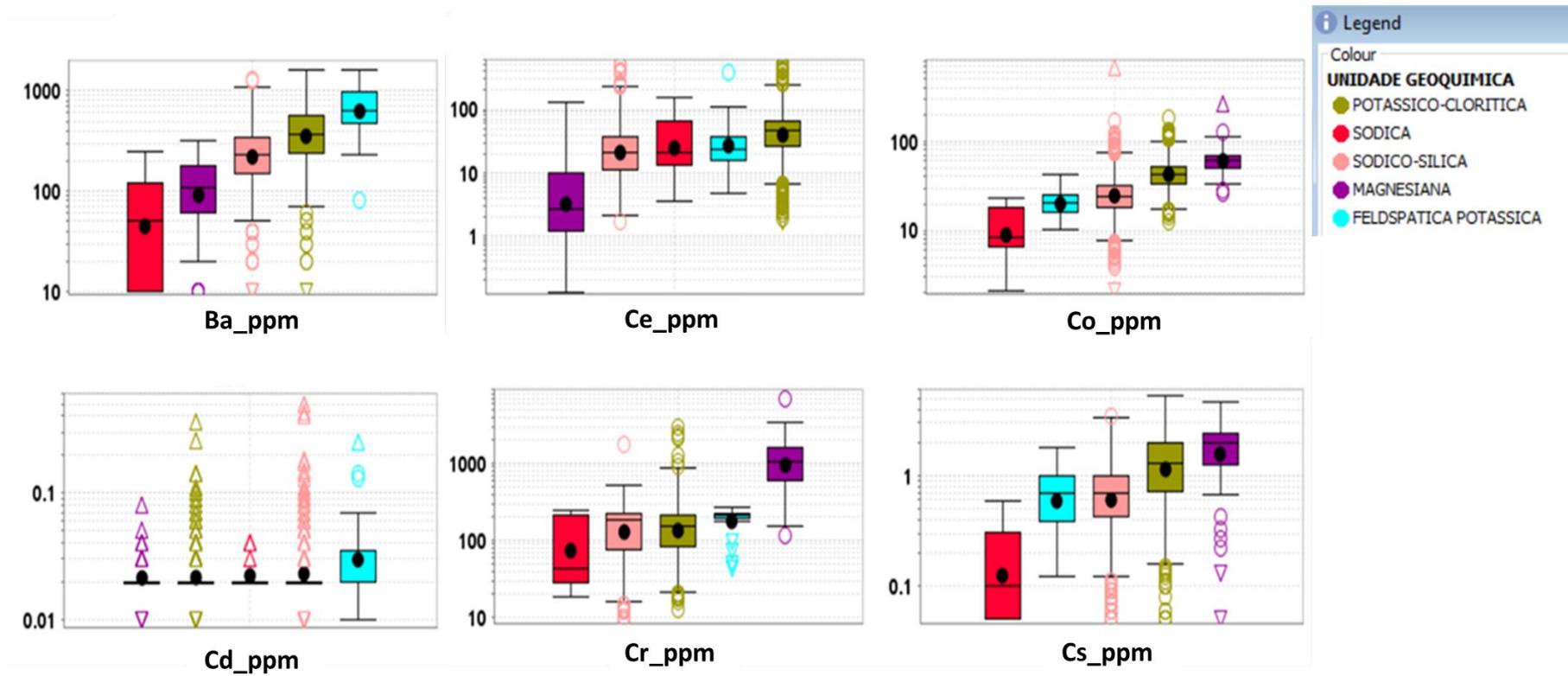


Figura 15 - *Boxplots* das unidades geoquímicas definidas do setor Pista com as distribuições estatísticas para Ba, Ce, Co, Cd, Cr, Cs.

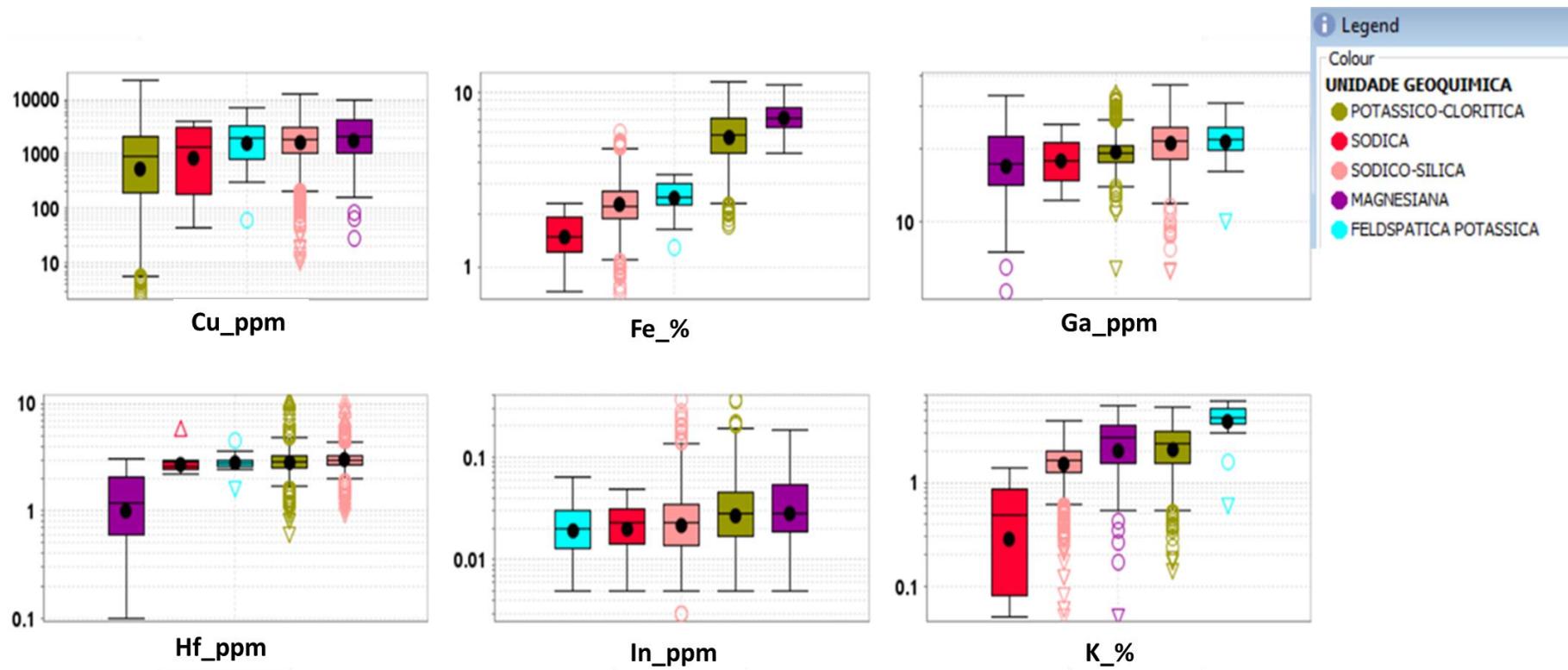


Figura 16 - *Boxplots* das unidades geoquímicas definidas do setor Pista com as distribuições estatísticas para Cu, Fe, Ga, Hf, In, K

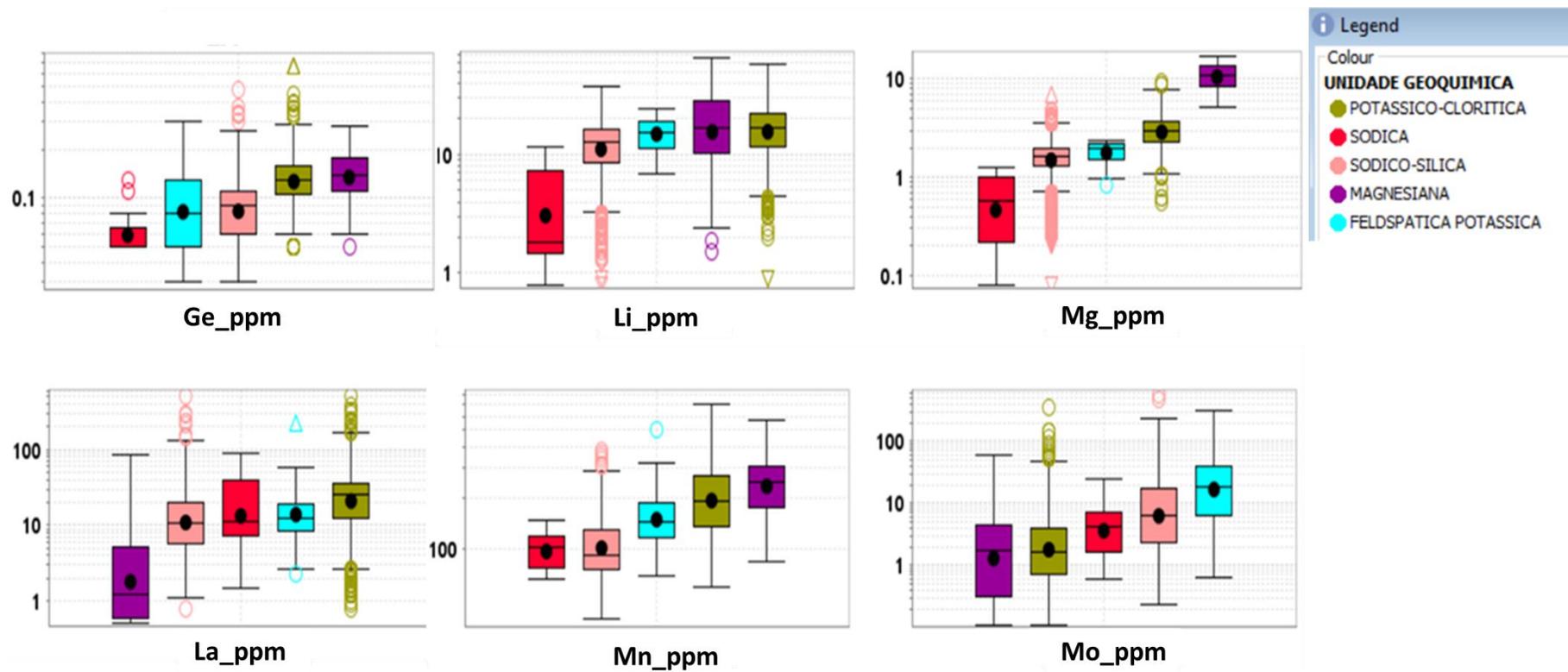


Figura 17 – *Boxplots* das unidades geoquímicas definidas do setor Pista com as distribuições estatísticas para Ge, Li, Mg, La, Mn, Mo.

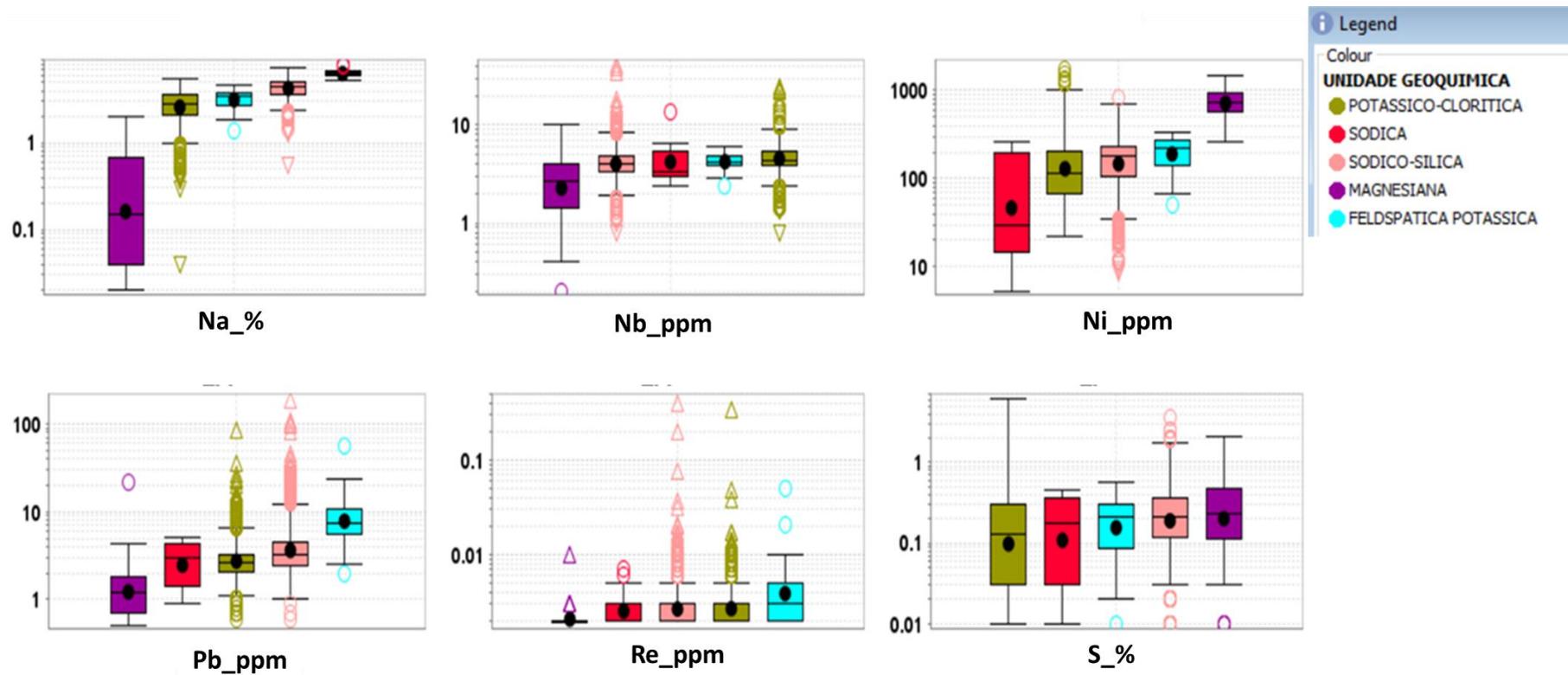


Figura 18 - Boxplots das unidades geoquímicas definidas do setor Pista com as distribuições estatísticas para Na, Nb, Ni, Pb, Re, S.

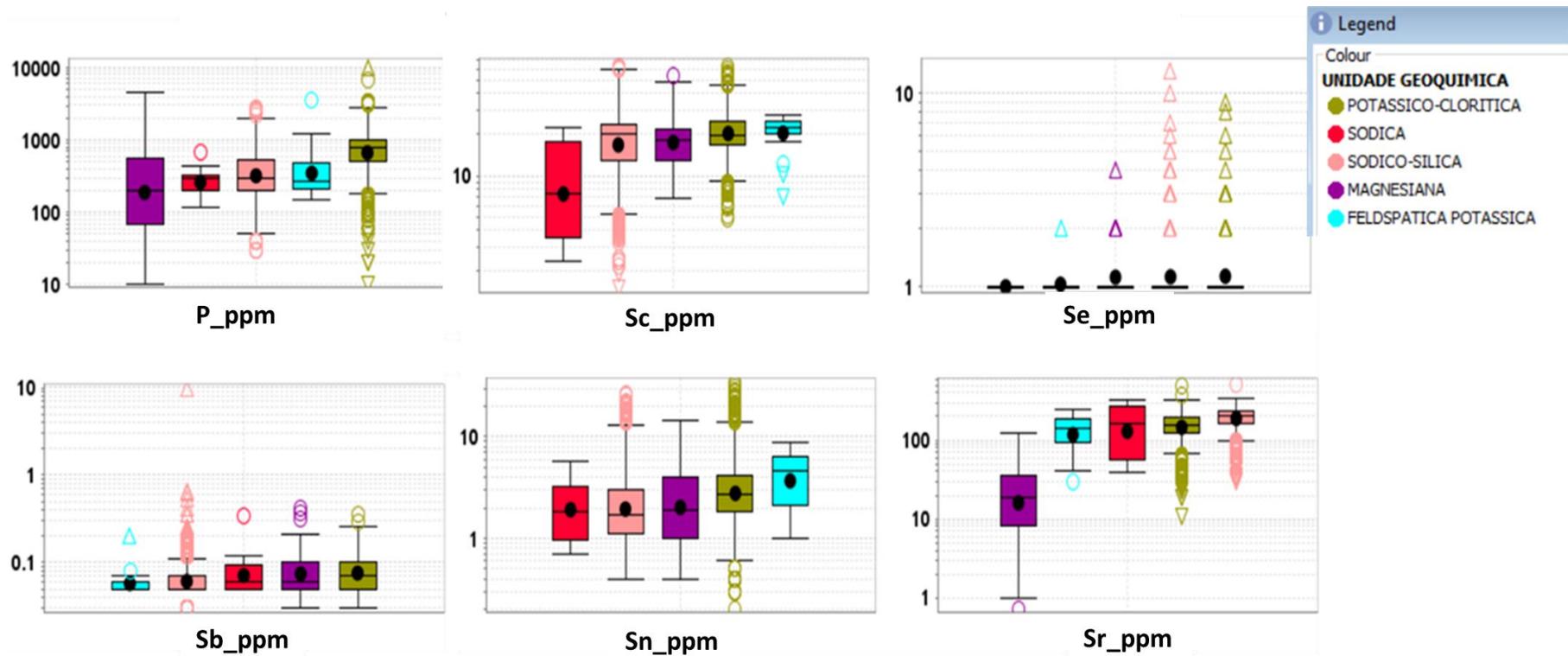


Figura 19 - Boxplots das unidades geoquímicas definidas do setor Pista com as distribuições estatísticas para P, Sc, Se, Sb, Sn, Sr.

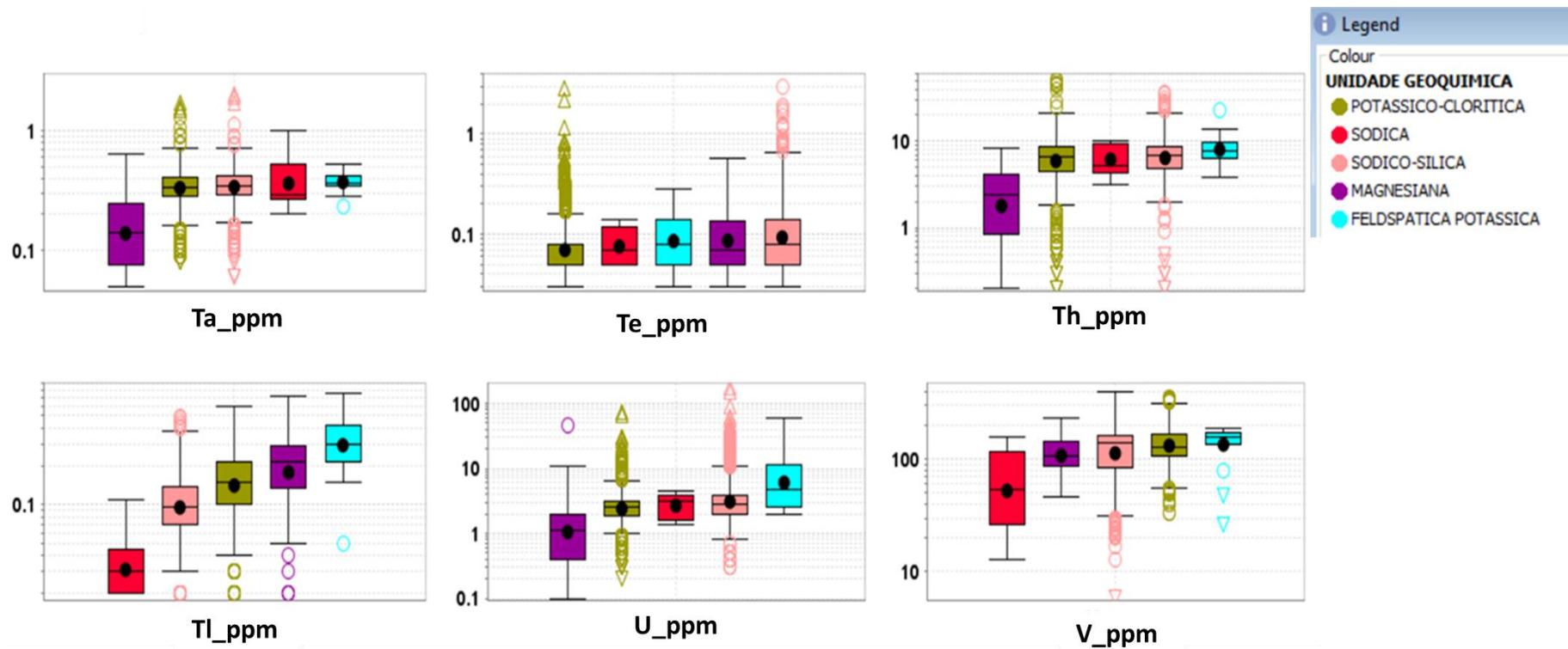


Figura 20 - Boxplots das unidades geoquímicas definidas do setor Pista com as distribuições estatísticas para Ta, Te, Th, Tl, Y, V.

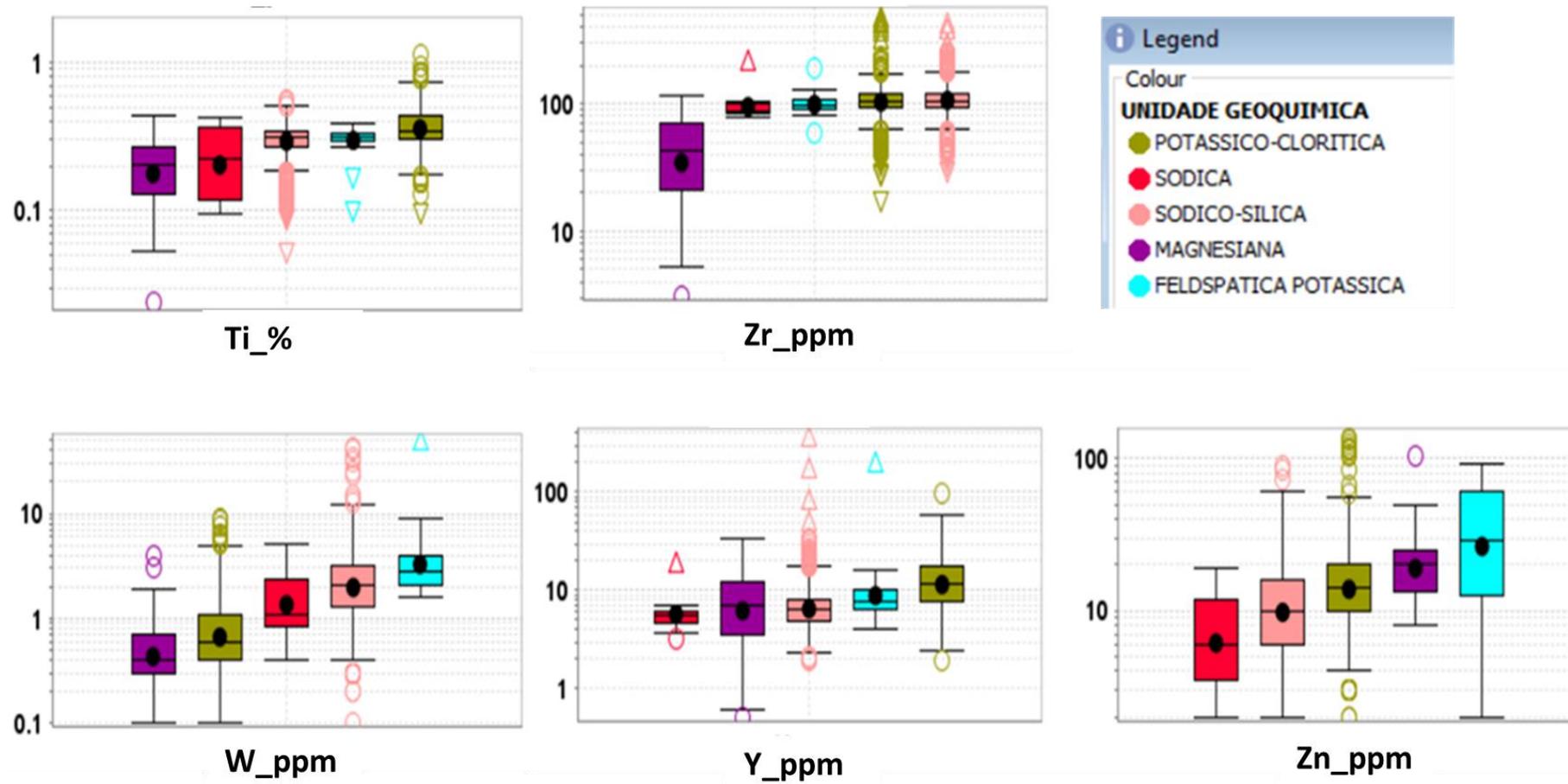


Figura 21 - Boxplots das unidades geoquímicas definidas do setor Pista com as distribuições estatísticas para Ti, Zr, W, Y, Zn.

Tabela 1 - Separação dos elementos químicos que podem ser utilizados como vetores para as unidades geoquímicas do setor Pista.

		UNIDADE GEOQUIMICAS SETOR PISTA				
		SODICA	SODICA-SILICA	POTASSICO-CLORITICA	MAGENESIANA	FELDSPATICA POTASSICA
ELEMENTOS QUIMICOS	Al	As	Ca	Co	Ag	
	Na	Hf	Ce	Cr	Ba	
	Ta	Sr	La	Cs	Be	
	Ag	Te	Li	Cu	Bi	
	La	Zr	Nb	Fe	Cd	
		Cu	P	Ge	K	
		Al	Sb	In	Mo	
		Ga	Se	Mg	Pb	
		Mo	Ti	Mn	Re	
		Na	Y	Ni	Sc	
		Pb	Zr	S	Sn	
		S	Ba	As	Ta	
		W	Bi	K	Th	
		U	Co	Li	Tl	
			Cs	Sb	U	
			Fe	Tl	V	
			Ge	Zn	W	
			Hf		Zn	
			In		Al	
			K		Ga	
			Mg		La	
			Mn		Nb	
			Sc		Ni	
			Sn		P	
			Sr		Ti	
			V		Y	

6.6.2 Unidades geoquímicas e zonamento hidrotermal do setor Sequeirinho/Baiano

No setor Sequeirinho/Baiano a mineralização é estruturalmente controlada por estruturas NE–SW que seccionam zonas de cisalhamentos WNW, com mergulho variável (70–80°) para sul. Predominam nesse setor granitoides, gabros e metavulcânicas félsicas. Essas rochas contêm alterações hidrotermais com actinolita, magnetita e epidoto na zona mineralizada, bem como biotita e escapolita no *footwall*. A mineralização desse setor ocorre como disseminações, em veios e vênulas (*stockworks*) ou em brechas hidrotermais. É composta principalmente por calcopirita, com proporções variáveis de pirita, hematita, magnetita, e ouro na forma livre ou comumente incluso na calcopirita.

Na porção WNW do setor a mineralização ocorre na forma de *strings* em rochas fortemente a medianamente silicificadas, a exemplo do setor Pista. É distinta das outras porções do setor Sequeirinho pela ocorrência de rochas metavulcânicas félsicas e ultramáficas com alterações para talco e tremolita. A porção central do depósito é a mais enriquecida, revelando brechas hidrotermais mineralizadas espessas. Localmente ocorrem rochas granitoides e gabros com texturas originais preservadas. Algumas intrusivas máficas de direções N–S seccionam a mineralização. Na porção ENE do depósito, denominado setor Baiano, a mineralização é de menor volume quando comparada com a porção central. Contudo, ocorre marcante foliação com mineralizações nos estilos *strings* e disseminada, bem como conteúdo elevado de apatita e molibdenita. A integração dos dados permitiu a definição das unidades geoquímicas sódica (baixo Fe), sódico-sílica, sódico-férrica, sódico-cálcica, cálcico-férrica, férrica, potássico-clorítica, magnésiana e feldspático potássica (Figs. 18–21).

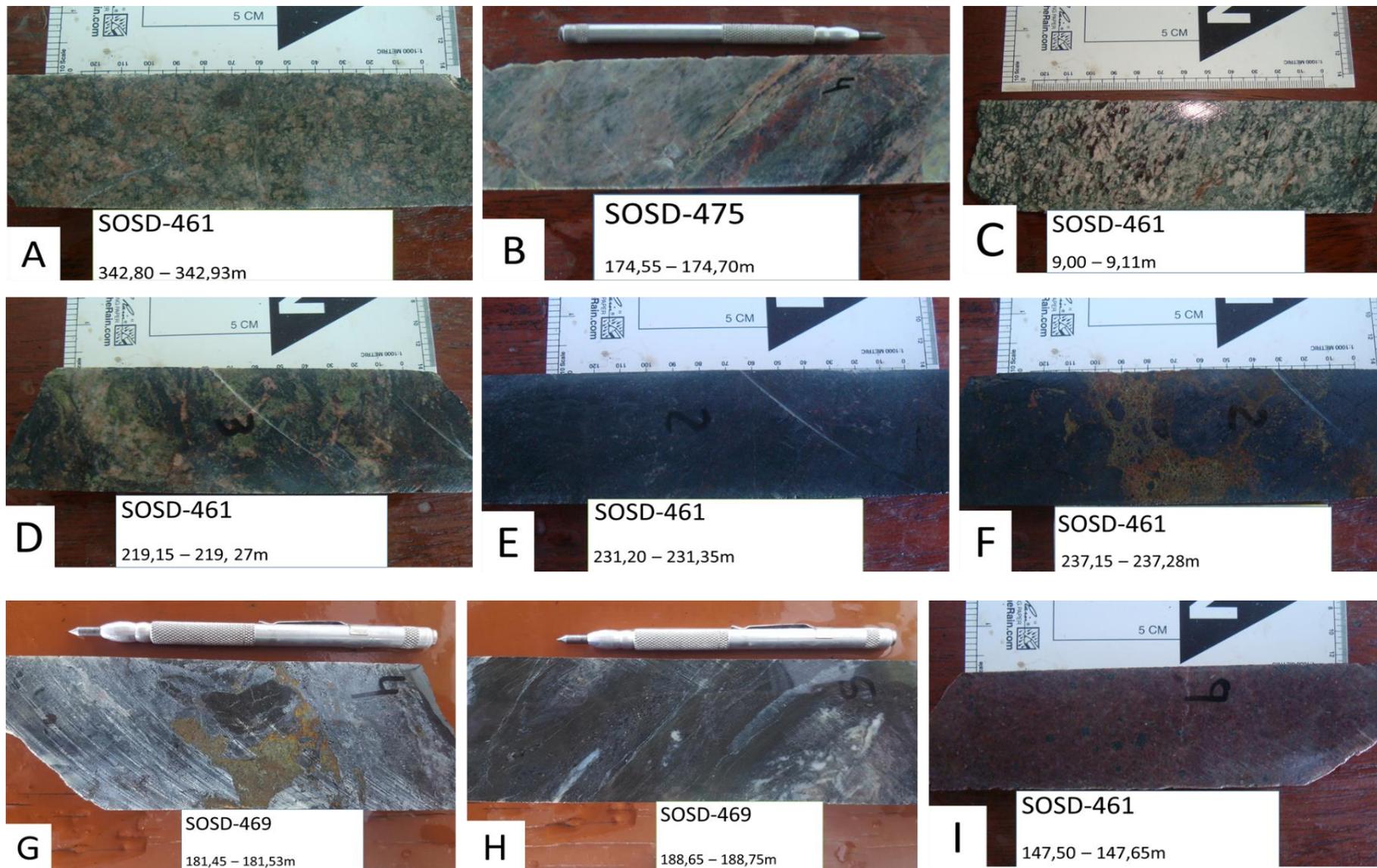


Figura 22 - Litotipos do setor Sequeirinho/Baiano representativos dos grupos definidos pelos dados geoquímicos. (A) Unidade sódica; (B) unidade sílico-sódica; (C) unidade sódico-férrica, (D) unidade sódico-cálcica; (E) unidade cálcico-férrica; (F) unidade férrica; (G) unidade magnesiânica; (H) unidade potássico-clorítica e (I) unidade feldspato potássica.

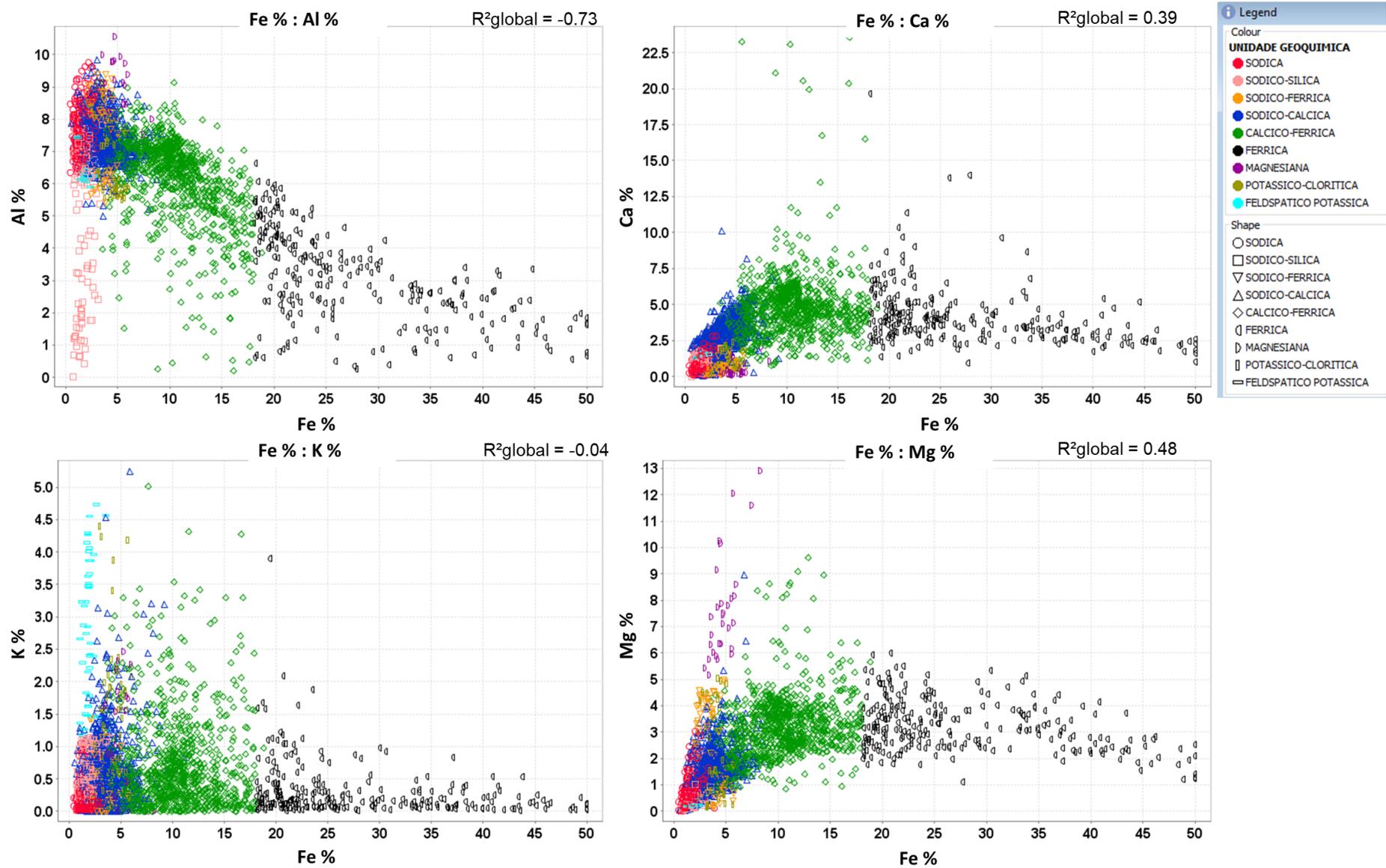


Figura 23 - Diagramas de correlação do setor Pista mostrando as unidades geoquímicas definidas pelos cruzamentos de dados Fe (%) x Al (%), Fe (%) x Ca (%), Fe (%) x K (%) e Fe (%) x Mg (%).

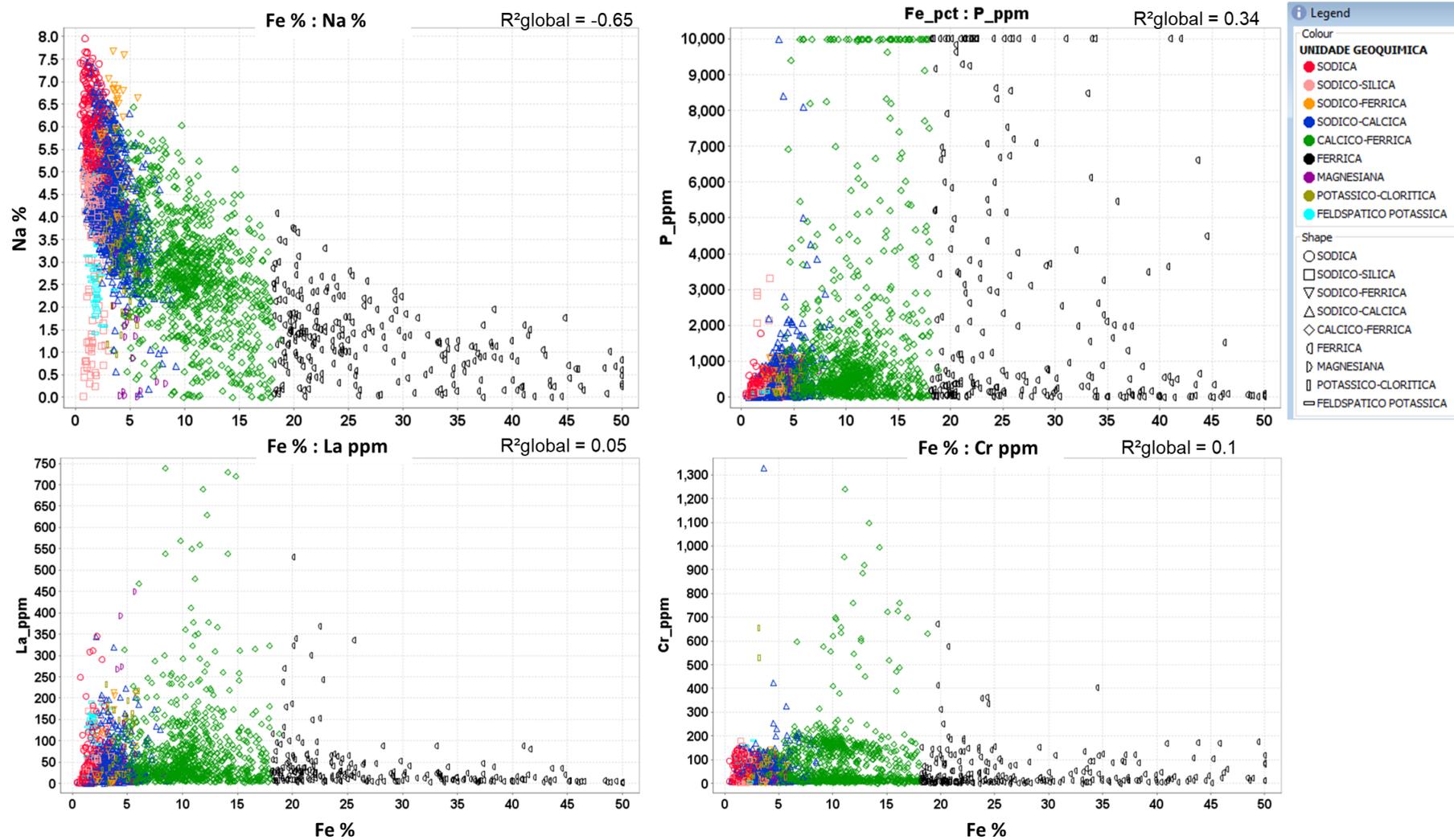


Figura 24 - Diagramas de correlação do setor Pista mostrando as unidades geoquímicas definidas pelos cruzamentos de dados Fe (%) x Na (%), Fe (%) x P (%), Fe (%) x La (%) e Fe (%) x Cr (%).

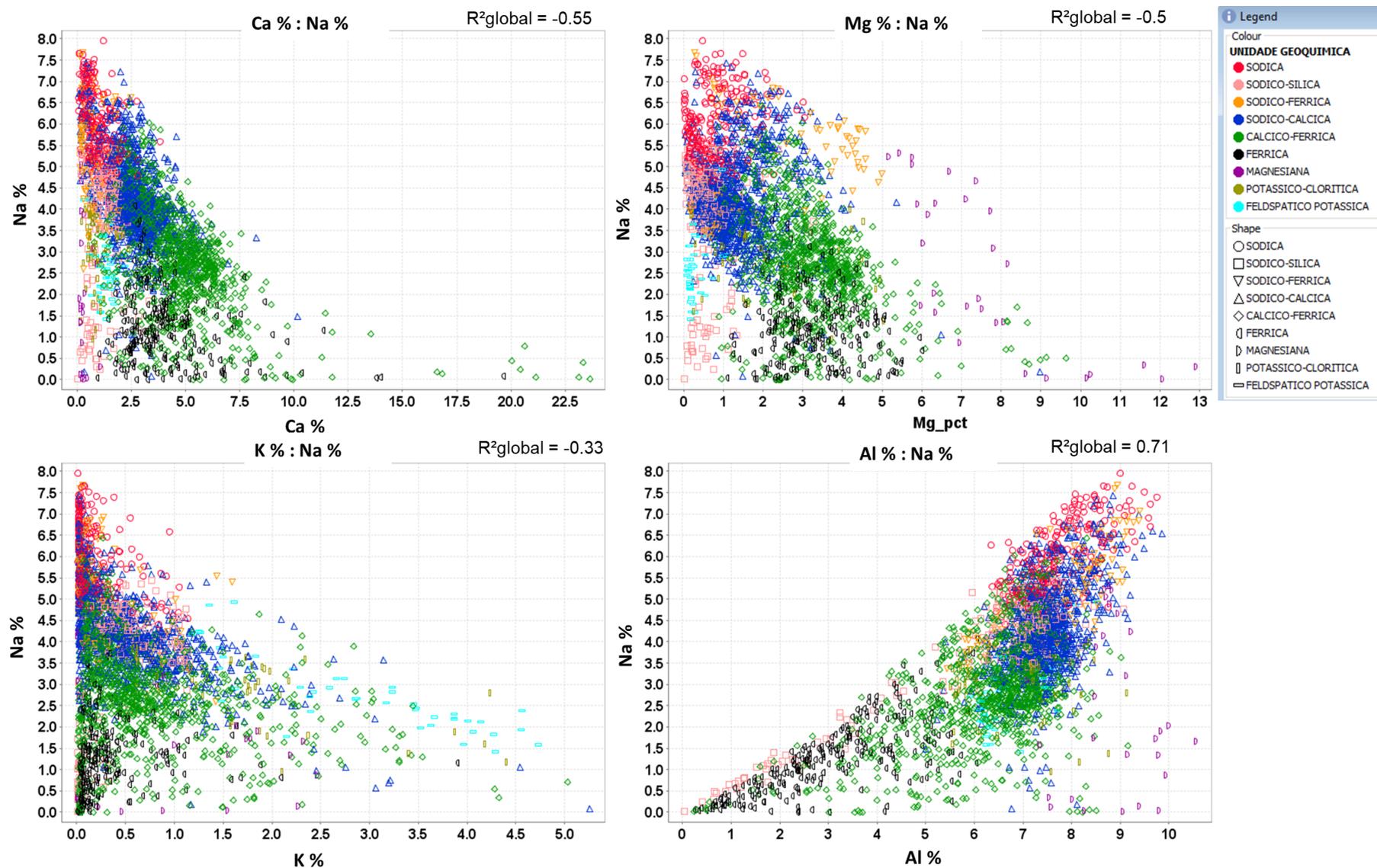


Figura 25 - Diagramas de correlação do setor Pista mostrando as unidades geoquímicas definidas pelos cruzamentos de dados Ca (%) x Na (%), Mg (%) x Na (%), K (%) x Na (%) e Al (%) x Na (%).

A unidade sódica (baixo Fe) é associada as rochas graníticas ricas em sódio (albita) com volumes subordinados de clorita, actinolita, biotita e epídoto. Os melhores resultados de correlações entre os elementos químicos foram Fe x Ca ($r^2=0.59$), Fe x Mg ($r^2=0.5$), Al x Na ($r^2=0.66$) e Na x Ca ($r^2=-0.48$). Esta unidade revelou conteúdos relativamente elevados de Na (>6,0 %), Al (>6,0 %) e W (média de 1,3 ppm), bem como baixos teores de Fe (<2,0 %), Cr (<150 ppm), Co (20 ppm), Ni (81 ppm), P (800 ppm), K (0,45 %) e Rb (24 ppm). No geral, representa 6 % dos intervalos mineralizados (Cu > 0,2 %) existentes no setor. A unidade sódico-silícica (46,0–60,0 % de SiO₂) é semelhante à unidade anterior, porém com teores mais baixos de Na (<5 %) e Al (<5 %). Apresenta conteúdos médios maiores de Ba (80 ppm), Cs (0,06 ppm), K (0,31 ppm), Pb (2,5 ppm) e Rb (13,7 ppm). As melhores correlações dessa unidade foram Fe x Mg ($r^2=0.63$), Fe x Ca ($r^2=0.46$), Al x K ($r^2=0.49$), e Al x Na ($r^2=0.93$).

A unidade sódico-férrica ocorre em rocha granitoide com alteração hidrotermal envolvendo substituição de albita por biotita, observando principalmente o aumento dos teores de K. As melhores correlações entre os elementos químicos foram Fe x Ca ($r^2=0.57$), Al x Na ($r^2=0.81$), K x Na ($r^2=-0.54$) e P x Mg ($r^2=0.51$). Mostra alto teor de Na (>5,0 %), Li (>4,5 ppm), Mg (>2,0 %) e médios de Fe (3,0–5,0 %) e P (>180 ppm). Essa unidade representa a transição entre as sódicas e férricas. A unidade sódico-cálcica ocorre em granitoide com alteração clorítica, com actinolita e epídoto subordinados e volume variável de albita. Apresentou melhores correlações entre Fe x Ca ($r^2=0.58$), Fe x Mg ($r^2=0.56$), Ca x Na ($r^2=0.5$) e Na x K ($r^2=0.59$). Revela características relativamente similares a unidade sódico-férrica, embora contenha teores relativamente elevados de Mg (>2,9 %) e, localmente, Ca (5,0 %) que usualmente acompanha enriquecimento em Fe (4,0–6,0 %) em função da presença de actinolita. As análises com alto Mg e baixo Fe (<4,0 %) estão associadas a alteração clorítica, localmente mineralizada.

A unidade cálcico-férrica foi definida a partir de *backgrounds* de Fe, baseados no conteúdo volumétrico de magnetita descrito nas amostras de testemunhos de sondagem. Mostra aumento de actinolita e subordinado de biotita, epídoto e albita quando comparada com unidades portadoras de teores elevados de Fe (>18,0 %). É caracterizada por médio a elevado conteúdo de Fe (5,0–18,0 %), bem como valores anômalos de P (>2860 ppm), provavelmente associados a apatita, Ni (360 ppm) e Co (45 ppm). São identificados ainda elevados conteúdos de Ca (>4,6 %), Cu (0,2–0,7 %), Ga (>23 ppm), In (0,11 ppm), Mn (>336 ppm), Ni (>240 ppm), P (>280 ppm), Rb (>7,5 ppm), S (>0,22%), Sc (>6 ppm), Ti (>0,2 %), V (>191 ppm) e Y (>14

ppm). As correlações que melhor representaram foram Fe x Al ($r^2=-0.5$), Al x P ($r^2=0.53$), Al x Na ($r^2=0.5$) e Mg x Cr ($r^2=0.7$).

A unidade férrica é oriunda de hidrotermalismo férrico, onde ocorrem predominantemente magnetita e subordinada actinolita. Quimicamente representa um grupo de amostras com alto conteúdo de Fe (>18,0 %) que aumenta com Ag (0,4 ppm), As (0,7 ppm), Bi (0,07 ppm), Co (68 ppm), Cu (>1 %), Ga (37 ppm), Ge (0,41 ppm), In (0,13 ppm), Ni (871 ppm), P (624 ppm), S (1,11 %), Sb (0,07 ppm), Se (2 ppm), Te (0,47 ppm), U (4 ppm), V (797 ppm) e Y (18 ppm). As correlações que melhor representaram foram Fe x Al ($r^2=-0.59$), Al x Na ($r^2=0.73$) e Ca x P ($r^2=0.63$).

A unidade potássico-clorítica é de ocorrência restrita e corresponde às zonas de alteração potássica, além de conteúdos significativos de Ca (2,0 %) e Na (1,4–5,0 %) devido à presença de actinolita e albita, respectivamente. Revela concentrações elevadas de K (1,20–3,9 %) e Rb (55–194 ppm). Apresentou correlações entre Al x Fe ($r^2=-0.59$), Al x Mg ($r^2=0.78$), Al x La ($r^2=-0.64$), Mg x La ($r^2=-0.61$) e Na x K ($r^2=-0.62$).

A unidade magnésiana envolve rochas máficas e ultramáficas compostas por talco, tremolita, magnetita e crisotila. Estão concentradas em grande parte na porção NE do setor Sequeirinho. Revela teores elevados de Mg (>6,0 %), Li (>37 ppm), Mn (>339 ppm), Cs (média de 0,32 ppm) e Zn (> 51 ppm), bem como valores médios de Be (2 ppm), Co (35 ppm), Fe (4,5 %), Ga (30 ppm), La (32 ppm), Nb (7 ppm) e Tl (0,02 ppm). As correlações que melhor corresponderam foram Fe x Na ($r^2=-0.60$), Fe x Mg ($r^2=0.69$), Al x K ($r^2=0.68$), Mg x Na ($r^2=-0.74$) e La x Mg ($r^2=0.53$).

A unidade feldspático potássica está associada às rochas intrusivas intermediárias (andesitos) formadas por plagioclásio, biotita, clorita, rutilo, magnetita e hematita. Apresenta elevados teores de Ba (889 ppm), Be (> 2 ppm), Hf (12 ppm), K (>2 %), La (136 ppm), Mo (>1,2 ppm), Nb (28 ppm), Pb (6,24 ppm), Rb (115 ppm), Ta (1,76 ppm), Th (39 ppm) e Zr (427 ppm). As correlações melhores representadas foram K x Na ($r^2=-0.83$), Al x Mg ($r^2=0.53$), Al x Na ($r^2=0.63$) e Cr x K ($r^2=0.63$).

Observou-se que as zonas mineralizadas tiveram mais afinidade com as unidades sódico-cálcica, cálcico-férrica e férrica. Parte da mineralização considerada como baixo teor (>0,2 % Cu <0,5) ocorre basicamente com quase todas as unidades classificadas, porém em intervalos muito locais. Nesses baixos teores se destacam as unidades sódico-cálcica, cálcico-férrica e férrica. Os intervalos considerados como médio (>0,5 % Cu <0,9) e alto teores (>0,9 %

de Cu) observou a predominância das unidades cálcico-férrica (actinolita e magnetita) e férrica (magnetita maciça) (Figs. 22–23).

Ao definir as unidades geoquímicas e tratamentos geoestatísticos dos elementos químicos do Setor Sequeirinho/Baiano que se destacaram nas análises *Boxplots* (Figs. 24–27), foi possível realizar as separações dos elementos químicos que continham maiores teores e frequências e se destacaram para cada unidade geoquímica e assim podendo sinalizar prováveis vetores geoquímicos de acordo com teores e distribuições espaciais para cada unidade (Tabela 2).

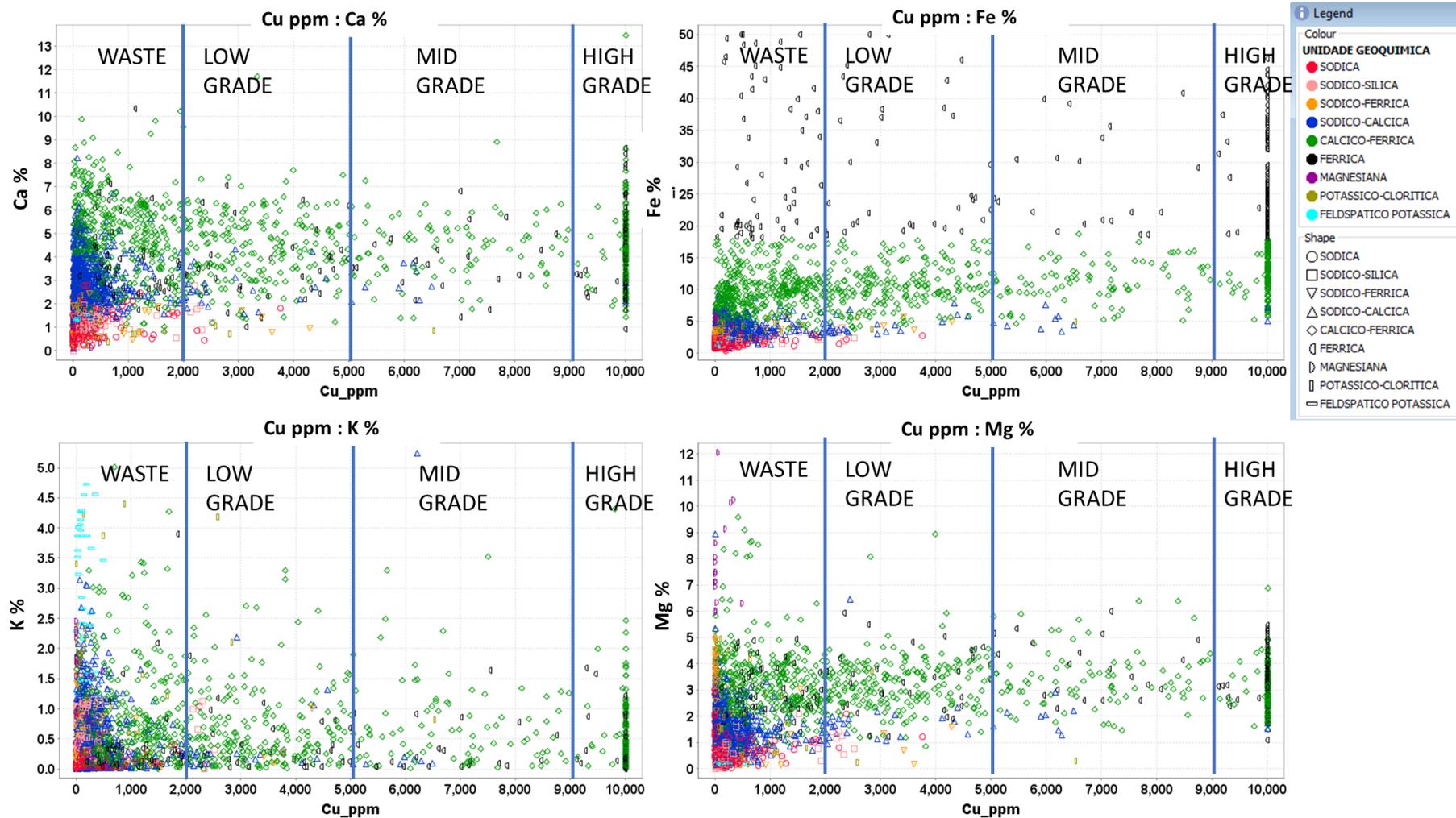


Figura 26 - Diagramas de dispersão (Unidades geoquímicas x teores de Cu do setor Sequeirinho/Baião) utilizados para definir quais unidades geoquímicas tem relação com teores de corte utilizados na mina para definição de rochas estéril (<0,2 % Cu), baixo (>0,2 % Cu <0,5), médio (>0,5 % Cu <0,9) e alto teor (>0,9 % Cu)

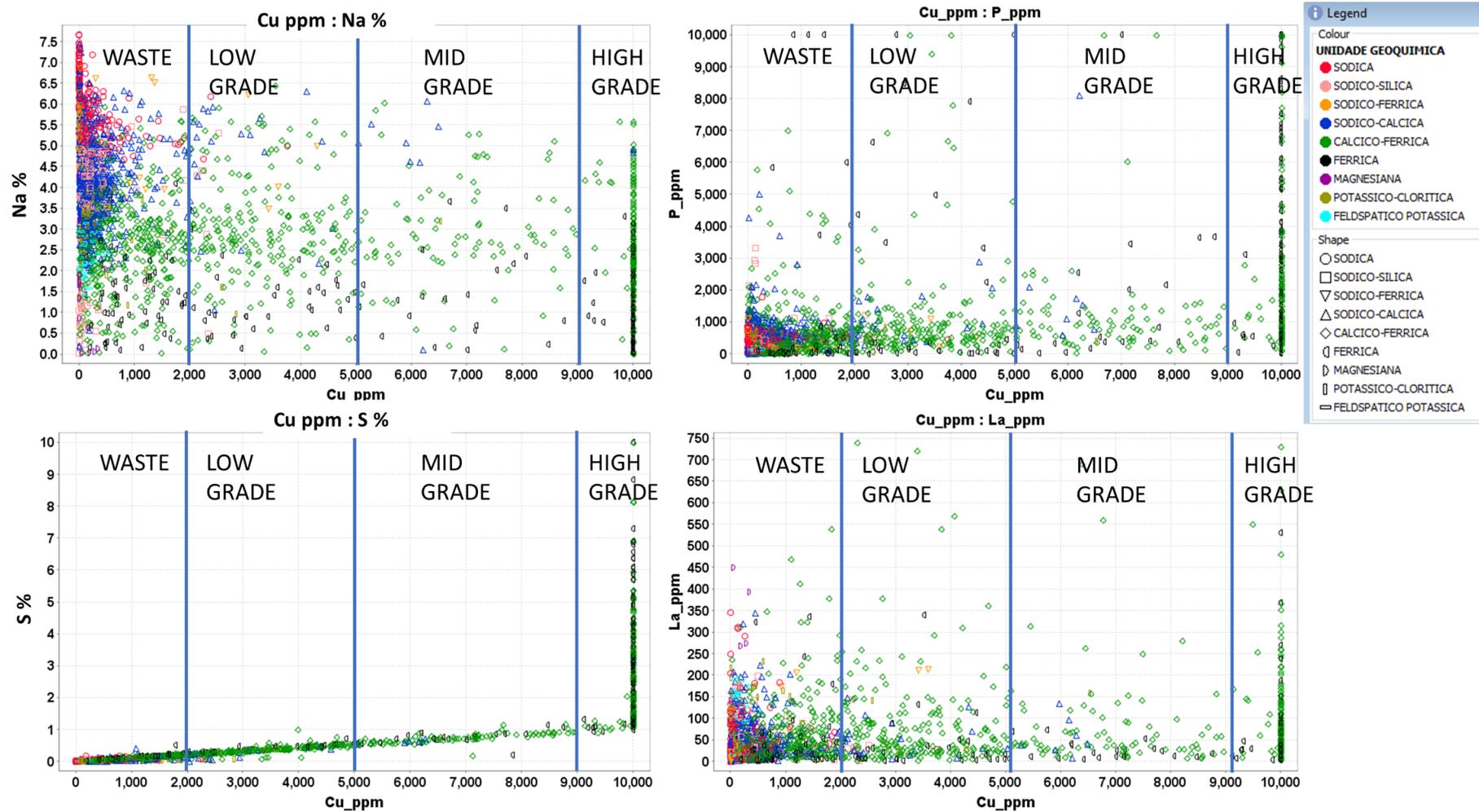


Figura 27 - Diagramas de dispersão (Unidades geoquímicas x teores de Cu do setor Sequeirinho/Baiano) utilizados para definir quais unidades geoquímicas tem relação com teores de corte utilizados na mina para definição de rochas estéril (<0,2 % Cu), baixo (>0,2 % Cu <0,5), médio (>0,5 % Cu <0,9) e alto teor (>0,9 % Cu).

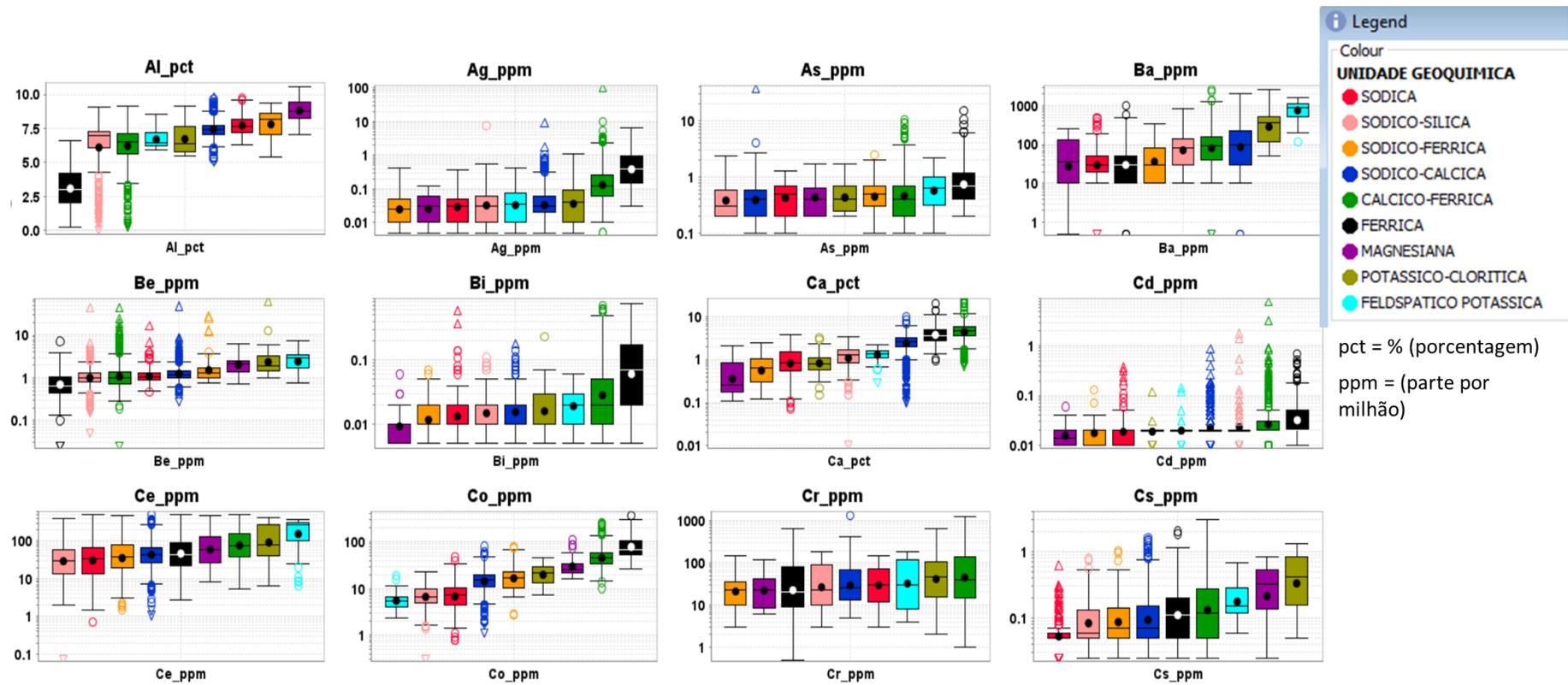


Figura 28 – Boxplots das unidades geoquímicas definidas do setor Sequeirinho/Baiano com as distribuições estatísticas para Al, Ag, As, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Ce, Co, Cr e Cs.

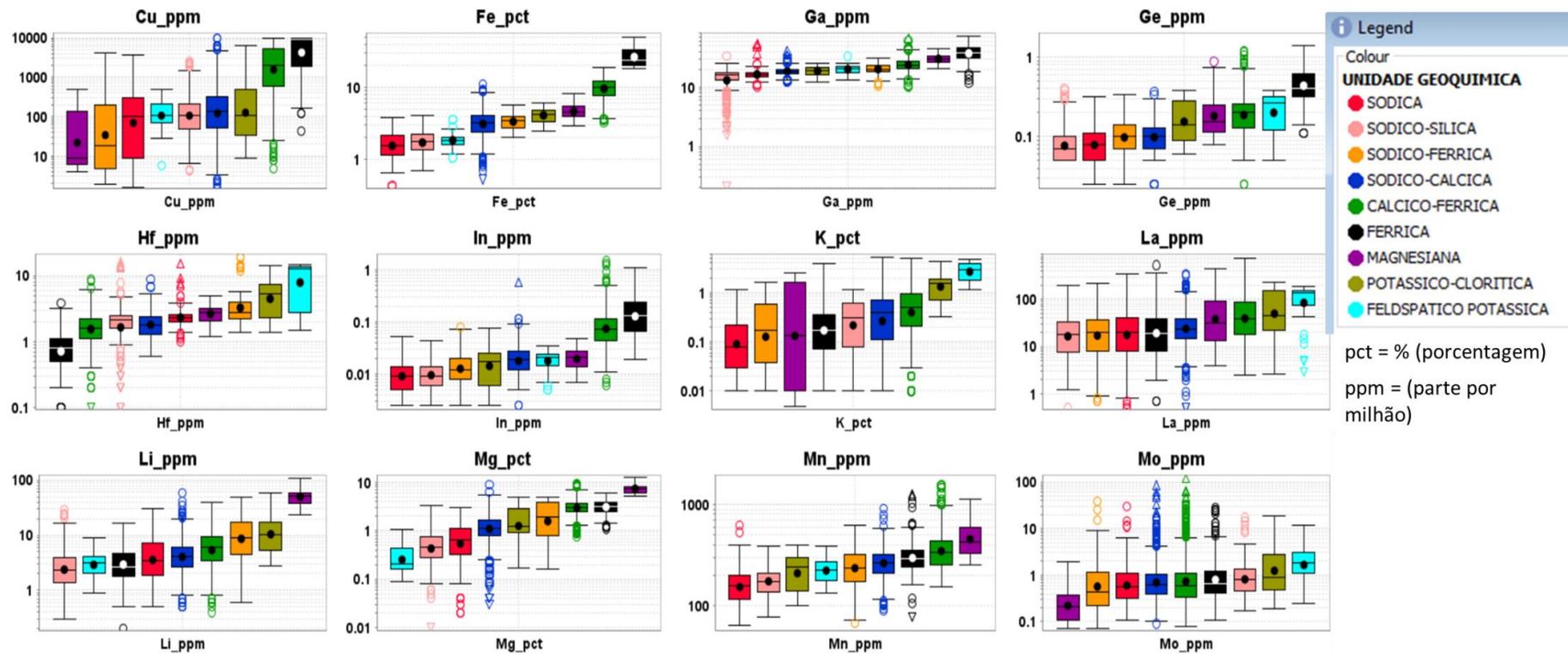


Figura 29 - Boxplots das unidades geoquímicas definidas do setor Sequeirinho/Baiano com as distribuições estatísticas para Cu, Fe, Ga, Ge, Hf, In, K, La, Li, Mg, Mn e Mo.

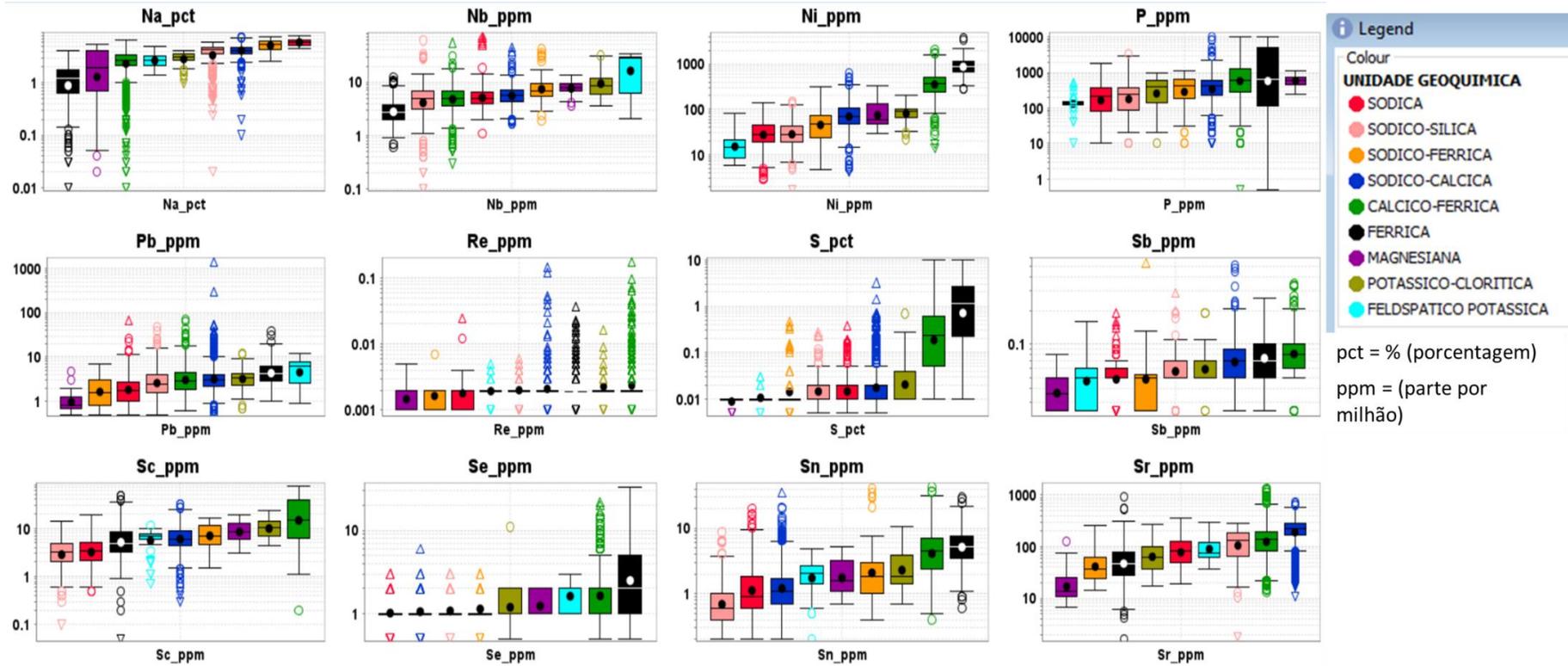


Figura 30 - *Boxplots* das unidades geoquímicas definidas do setor Sequeirinho/Baiano com as distribuições estatísticas para Na, Nb, Ni, P, Pb, Re, S, Sb, Sc, Se, Sn e Sr.

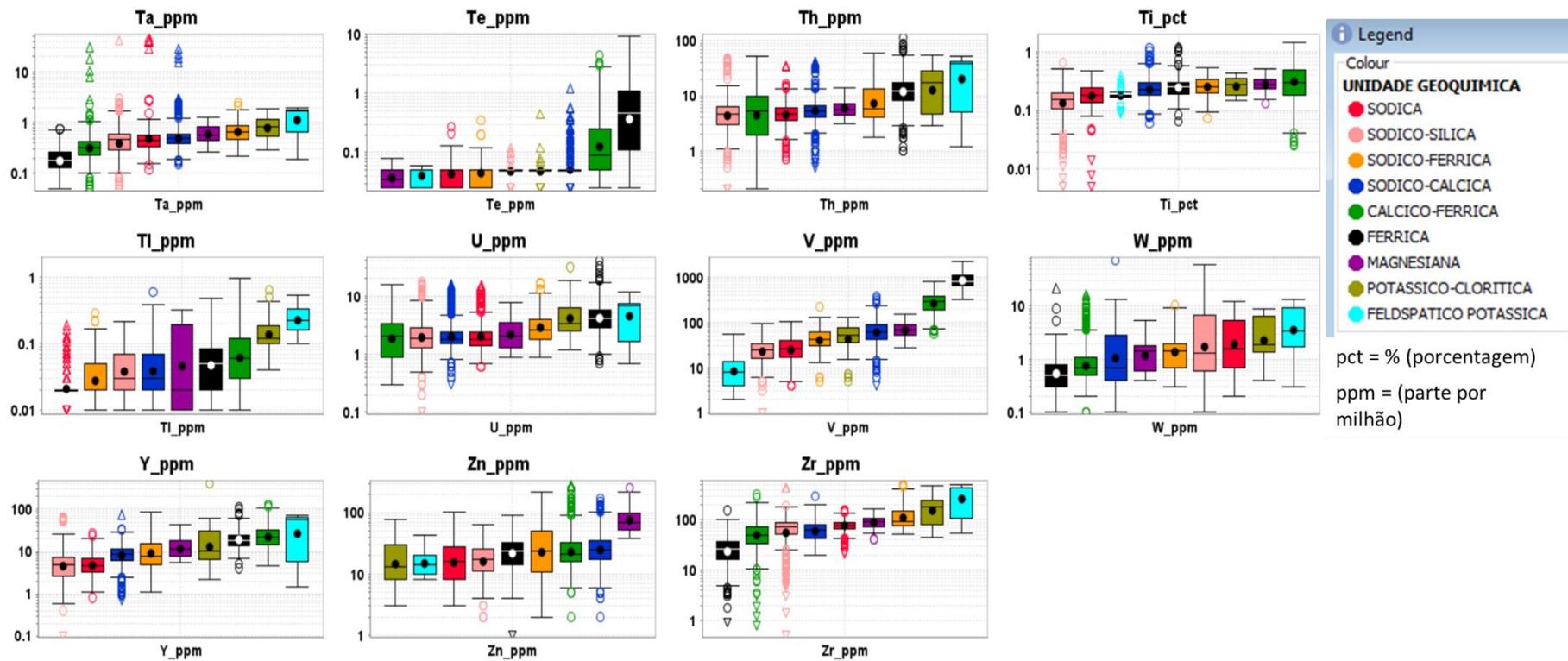


Figura 31 - *Boxplots* das unidades geoquímicas definidas do setor Sequeirinho/Baiano com as distribuições estatísticas para Ta, Te, Th, Ti, Tl, U, V, W, Y, Zn e Zr.

Tabela 2 - Separação dos elementos químicos que podem ser utilizados como vetores para as unidades geoquímicas do setor Sequeirinho/Baiano.

UNIDADE GEOQUIMICAS SETOR SEQUEIRINO/BAIANO									
ELEMENTOS QUIMICOS	SODICA	SODICO-SILICA	SODICO-FERRICA	SODICO-CALCICA	CALCICO-FERRICA	FERRICA	MAGENESIANA	POTASSICO-CLORITICA	FELDSPATICA POTASSICA
	Na	W	Mo	Sr	Ca	Ag	Al	Be	Ba
	Al	Na	Al	Ba	Cr	As	Li	Cs	Ce
	W	Cd	Hf	Ca	Re	Bi	Mg	U	Hf
		Sr	Li	Mn	Sb	Cd	Mn	Bi	K
		Ta	Mg	Na	Sc	Co	Zn	Ce	La
		Zr	Na	P	Sn	Cu	Be	Cr	Mo
			Nb	Re	Ti	Fe	Co	Ag	Nb
			Zn	Sb	Ag	Ga	Cs	Ba	Pb
				Te	As	Ge	Fe	Cu	Ta
				Ti	Bi	In	Ga	Hf	Th
				V	Cd	Ni	In	K	Tl
				Zn	Ce	P	K	La	Y
					Co	Pb	La	Li	Zr
					Cs	S	Ni	Mo	As
					Cu	Se	P	Nb	Be
					Fe	Te	Sc	Re	Cr
					Ga	V	Ti	S	Cs
					Ge	Ca	Tl	Sc	Ge
					In	Mg		Sn	Se
				Mg	Mn		Ta	U	
				Mn	Re		Th	W	
				Ni	Sb		Tl		
				P	Sn		W		
				S	Th		Y		
				Se	U		Zr		
				Sn					
				Te					
				V					
				Y					

6.6.3 Unidades geoquímicas e zonamento hidrotermal do setor Sossego/Curral

No setor Sossego/Curral, a mineralização principal está associada a corpos de brecha hidrotermal heterolítica e estruturalmente na forma de *pipes* encaixados em granitoides granofíricos. Esses *pipes* têm forma de cilindro irregular envolvido por zona de *stockwork* e disseminações de calcopirita. O limite com o *footwall* também é marcado por zona verticalizada enriquecida em biotita e escapolita. Nos testemunhos de sondagem foram observados veios e brechas hidrotermais com calcita e variadas proporções de feldspatos, quartzo, fluorapatita, clorita e actinolita desenvolvidos usualmente em granófiros. A mineralização do setor Sossego/Curral é composta predominantemente por calcopirita, com subordinado volume de ilmenita, pirita, bornita, molibdenita, magnetita, hematita e ouro. Na porção sul da cava do Sossego foram identificados diques máficos com porções ricas em feldspato potássico e hematita. Nos níveis mais profundas desse setor ocorrem zonas enriquecidas em magnetita, formando porções maciças de espessuras de até 25 m ao redor das brechas heterolíticas. A integração dos dados permitiu as definições das unidades geoquímicas denominadas sódica, sódico-sílica, sódico-potássica (baixo Ca), potássica, clorítica, férrica e cálcica (Figs. 28–31).

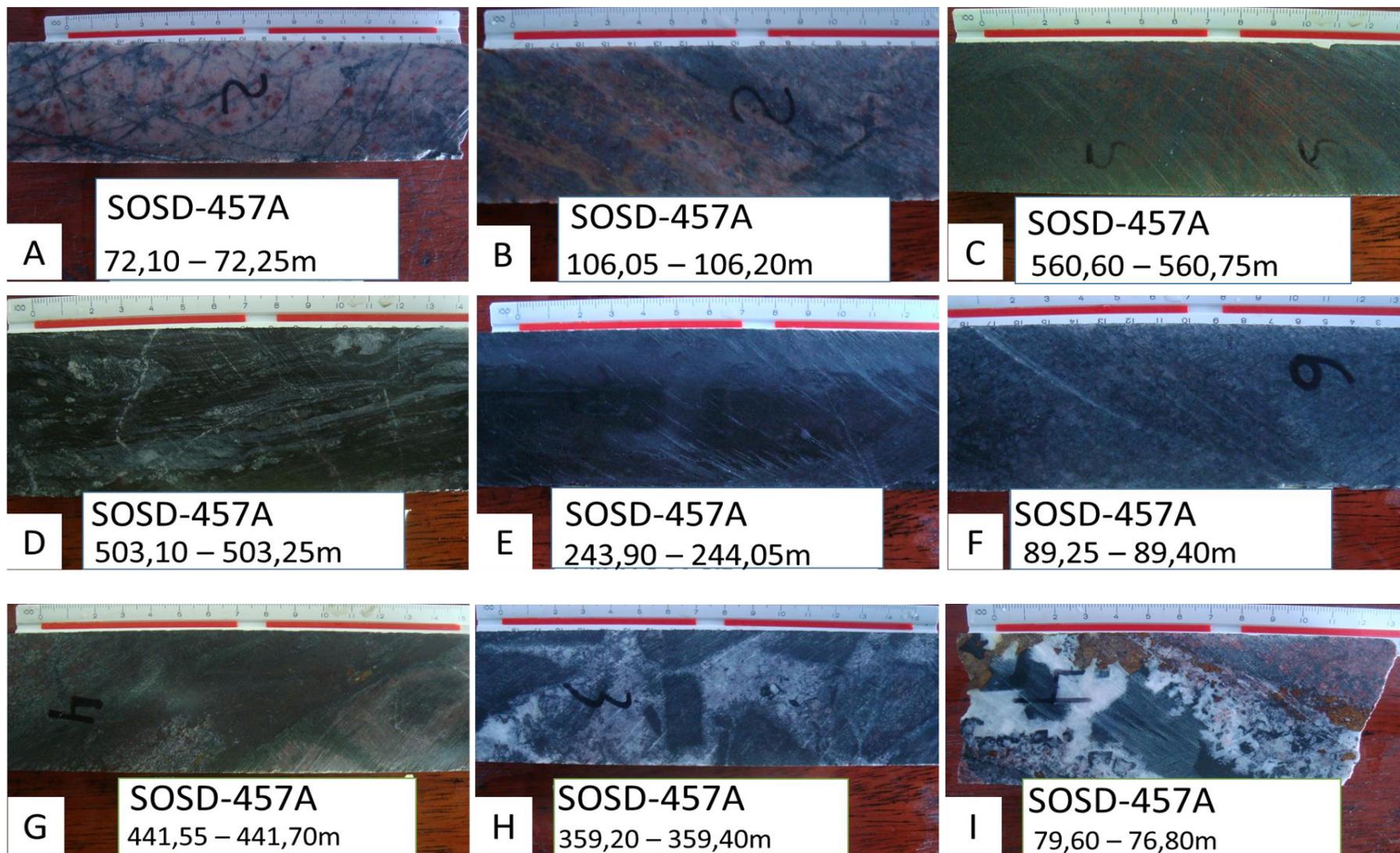


Figura 32 – Litotipos do setor Sossego/Curral representativos das unidades geoquímicas denominadas: (A) sódica, (B) sódico-silica, (C) sódico-potássica (baixa Ca), (D) potássica, ferrúica (E); clorítica (F e G) e cálcica (H e I).

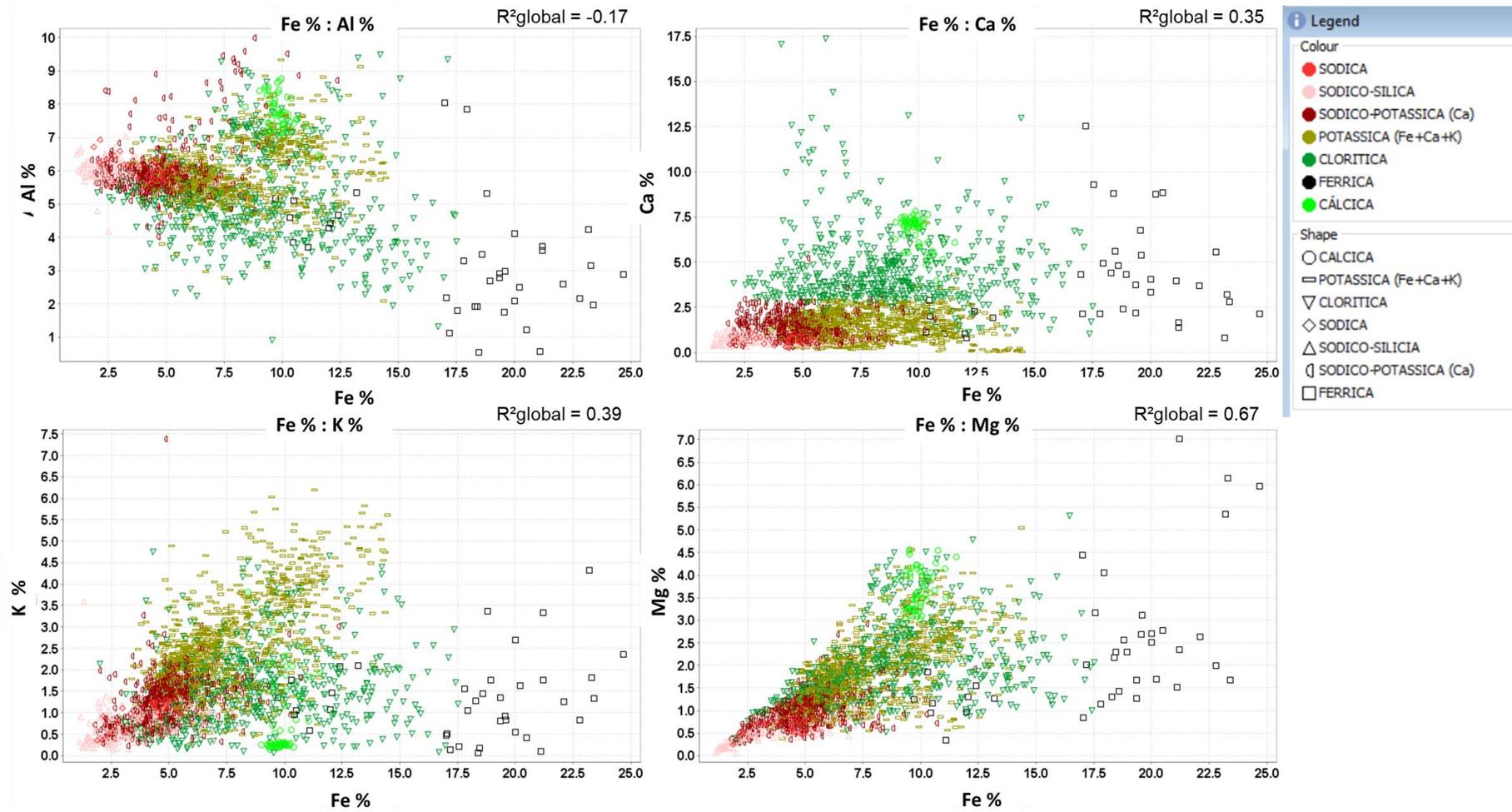


Figura 33 - Diagramas de correlação do setor Sossego/Curral mostrando as unidades geoquímicas definidas pelos cruzamentos de dados Fe (%) x Al (%), Fe (%) x Ca (%), Fe (%) x K (%) e Fe (%) x Mg (%).

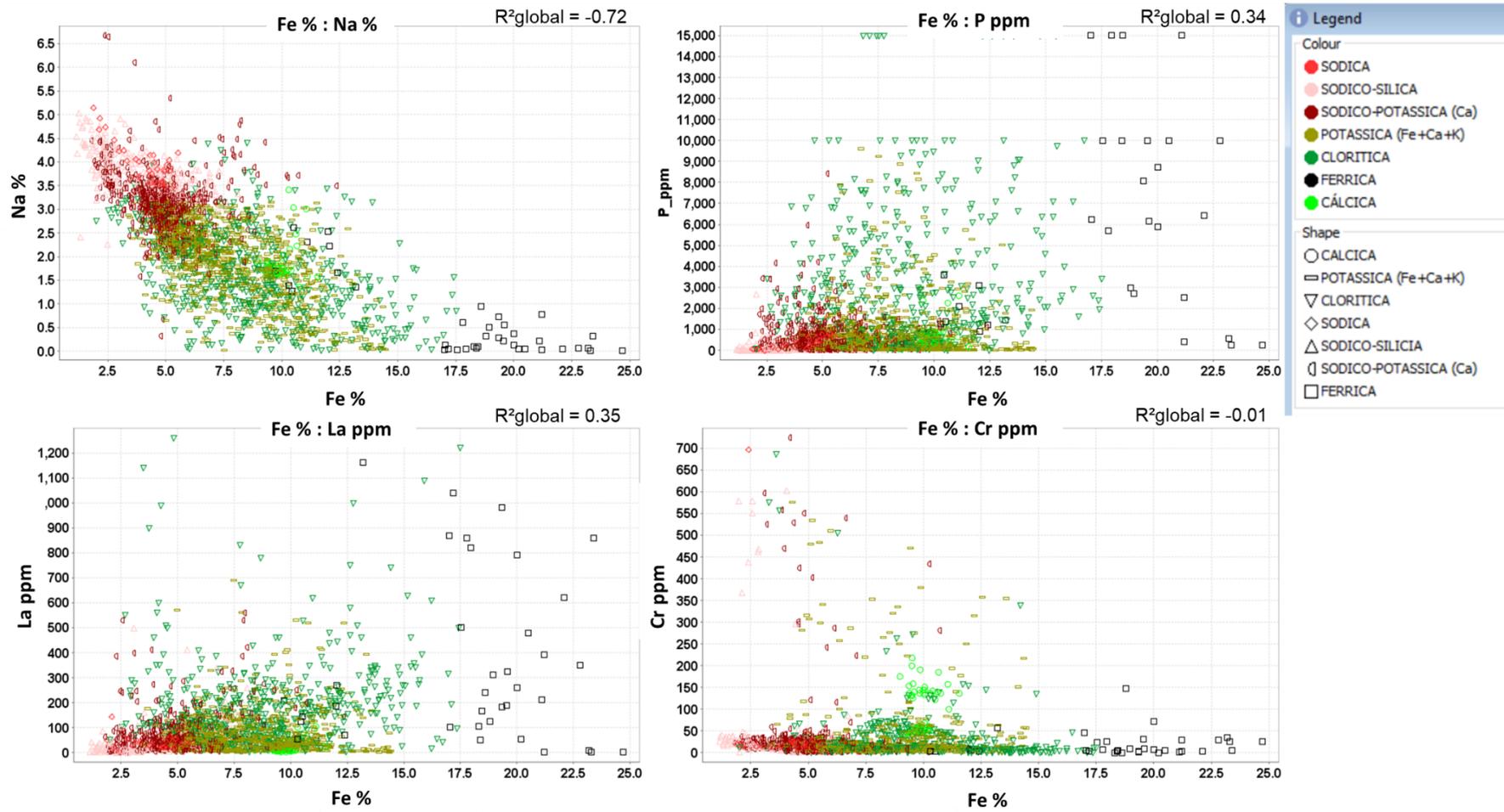


Figura 34 - Diagramas de correlação do setor Sossego/Curral mostrando as unidades geoquímicas definidas pelos cruzamentos de dados Fe (%) x Na (%), Fe (%) x P (%), Fe (%) x La (%) e Fe (%) x Cr (%).

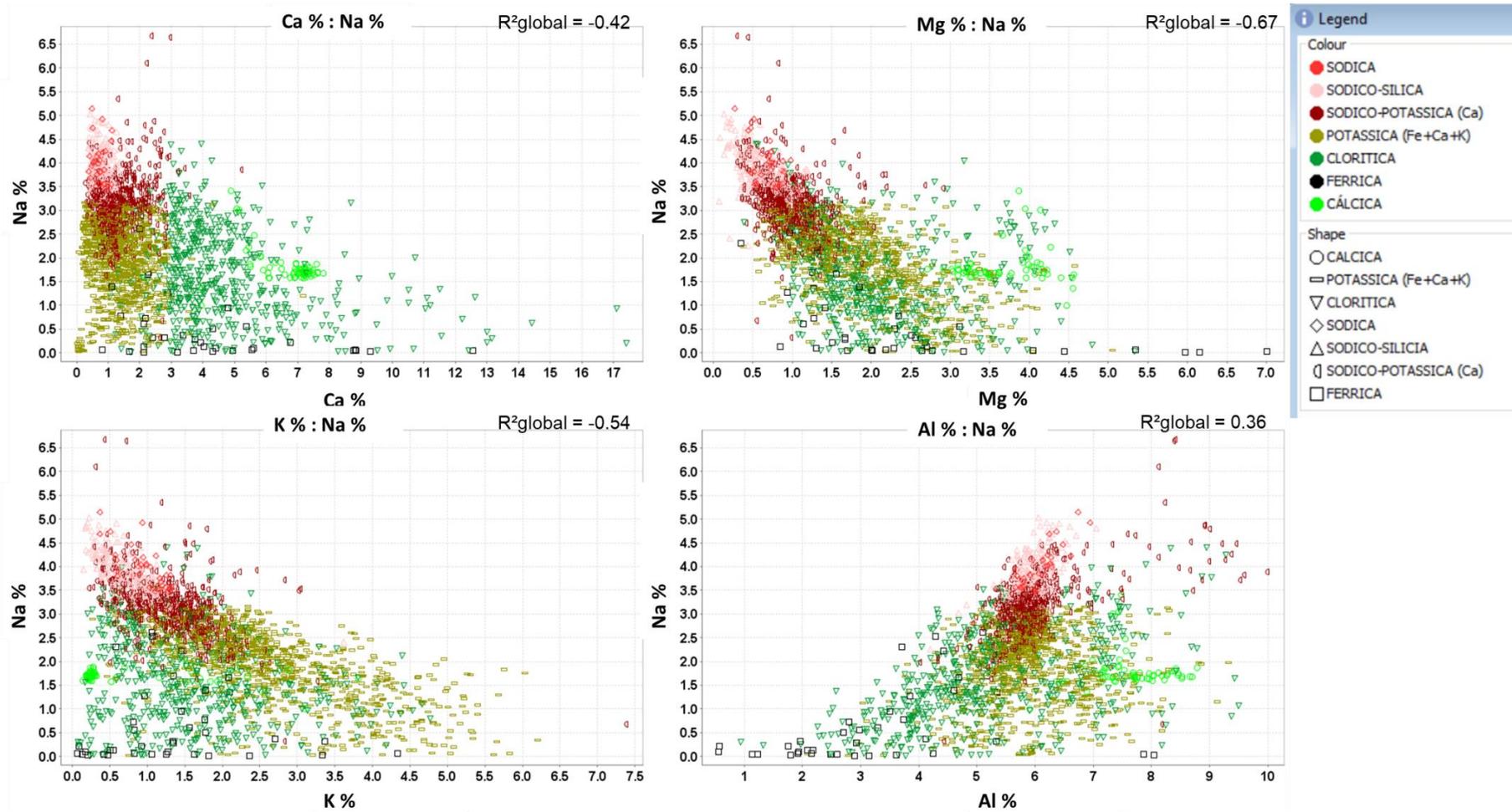


Figura 35 - Diagramas de correlação do setor Sossego/Curral mostrando as unidades geoquímicas definidas pelos cruzamentos de dados Ca (%) x Na (%), Mg (%) x Na (%), K (%) x Na (%) e Al (%) x Na (%).

A unidade sódica está relacionada a granófiro em zonas mais distais ao minério. Apresenta elevados conteúdos de Na (>3,5 %), Si (27 % em média), Hf (4,45–5,0 ppm), Nb (>10 ppm), W (>1,5 ppm) e Zr (175–185 ppm), bem como baixos teores de Fe (<4,0 %) e Cu (<58 ppm). As melhores correlações que a unidade apresentou foram Fe x Al ($r^2=-0.68$), Fe x K ($r^2=0.54$), Fe x Na ($r^2=-0.82$), Fe x P ($r^2=0.59$), Na x Al ($r^2=0.8$), K x Na ($r^2=-0.75$) e Na x P ($r^2=-0.53$).

A unidade sódico-sílica está relacionada às zonas com forte silicificação. Quimicamente é semelhante à unidade descrita anteriormente, mas revela teores mais elevados de Si (>27 %), Hf (>5 ppm) e Zr (> 185 ppm) e menores em W (0,6–1,5 ppm). A unidade se destacou nas seguintes correlações Fe x Mg ($r^2=0.76$), Fe x Na ($r^2=-0.61$), Al x Na ($r^2=0.5$), Mg x Na ($r^2=-0.65$) e Na x K ($r^2=-0.74$).

A unidade sódico-potássica (baixo Ca) é transicional entre os metassomatismos sódico e potássico. Revela um decréscimo nos teores de Na (2,5–3,5 %) em relação as unidades sódica e sílico-sódica e aumentos de K (0,8–1,68 %), Ba (200–360 ppm), Ca (0,9–1,60 %). Essa unidade aponta para o início das substituições dos minerais por biotita. Essa unidade apresentou correlações com os seguintes elementos químicos Fe x Mg ($r^2=0.52$), Al x Na ($r^2=0.58$) e K x Na ($r^2=-0.5$).

A unidade potássica revela essencialmente biotita, feldspato potássico, quartzo e clorita e, subordinadamente, albita, actinolita, hematita, magnetita, calcopirita, carbonatos e epidoto. Apresenta teores maiores de K (2,4–3,8 %) e Rb (183 ppm em média), o que a diferencia das outras unidades em função do conteúdo de potássio. Outros elementos químicos se destacaram nessa unidade tais como Ba (510 ppm em média), Cs (>1 %), Li (>10 ppm) e Tl (>0,19 ppm). As melhores correlações que essa unidade apresentou foram Fe x K ($r^2=0.58$), Fe x Mg ($r^2=0.63$), Fe x Na ($r^2=-0.63$), K x Mg ($r^2=0.67$), K x Na ($r^2=-0.63$) e Mg x K ($r^2=0.67$).

A unidade clorítica apresenta teores medianos de K (1,57 % em média) e Rb (100 ppm em média) em comparação às demais unidades. Outros elementos de destaque são Mg (>1,36 %), Be (2,05 ppm), Ca (>3,18 %), Ce (168 ppm em média), La (120 ppm em média), Mn (504 ppm em média) e Mo (6,9 ppm em média). Apresenta em relação a unidade potássica, maior volume de anfibólio (actinolita) e, provavelmente, de clorita magnésiana. Ocorre normalmente em intercalações com as unidades cálcicas e/ou potássica. Mostra moderada associação com teores de cobre que atingem até 1,28 % (0,3 % em média). Foram observadas poucas correlações significativas, as principais foram Fe x Na ($r^2=-0.51$), Al x K ($r^2=0.51$) e Al x P ($r^2=-0.54$).

A unidade fêrrica corresponde a um grupo definido devidos a teores anômalos de Fe ($>12,05\%$) e resultados relativamente médios de Ca (média de $2,26\%$), Mg (média $1,67\%$) e K ($1,45\%$ em média). Os teores relativamente elevados de Fe são em função de variado conteúdo de magnetita, clorita e actinolita. Essa unidade ocorre principalmente em zonas de brechas ou intercalados nas zonas potássica e clorítica na forma de cristais de magnetita deformados preenchendo foliações. Destacam-se com teores médios a elevados Ag ($0,56$ ppm em média), As ($1,1$ ppm em média), Bi ($0,06$ ppm em média), Cd ($0,11$ ppm), Co ($50,8$ ppm em média), Ga ($52,6$ ppm), In ($0,373$ ppm em média), Mo (14 ppm em média), Ni (338 ppm em média), S ($1,36\%$), Se (3 ppm em média), Sn ($11,2$ ppm em média) e Te ($1,14$ ppm em média). Essa unidade está diretamente associada a altos teores de cobre ($>1,72\%$). As avaliações dos gráficos de correlações tiveram bons resultados para Fe x Na ($r^2=-0.81$), Fe x Mg ($r^2=0.57$), Ca x K ($r^2=-0.52$), Ca x Na ($r^2=0.52$), Ca x P ($r^2=0.62$), K x P ($r^2=-0.61$) e Mg x Na ($r^2=-0.53$).

A unidade cálcica apresenta assembleia mineralógica com calcita, apatita, epidoto e quartzo, bem como conteúdos variáveis de magnetita, actinolita, biotita, calcopirita, albita, hematita, biotita, dolomita, feldspato potássico, allanita e monazita. Destaca-se por teores mais elevados Al ($>3,3\%$), Ca ($>6,2\%$), Ce (>131 ppm), Cr (33 ppm em média), P (>550 ppm), Pb ($4,3$ ppm em média), S ($0,13\%$ em média), Sc (33 ppm em média), Sr (102 ppm em média), Ti ($>0,3\%$), V (268 ppm em média), Y ($33,7$ ppm em média) e Zn (33 ppm em média). Essa unidade também está diretamente relacionada com a mineralização cuprífera ($0,3\%$ em média), porém apresenta variabilidades nos teores de Cu ($0,2-3,2\%$). Assim como a unidade fêrrica, tem sua ocorrência principalmente em brechas centimétricas ou intercalada com as unidades cloríticas. Observou-se através dos gráficos de correlação que o elemento químico Al teve bons resultados com quase todos os outros elementos tais como Al x Ca ($r^2=0.51$), Al x K ($r^2=-0.61$), Al x Mg ($r^2=-0.67$) e Al x Cr ($r^2=-0.67$). Destaca-se também as correlações entre Ca x K ($r^2=-0.83$), K x Mg ($r^2=0.67$) e Mg x Cr ($r^2=0.9$).

No Sossego/Curral as zonas mineralizadas tiveram mais afinidades com as unidades cloríticas e potássicas (Fe+Ca+K). Vale ressaltar que estruturalmente o Sossego é considerado como um arcabouço formado por brechas e “*stockworks*”, parte das mineralizações ocorrem a basicamente com quase todas as unidades classificadas, com exceção da sódica e minoritariamente nas sódico-sílica e cálcica. A faixa considerada como baixo teor ($>0,2$ a $<0,5\%$ de Cu), observou intervalos muitos locais de veios ou vênulas de Cu (calcopirita) principalmente nas unidades cloríticas e sódico-potássica, mais distais a brecha principal e nas unidades potássicas na forma, principalmente, preenchendo as foliações da rocha. Nesses

baixos teores se destacam as unidades sódico-cálcica, cálcico-férrica e férrica. Os intervalos considerados como médio ($>0,5$ a $<0,9$ % Cu) e alto teores ($>0,9$ % de Cu) observou a predominância das unidades cloríticas, potássicas e subordinada a unidade férrica (Figs. 32–33).

As análises multivariáveis geoestatísticas realizadas nos *Boxplots* (Figs. 34–37) para o Setor Sossego/Curral definiu os elementos químicos do que se destacaram, e assim, foi possível realizar as separações dos elementos químicos que continham maiores teores e frequências e se destacaram para cada unidade geoquímica e assim podendo sinalizar prováveis vetores geoquímicos para cada unidade (Tabela 3).

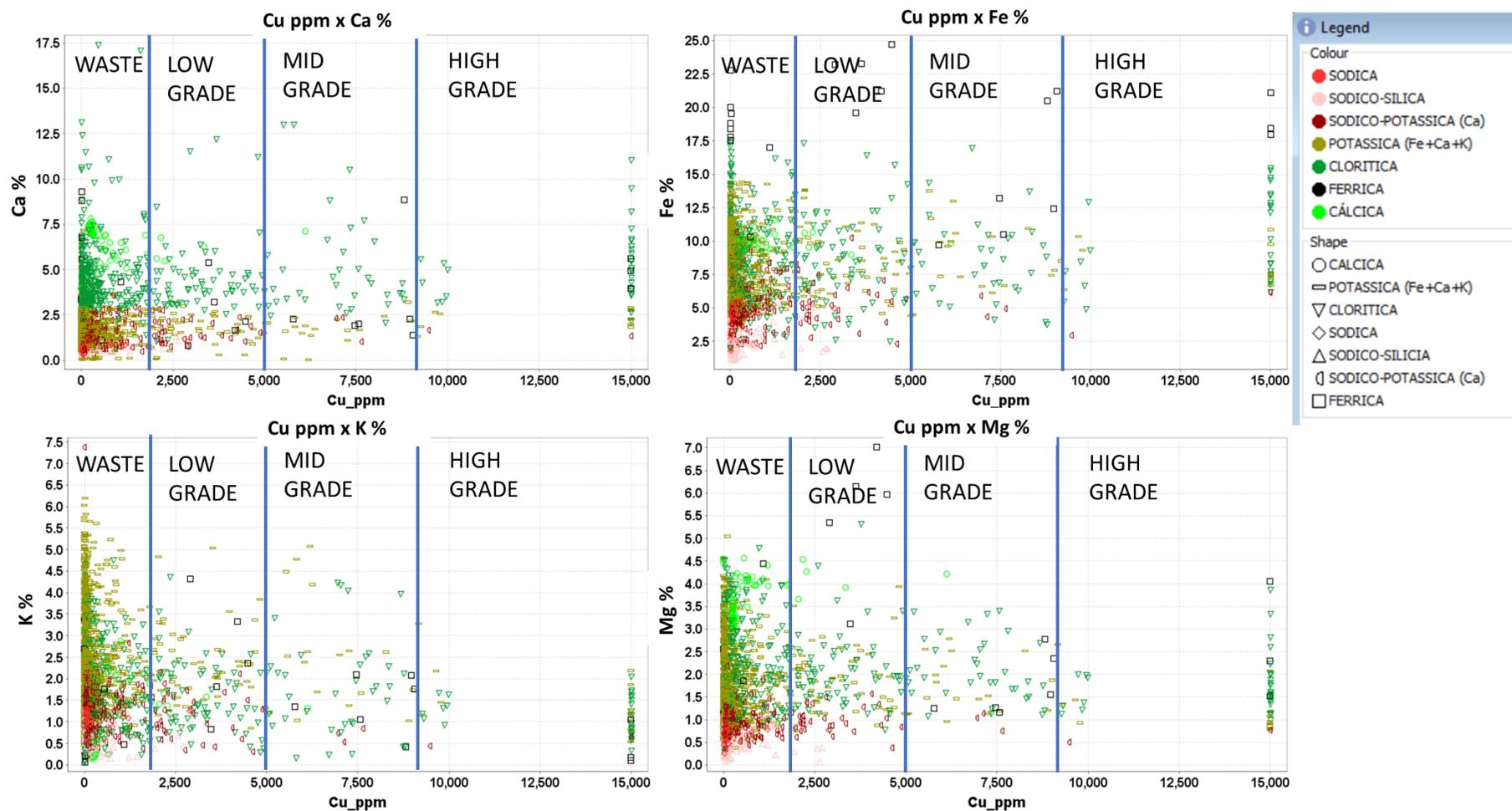


Figura 36 - Diagramas de dispersão (Unidades geoquímicas x teores de Cu do setor Sossego/Curral) utilizados para definir quais unidades geoquímicas tem relação com teores de corte utilizados na mina para definição de rochas estéril (<0,2 % Cu), baixo (>0,2 % Cu <0,5), médio (>0,5 % Cu <0,9) e alto teor (>0,9 % Cu).

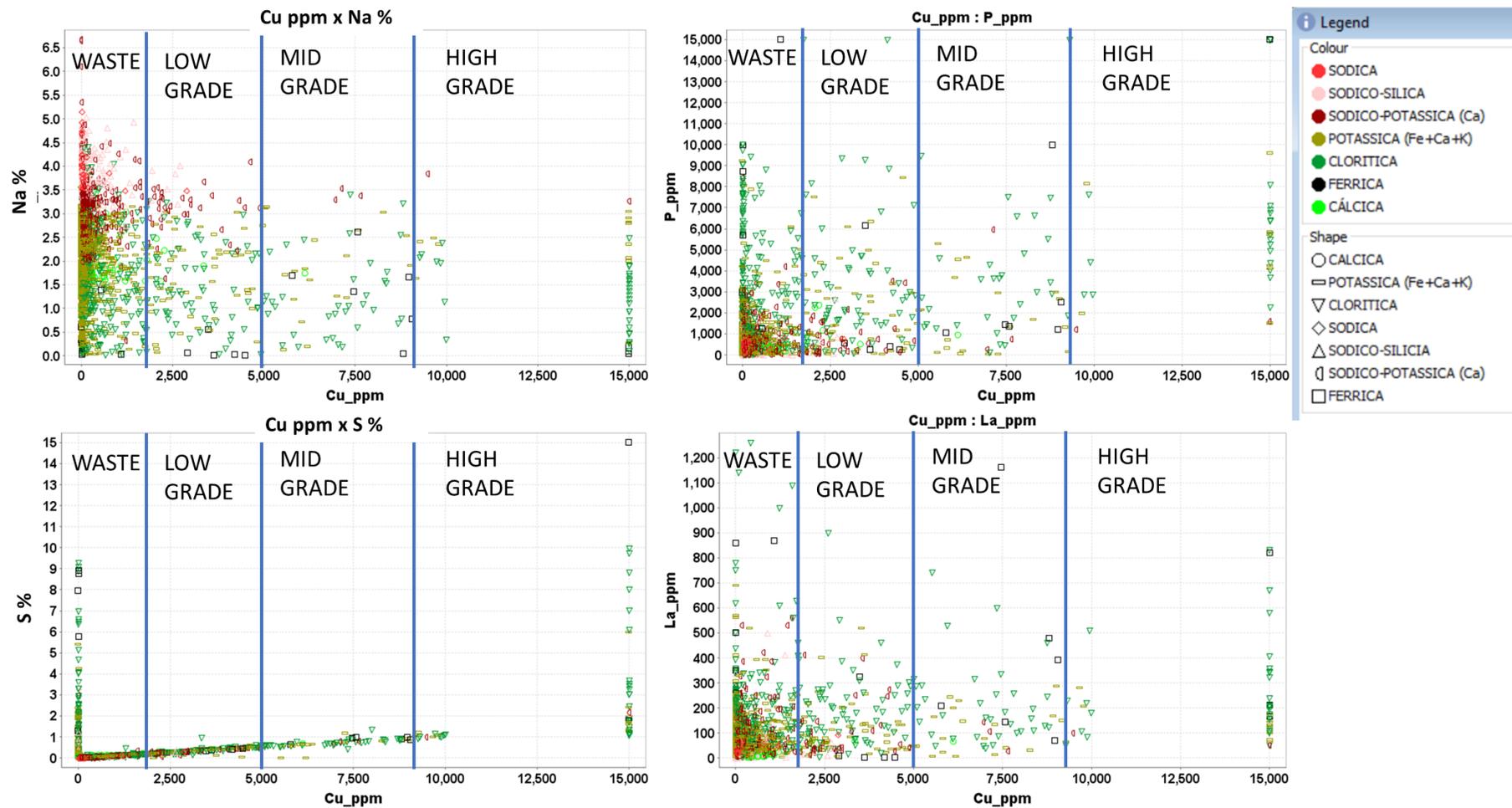


Figura 37 - Diagramas de dispersão (Unidades geoquímicas x teores de Cu do setor Sossego/Curral) utilizados para definir quais unidades geoquímicas tem relação com teores de corte utilizados na mina para definição de rochas estéril (<0,2 % Cu), baixo (>0,2 % Cu <0,5), médio (>0,5 % Cu <0,9) e alto teor (>0.9 % Cu).

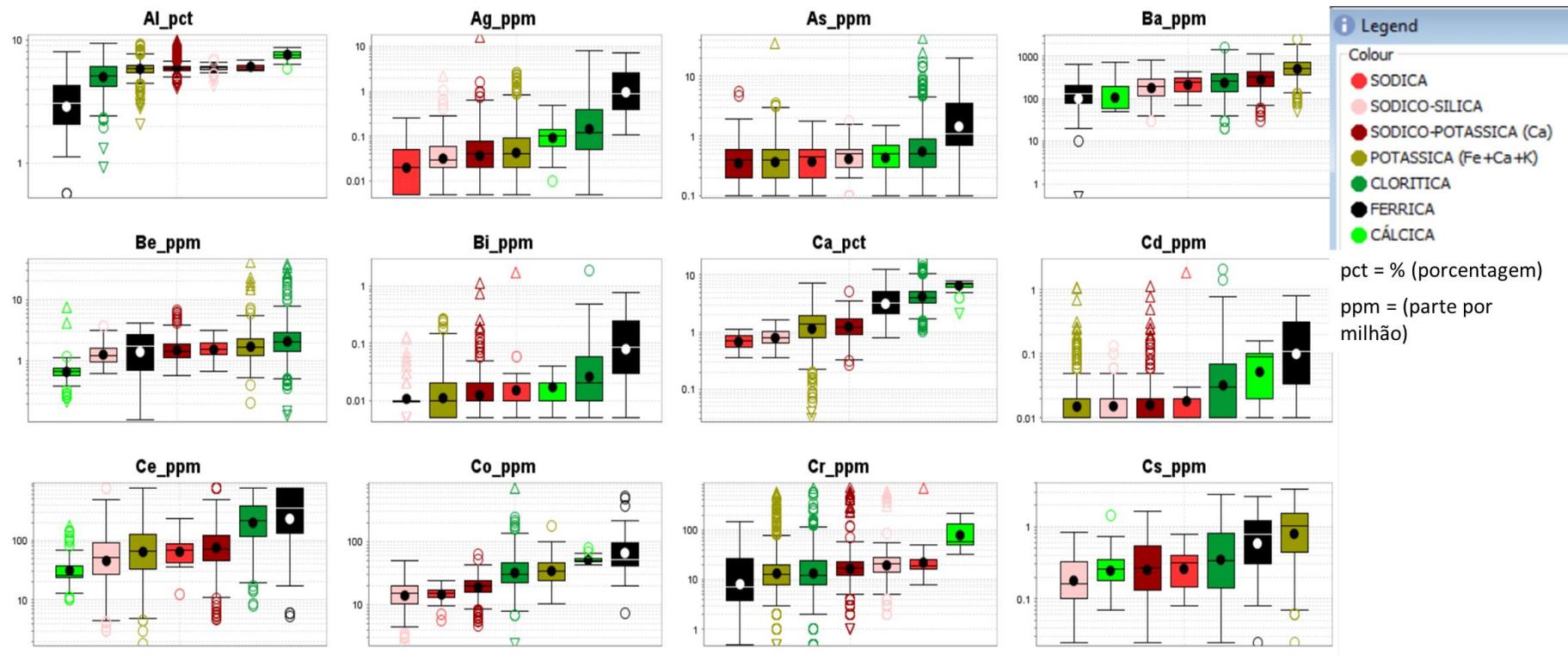


Figura 38 - *Boxplots* das unidades geoquímicas definidas do setor Sossego/Curral com as distribuições estatísticas para Al, Ag, As, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Ce, Co, Cr e Cs.

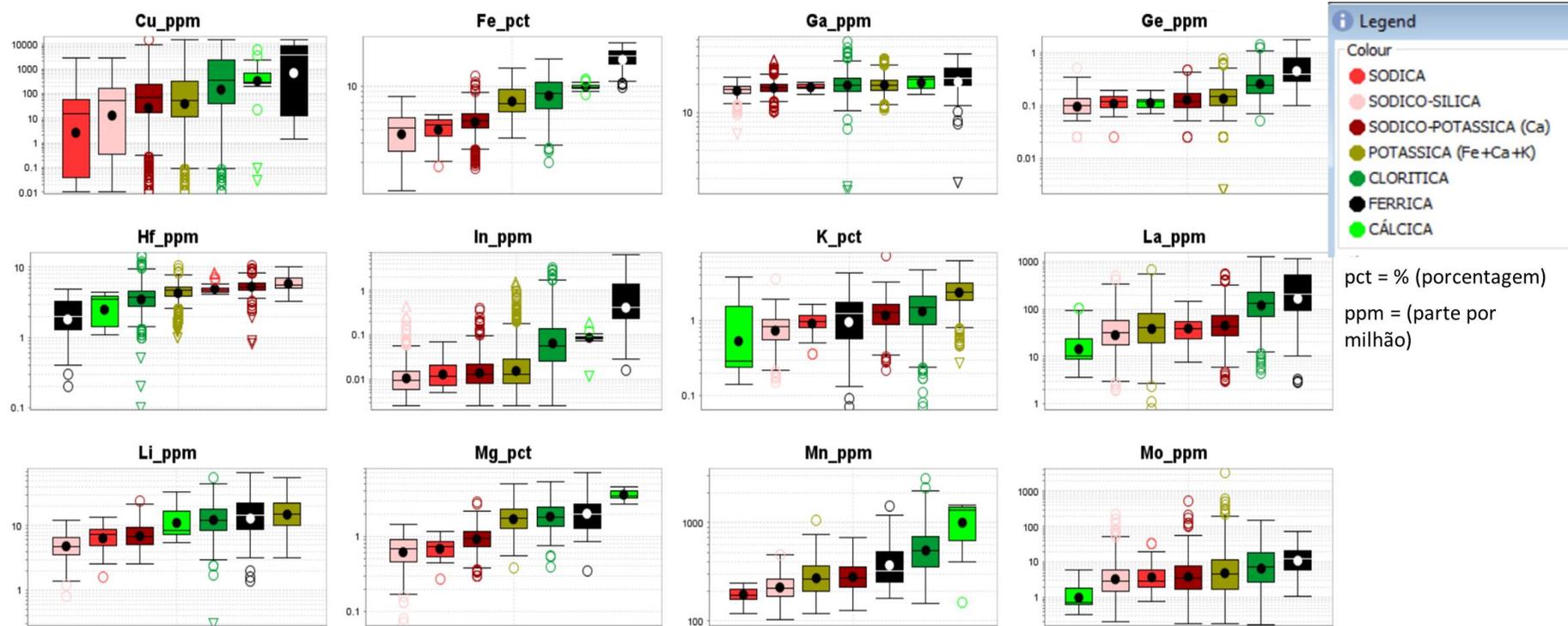


Figura 39 - *Boxplots* das unidades geoquímicas definidas do setor Sossego/Curral com as distribuições estatísticas para Cu, Fe, Ga, Ge, Hf, In, K, La, Li, Mg, Mn e Mo.

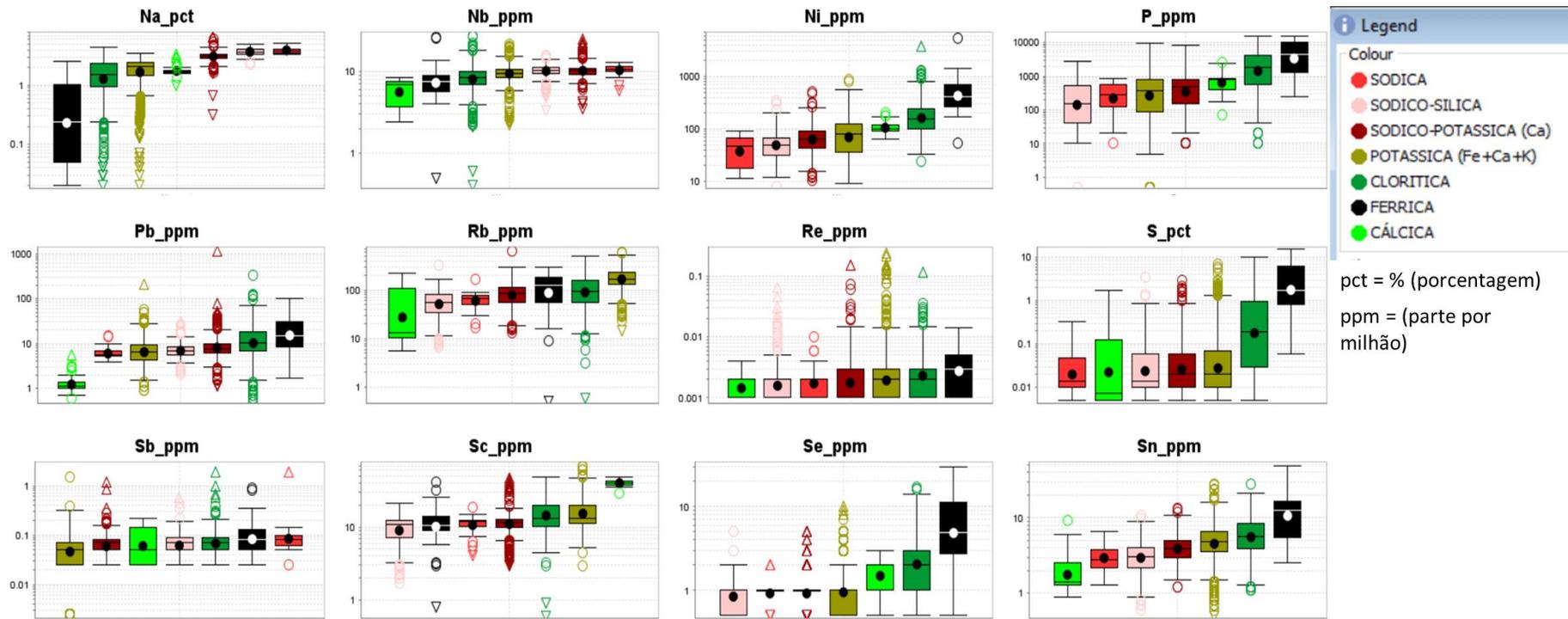


Figura 40 - *Boxplots* das unidades geoquímicas definidas do setor Sossego/Curral com as distribuições estatísticas para Na, Nb, Ni, P, Pb, Re, S, Sb, Sc, Se e Sn.

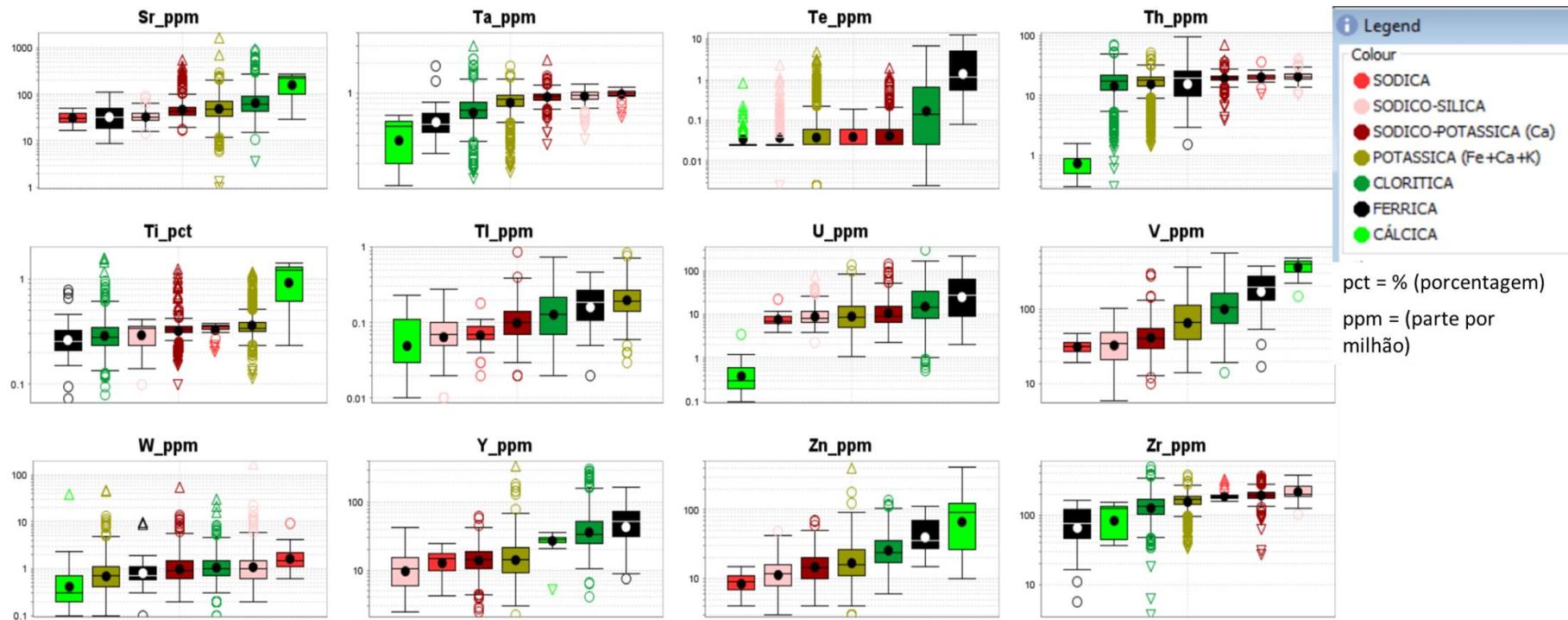


Figura 41 - *Boxplots* das unidades geoquímicas definidas do setor Sossego/Curral com as distribuições estatísticas para Ta, Te, Th, Ti, Tl, U, V, W, Y, Zn e Zr.

Tabela 3 - Separação dos elementos químicos que podem ser utilizados como vetores para as unidades geoquímicas do setor Sossego/Curral.

UNIDADE GEOQUIMICAS SETOR SOSSEGO/CURRAL							
ELEMENTOS QUIMICOS	SODICA	SODICO-SILICA	SODICO-POTASSICA	POTASSICA	CLORITICA	FERRICA	CALCICA
	Na	Hf	Hf	Ba	Be	As	Al
	Nb	Th	Nb	Cs	Ce	Cd	Ca
	Ta	Zr	Sb	K	Mo	Ce	Cr
	Sb	Al	Th	Li	Ag	Co	Mg
	W	Na	Al	Rb	As	Fe	Mn
	Al	Nb	Ba	Tl	Ba	Ga	Sc
	Be	Ta	K	Ce	Ca	Ge	Ti
	Hf	W	La	Co	Cd	In	V
	Zr		Na	Ge	Co	La	Zn
	Th		Ta	Mg	Cs	Re	Ag
			Ti	Sc	Cu	S	As
			Zr	Sr	Fe	Sb	Cd
				Ti	Ga	Se	Co
					Ge	Sn	Cu
					In	Te	Fe
					K	U	Ga
				La	Y	In	
				Li	Ag	S	
				Mg	Be	Se	
				Mn	Ca	Sn	
				Rb	Cs	Sr	
				S	Cu		
				Sc	Li		
				Se	Mg		
				Sn	Mn		
				Sr	Mo		
				Te	Rb		
				Tl	Tl		
				U	V		
				V	Zn		
				Y			

6.7 MODELAGENTO 3D DAS UNIDADES E VETORES GEOQUÍMICOS

O modelamento 3D representa uma ferramenta muito importante para a visualização e tomada de decisões em um projeto de mineração. Ele mostra a representatividade computadorizada de litologias, estruturas, geoquímica e dados de amostragens em superfície e subsuperfície (Fallara *et al.* 2006). De maneira geral, a técnica de modelos implícitos 3D permite testar vários cenários geológicos de forma rápida, incluindo tendências geológicas definidas pelo usuário. Esses modelos se diferenciam de técnicas de modelagem explícita utilizadas por *softwares* anteriormente disponível no mercado (Cowan *et al.* 2002).

6.7.1 Modelos das unidades geoquímicas

A modelagem 3D, em função dos contextos geológico, estrutural, cronológico e geoquímicos distintos, foi desenvolvida separadamente para os setores Sequeirinho/Baiano e Pista e outra para o setor Sossego/Curral.

O modelo Sequeirinho/Baiano e Pista envolve 15 furos para o setor Pista e 16 furos para o Sequeirinho/Baiano. Ao passo que no Modelo Sossego/Curral foram utilizados um total de 13 furos de sondagem para sua elaboração. Em ambos os modelos, os furos de sondagem apresentam resultados de análises químicas utilizando o método ICP-MS para 48 elementos. Vale ressaltar que todos os furos contemplam as análises citadas, porém ocorrem em suas metragens intervalos não analisados por decisões estratégicas da empresa detentora dos resultados, o que explica os “*gaps*” em suas interpretações.

Para as elaborações dos modelos são necessários realizar premissas importantes para termos bons resultados finais. Um dos primeiros passos são as validações do banco de dados e definições dos limites espaciais (X, Y e Z), chamados de caixas ou “*Boundary*”. Outra etapa fundamental é a geração dos planos estruturais (*Meshes*) por meio das informações obtidas de históricos de mapeamentos nas cavas, dados de furos de sondagens, mapas regionais, imagens de satélites e interpretações geofísicas (Fig. 38). A partir desses planos é possível criar anisotropias por meio das elipsoides que variam de acordo com as direções predefinidas pelo modelador (Fig. 39).

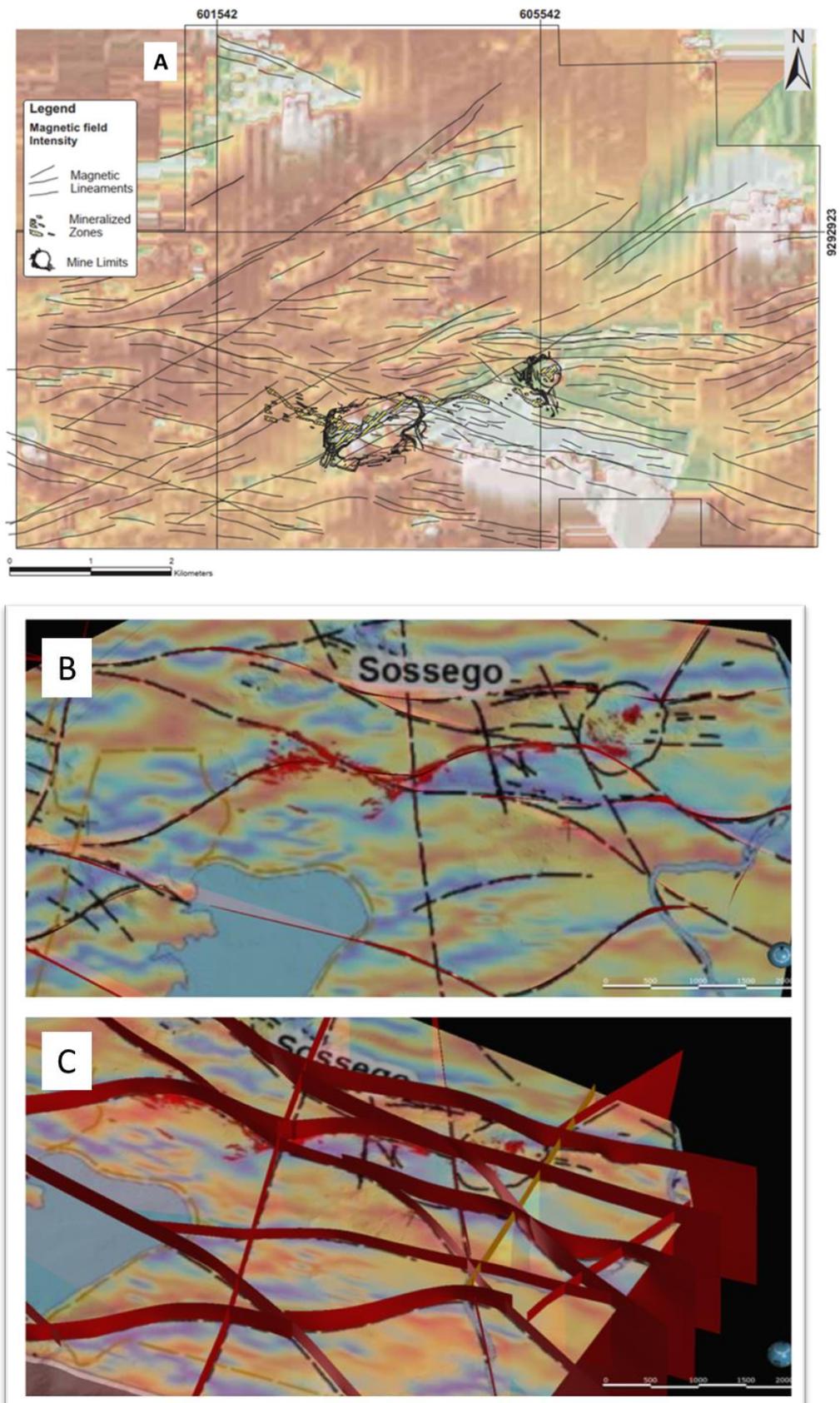


Figura 42 - Planos de falhas baseados nos mapas estruturais. A) Lineamentos magnéticos interpretados e zonas mineralizadas projetadas (Domingos 2009); B) Interpretações de falhas e lineações em mapa aerogeofísico (Relatório Interno Vale) e C) Planos 3D de falhas no *software Leapfrog*.

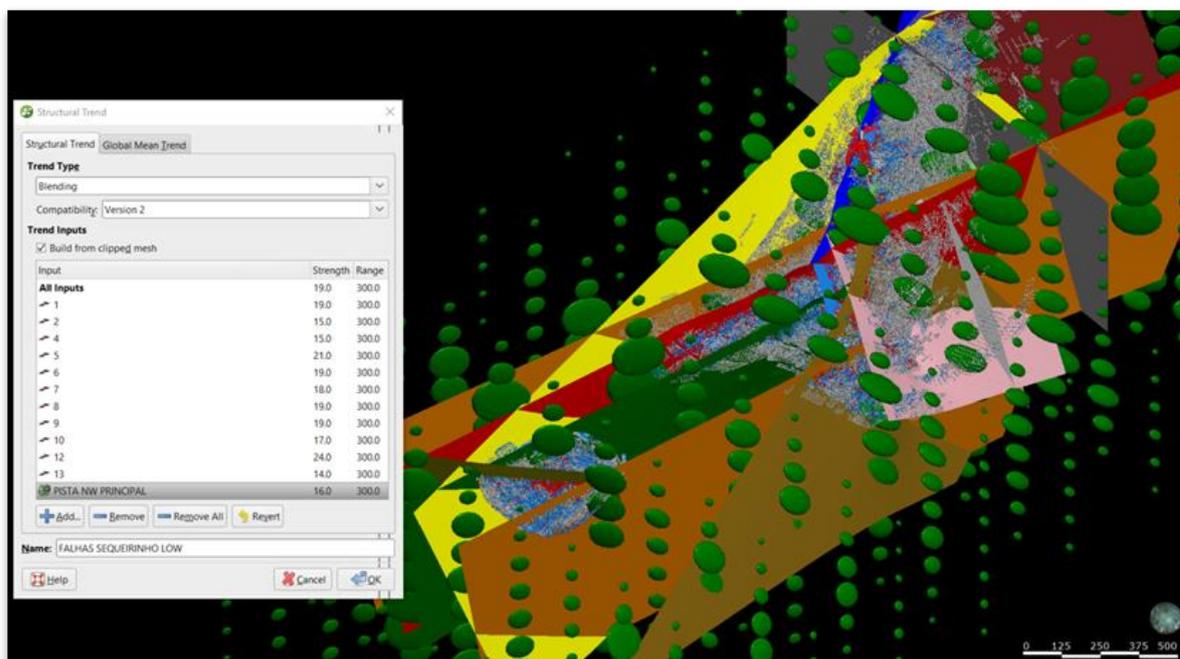


Figura 43 - Utilização de técnicas de modelagem para criação de tendências estruturais (*Structural trends*) a serem aplicadas nos modelos.

Para as construções dos modelos geológicos, especificamente em *softwares* de modelamentos implícitos, definiu-se os tipos de algoritmo de interpolação de acordo com a especificidade do depósito, as resoluções das superfícies, aplicações das anisotropias modeladas e realizações de diversos ajustes em parâmetros estatísticos contido no software (Tabela 4). Após concluído as criações de todos os corpos das unidades geoquímicas, foram organizadas as cronologias para cada superfície de acordo com a proposta de zonamentos hidrotermais, unidades geoquímicas e vetores químicos (Figs. 40–42).

Tabela 4 - Parâmetros utilizados para modelar as unidades geoquímicas dos setores Sequeirinho/Baiano, Pista e Sossego/Curral.

SEQUEIRINHO/ PISTA							
UNIDADES GEOQUIMICAS	LOWER BOUND	UPPER BOUND	BASE RANGE	TOTAL SILL	DRIFT	ALPHA	RESOLUTION
SODICA	-10	41,97	600	600	CONSTANTE	9	5
SODICO-SILICA	-44,17	44,17	500	1,250	CONSTANTE	9	5
SODICO-CALCICA	-35	41,97	320	820	CONSTANTE	9	5
SODICO-FERRICA	-44,17	17,71	800	300	LINEAR	3	2
CALCICO-FERRICA	-44,17	44,17	350	1,350	CONSTANTE	9	5
FERRICA	-44,17	44,17	1000	365	LINEAR	3	2
POTASSICO-CLORITICA	-10	41,97	700	350	NONE	9	5
SILICICA	-41,97	27,55	500	250	NONE	3	2
FELDSPATHICA K	-41,97	22,65	500	400	NONE	3	2
MAGNESIANA	-44,17	30,59	500	35	LINEAR	3	5
SOSSEGO							
CALCICA	-15,90	35,90	300	300	CONSTANTE	3	2
FERRICA	-15,00	35,90	300	300	CONSTANTE	9	2
SODICO-SILICA	-36,09	36,09	200	500	NONE	9	5
SODICA	-36,09	26,56	500	250	LINEAR	9	2
SODICO-POTASSICA	-36,09	36,09	250	320	NONE	9	5
POTASSICA	-18,00	20,12	500	400	NONE	9	5
CLORITICA	-12,00	20,01	350	400	NONE	9	5

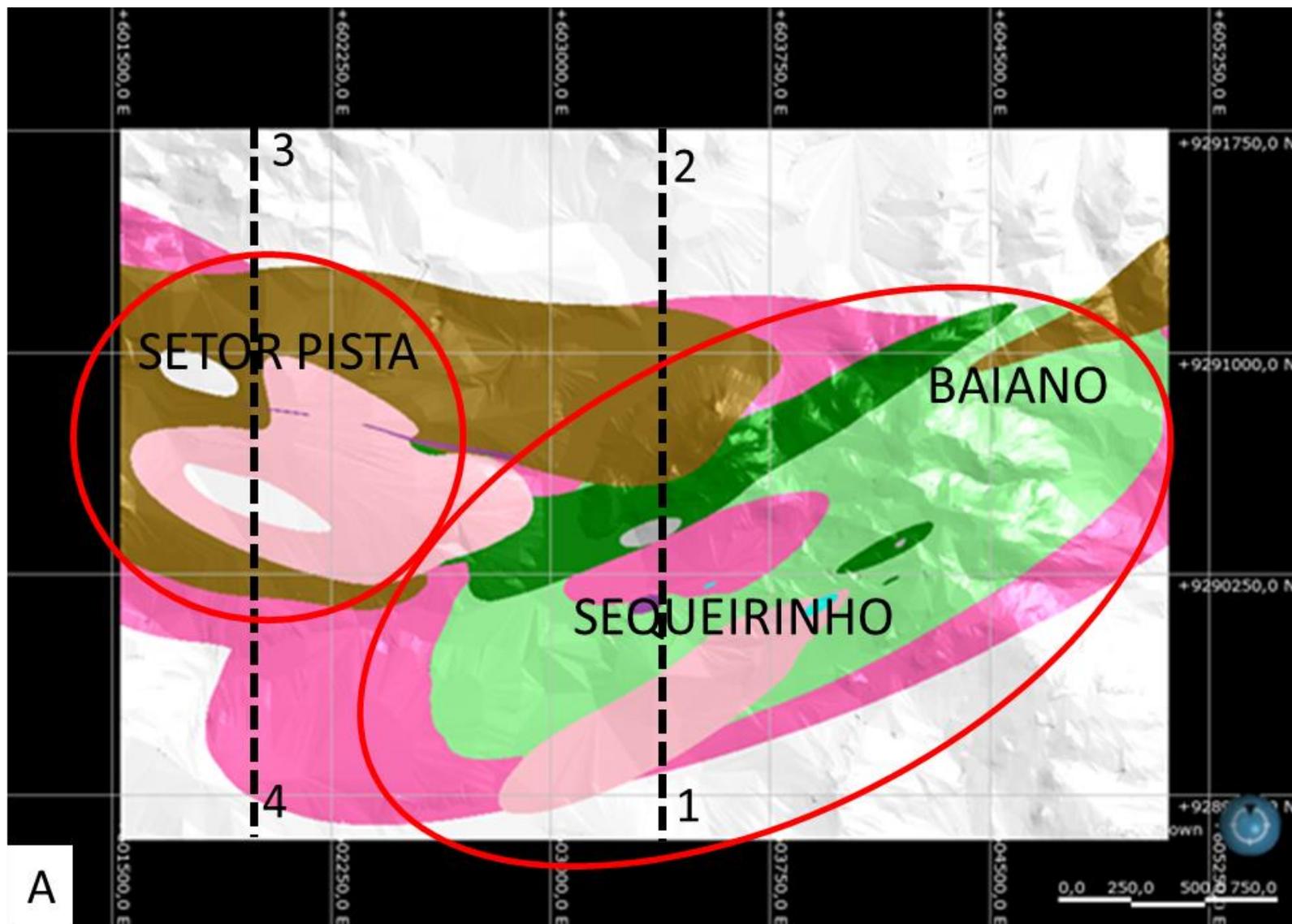


Figura 44 - (A) Modelo geológico mostrando uma visão panorâmica em planta das unidades geoquímicas propostas para os setores Pista e Sequeirinho/Baiano.

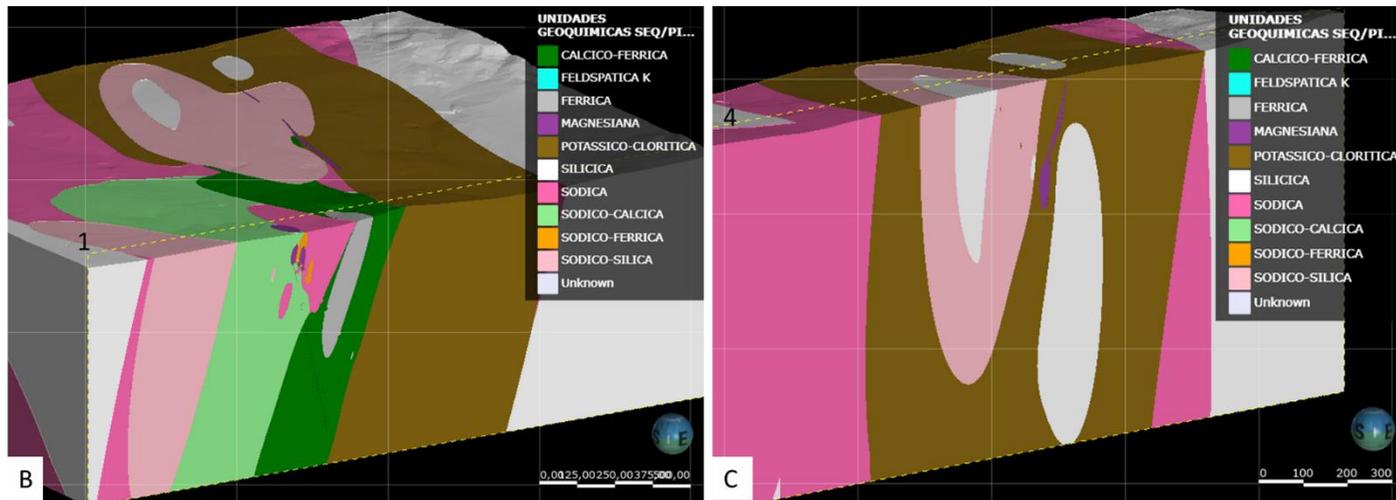


Figura 45 - (B) Corte longitudinal do modelo geológico das unidades geoquímicas do setor Sequeirinho/Baiano e (C) Corte longitudinal mostrando uma seção das unidades geoquímicas do setor Pista.

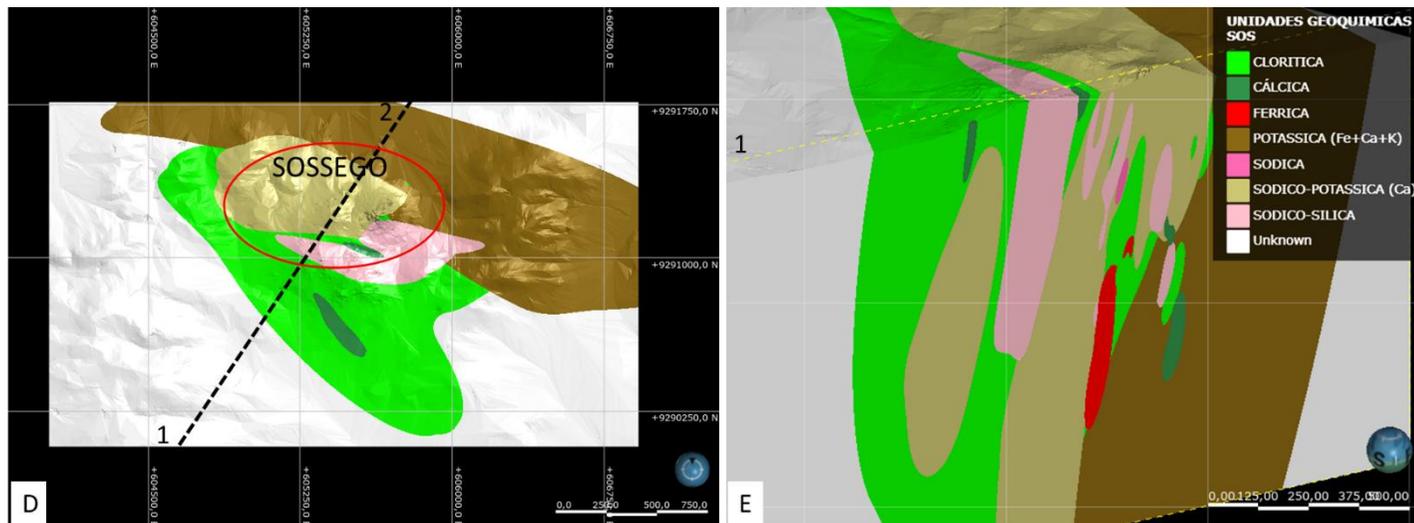


Figura 46 - (D) Modelo com a visão em planta das unidades geoquímicas dos setores Sossego/Curral e (E) Corte longitudinal mostrando um panorama das distribuições das unidades geoquímicas em uma seção no setor Sossego/Curral.

6.7.2 Modelos de vetores geoquímicos

O modelamento dos vetores geoquímicos é baseado no método de base radial (RBFs), considerada a melhor técnica para construções desses modelos químicos de forma individuais e rápidas. Essa técnica de base radial foi utilizada uma vez que as funções de interpolações são globais e melhores para trabalhos com dados numéricos de tores.

Nesse trabalho foram realizados nove modelos de elementos químicos considerados fundamentais para visualizar as distribuições espaciais dos teores e suas vetorizações. As confecções dos modelos precisaram seguir, assim como os modelos geológicos das unidades geoquímicas, diversas premissas e passos para suas criações. Para os modelos de vetores químicos empregou-se unicamente valores numéricos de teores, sendo contemplados os elementos químicos chaves tais como Al, Ca, Cu, Fe, K, Mg e Na. Esse tipo de técnica RBFs permitiu realizar diversos testes simultâneos de modelos numéricos para chegar em um modelo ideal, e para isso foram extremamente importante as definições dos parâmetros tais como: definições de compostas dos furos (*Compositing Length*), mínima cobertura dessas compostas (*Minimum Coverage*), parâmetros de interpolação (*Drifts, Sill, Base Range, Nugget e Accuracy*) e escolhas de intervalos das iso-superfícies que para cada elemento químico obtivessem melhores representatividades espaciais. Após as materializações dos modelos, foi possível realizar interpretações sobre os caminhos preferenciais, distribuições espaciais e relações entre os elementos químicos (Figs. 43–48), ficando clara e coerente as comparações com as definições das unidades geoquímicas propostas.

VETORIZAÇÃO Fe (Ferro) SEQUEIRINHO/BAIANO

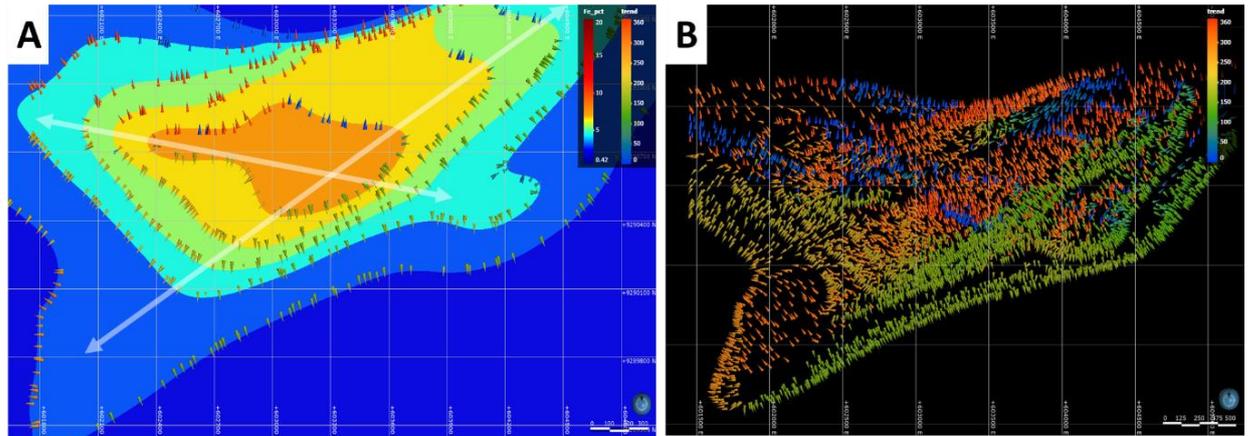


Figura 47 - (A) Modelo com a visão em planta das distribuições dos teores e indicadores dos vetores de Fe dos setores Sequeirinho/Baiano e Pista. (B) Visão das distribuições 3D dos vetores de Fe dos setores Sequeirinho/Baiano e Pista.

VETORIZAÇÃO Na (Sódio) SEQUEIRINHO/BAIANO

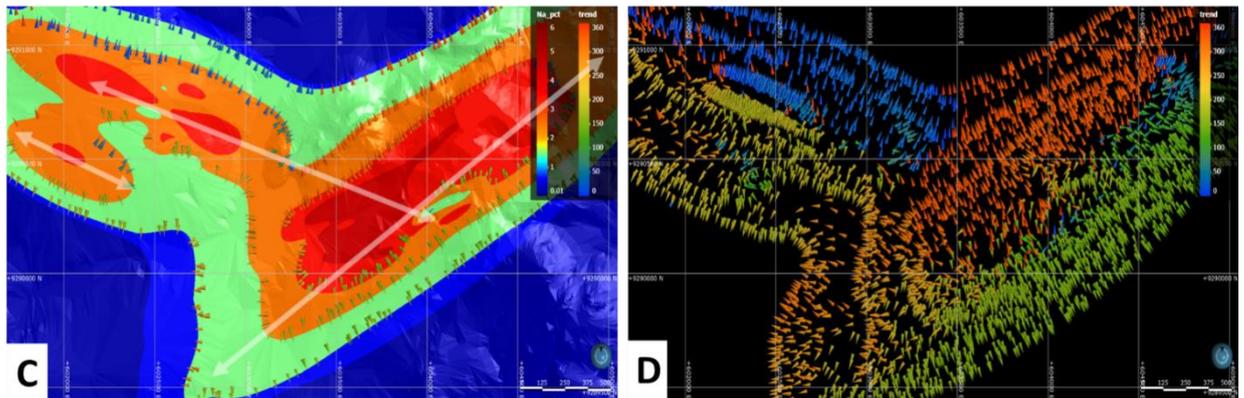


Figura 48 - (C) Modelo com a visão em planta das distribuições dos teores e indicadores dos vetores de Na dos setores Sequeirinho/Baiano e Pista. (D) Visão das distribuições 3D dos vetores de Na dos setores Sequeirinho/Baiano e Pista.

VETORIZAÇÃO Cu (Cobre) SEQUEIRINHO/BAIANO

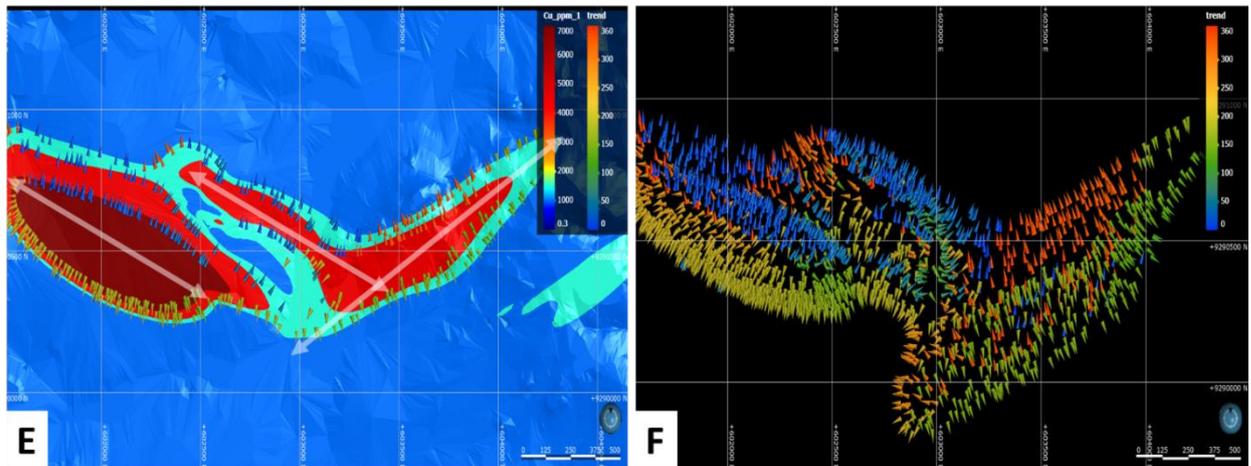


Figura 49 - (E) Modelo com a visão em planta das distribuições dos teores e indicadores dos vetores de Cu dos setores Sequeirinho/Baiano e Pista. (F) Visão das distribuições 3D dos vetores de Cu dos setores Sequeirinho/Baiano e Pista.

VETORIZAÇÃO Na (Sódio) SOSSEGO/CURRAL

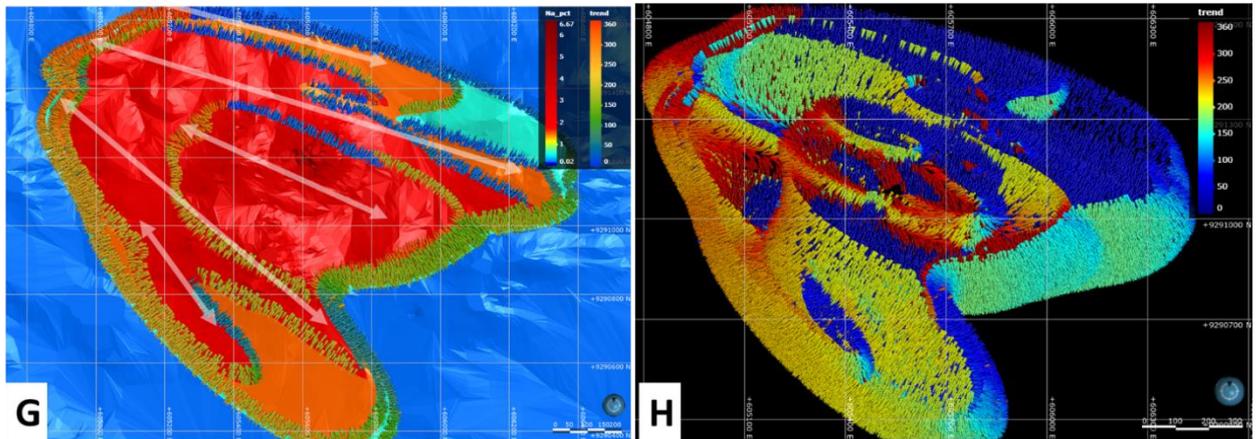


Figura 50 - (G) Modelo com a visão em planta das distribuições dos teores e indicadores dos vetores de Na do setor Sossego/Curral. (H) Visão das distribuições 3D dos vetores de Na do setor Sossego/Curral.

VETORIZAÇÃO Ca (Cálcio) SOSSEGO/CURRAL

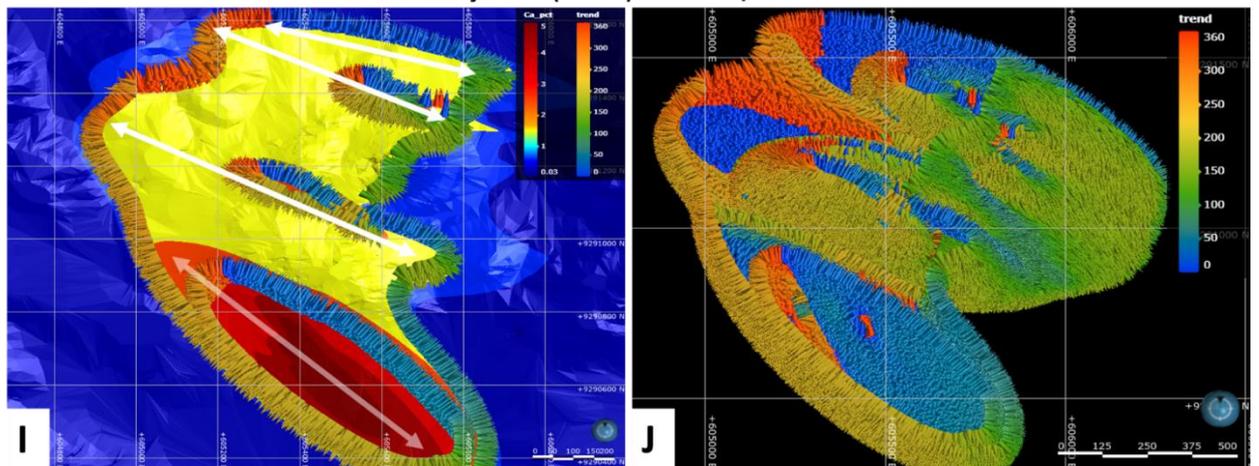


Figura 51 - (I) Modelo com a visão em planta das distribuições dos teores e indicadores dos vetores de Ca do setor Sossego/Curral. (J) Visão das distribuições 3D dos vetores de Ca do setor Sossego/Curral.

VETORIZAÇÃO Cu (Cobre) SOSSEGO/CURRAL

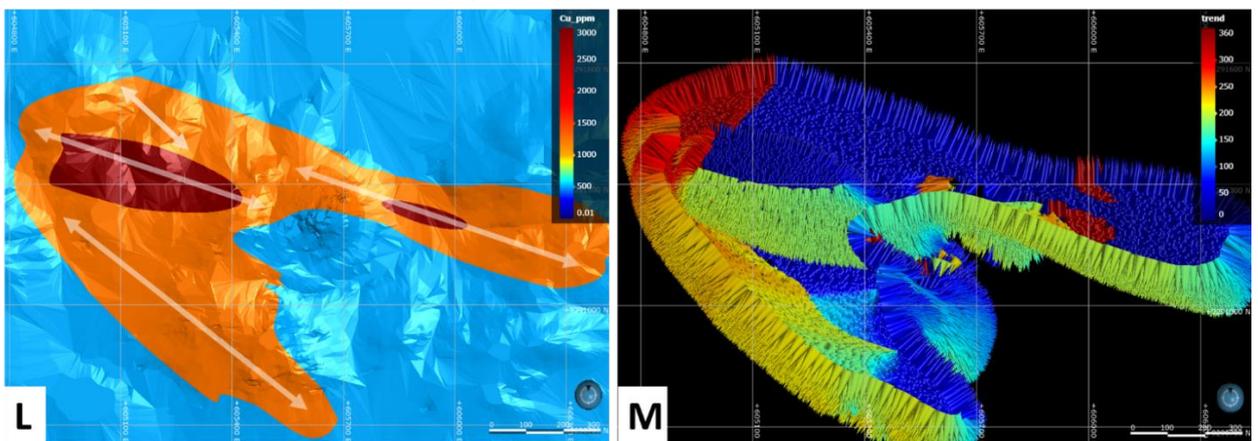


Figura 52 - (L) Modelo com a visão em planta das distribuições dos teores e indicadores dos vetores de Cu do setor Sossego/Curral e (M) Visão das distribuições 3D dos vetores de Cu do setor Sossego/Curral.

6.8 DISCUSSÃO

6.8.1 Resultados estatísticos

As definições dos vetores e unidades geoquímicas do Complexo Sossego (Pista, Sequeirinho/Baiano e Sossego/Curral) no geral revelaram correlações com o uso das técnicas de estatísticas multivariadas, que permitiram definir de forma coerente limites, principais elementos químicos e prováveis paragêneses minerais hidrotermais. Os dados de elementos químicos obtidos a partir rocha total foram extremamente importantes para as comparações e correlações. Foram realizadas análises individualizadas e correlação de elementos selecionados em diagramas de probabilidade, histogramas, binários, ternários e *Bloxplot*, objetivando a identificação de características geoquímicas e suas relações com as associações mineralógicas que materializam as unidades geoquímicas.

6.8.1.1 Diagramas de probabilidade e histogramas

Os diagramas de probabilidades e histogramas mostraram boas distribuições populacionais das amostras, essas técnicas têm como intuito as separações e melhores classificações das unidades geoquímicas propostas. Em todos os depósitos estudados, foram avaliados os comportamentos dos elementos químicos chaves distribuídas de acordo com as mineralogias, tais como Al, Ca, Fe, K, Mg, Na e P. Os tratamentos geoestatísticos permitiram avaliação dos demais elementos disponíveis, principalmente os de interesse econômico, permitindo correlações entre as unidades geoquímicas, possíveis mineralizações e metais subordinados.

No setor Pista os diagramas de probabilidade ficaram coerentes nas avaliações independentes de cada elemento químico, principalmente os elementos maiores, em relações aos grupos das unidades geoquímicas definidas (Fig. 49). O comportamento das curvas de probabilidades para algumas unidades se assemelham (Figs. 49–51) tais como: a) unidades sódico-sílica e magnésiana mostram comportamento semelhante para As, Cu e Te; b) unidades sódica, sódico-sílica, potássica-clorítica e feldspática potássica contém comportamento semelhante para Ce, La, Hf, Nb e Ta; c) sódica e sódico-sílica para Hf, Mn, Mo, Nb, Ta e Zn; d) sódico-sílica e potássica para La, Nb, Ta, U, Th e Hf; e) sódico-sílica e feldspática potássica para Co, La, Nb, Ta, Ti e Hf. Algumas unidades mostram curvas se destacando isoladamente para alguns elementos químicos, sugerindo prováveis vetores químicos, tais como: f) magnésiana com Mn, Ni e Co; g)

feldspática potássica com Ag, Pb, Zn, W, Tl, Mo, Ba e U. Os histogramas para o setor Pista mostram que suas distribuições tiveram comportamento de *logs* padrões normais com discretas inclinações para a direita (Figs. 52–55), esses tipos de comportamentos demonstraram que os teores químicos não apresentaram variabilidades significativas em seus intervalos e/ou faixas numéricas de teores, garantindo distribuições crescentes normais sem quebras bruscas de teores com exceções dos histogramas das unidades sódica e feldspática potássica nos quais apresentaram quebras bruscas de teores de alguns elementos químicos (Figs. 53 e 55).

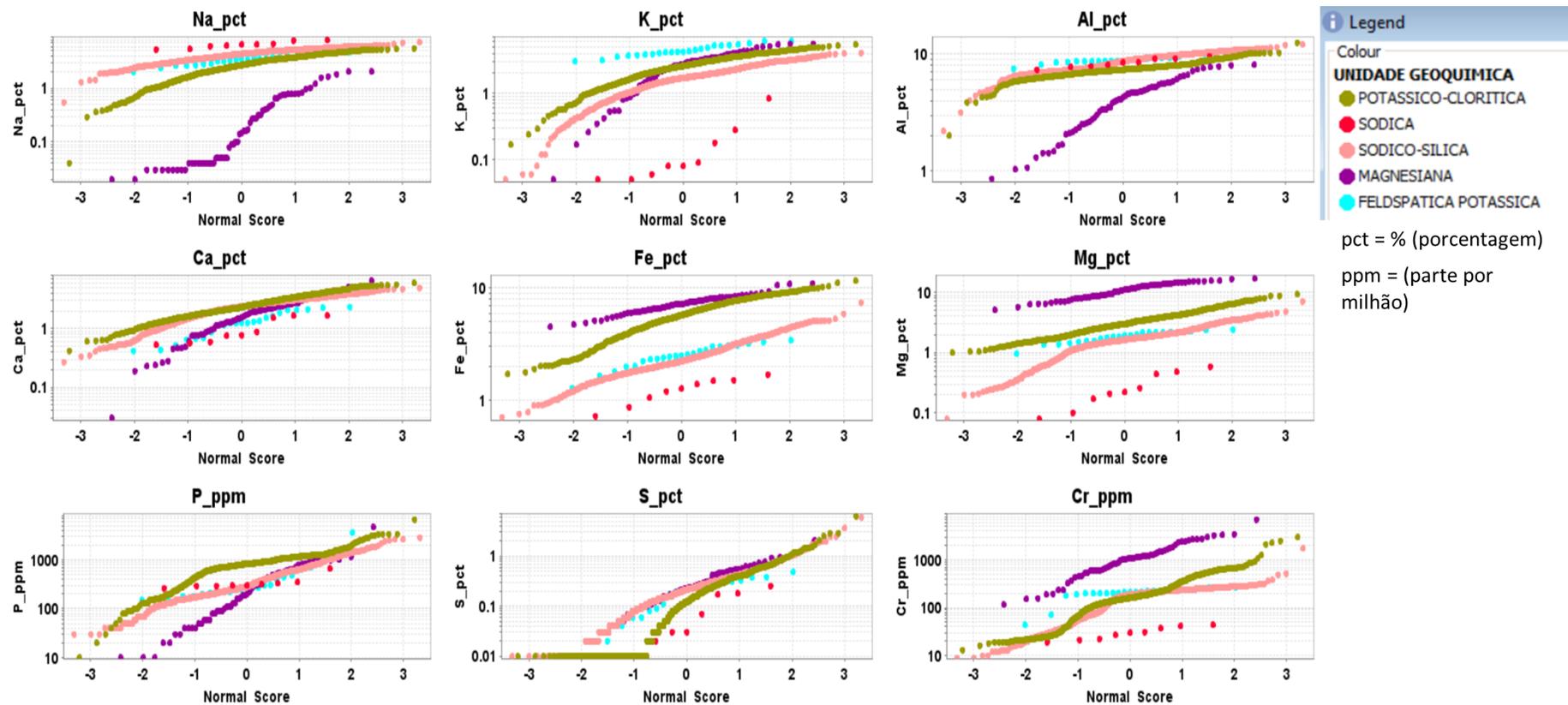


Figura 53 - Diagramas de probabilidades (*split*) no setor Pista mostrando as curvas de cada unidade geoquímica x elementos químicos maiores.

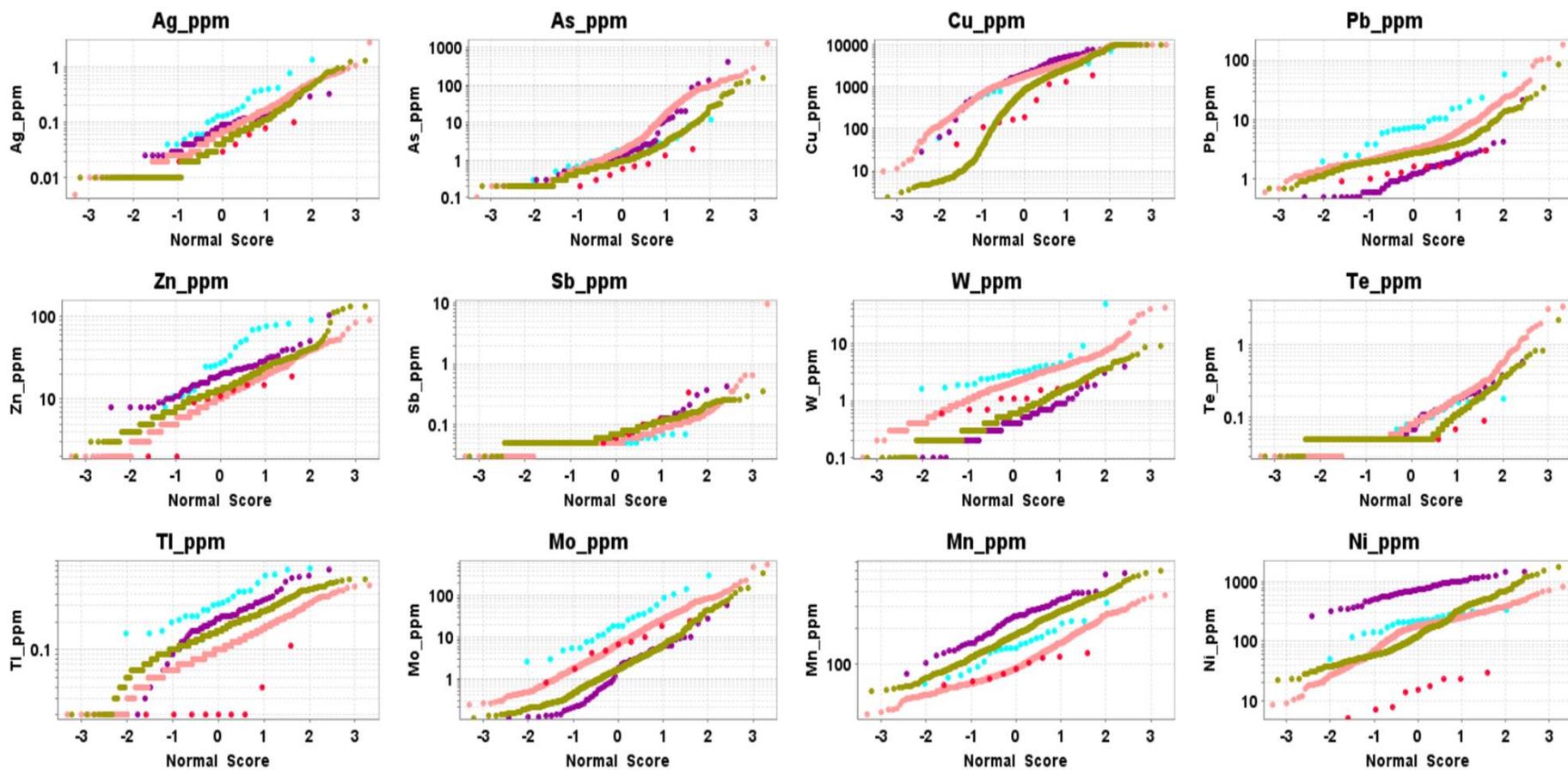


Figura 54 - Diagramas de probabilidades (*split*) no setor Pista mostrando as curvas de cada unidade geoquímica x elementos químicos maiores. Símbolos conforme Figura 49.

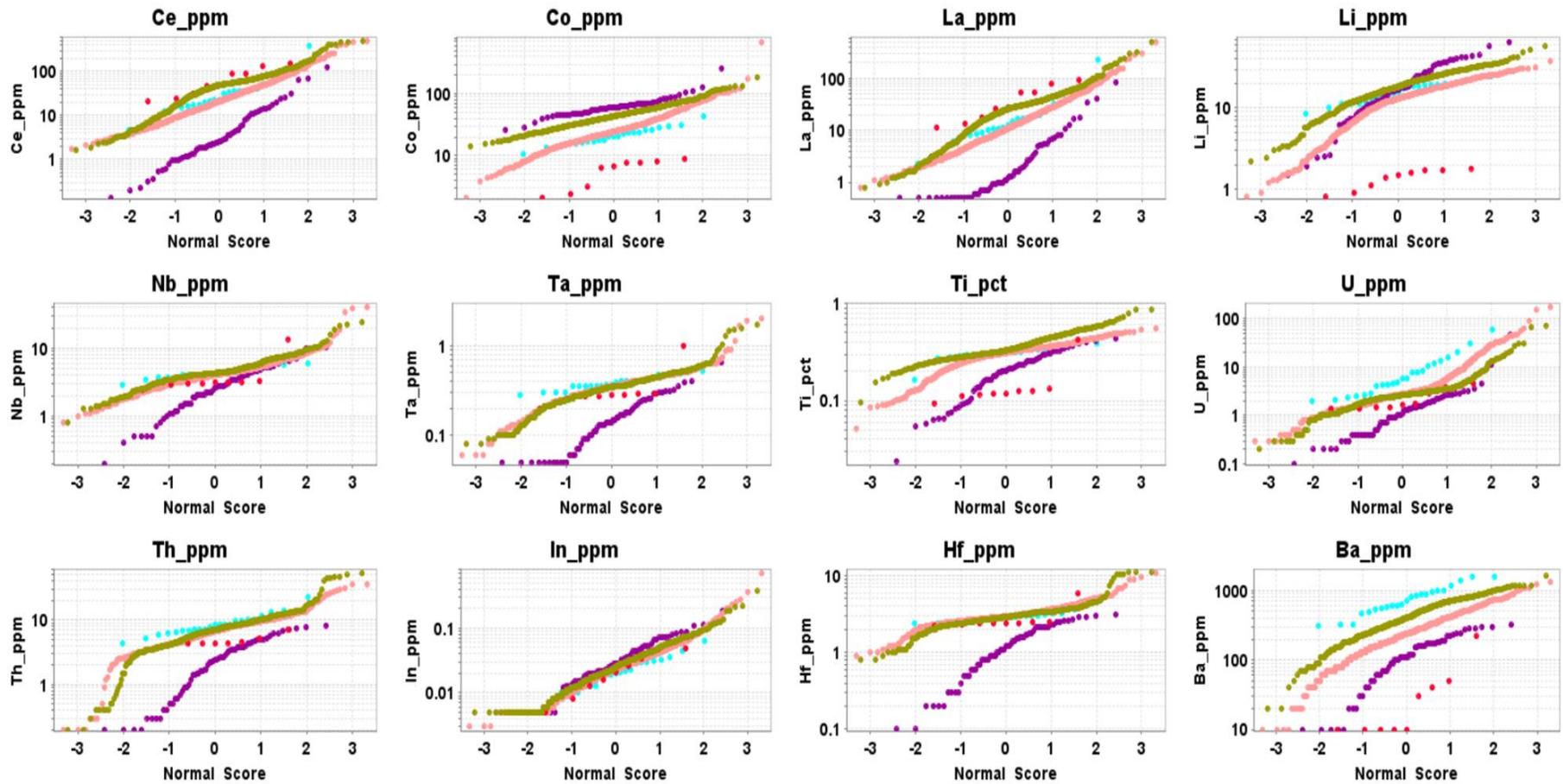


Figura 55 - Diagramas de probabilidades (*split*) no setor Pista mostrando as curvas de cada unidade geoquímica x elementos químicos maiores. Símbolos conforme Figura 49.

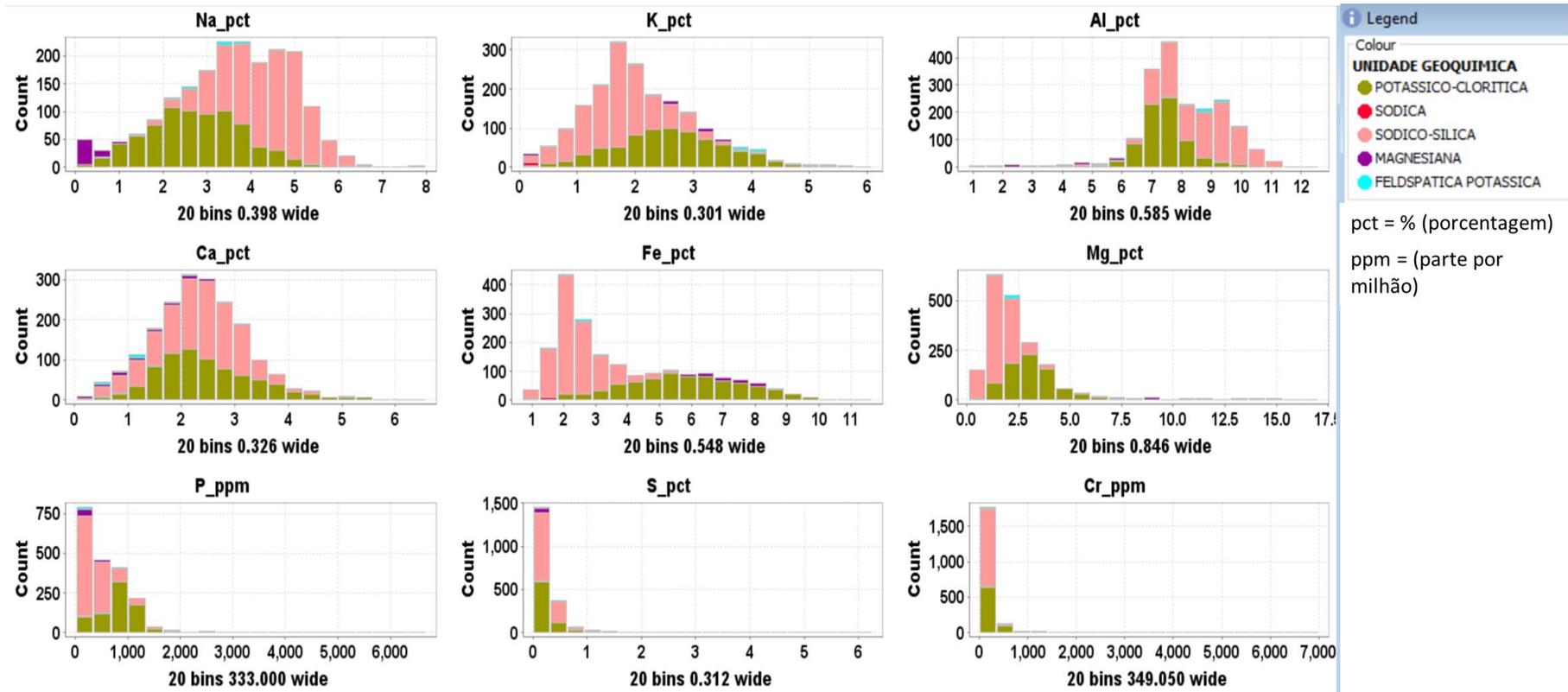
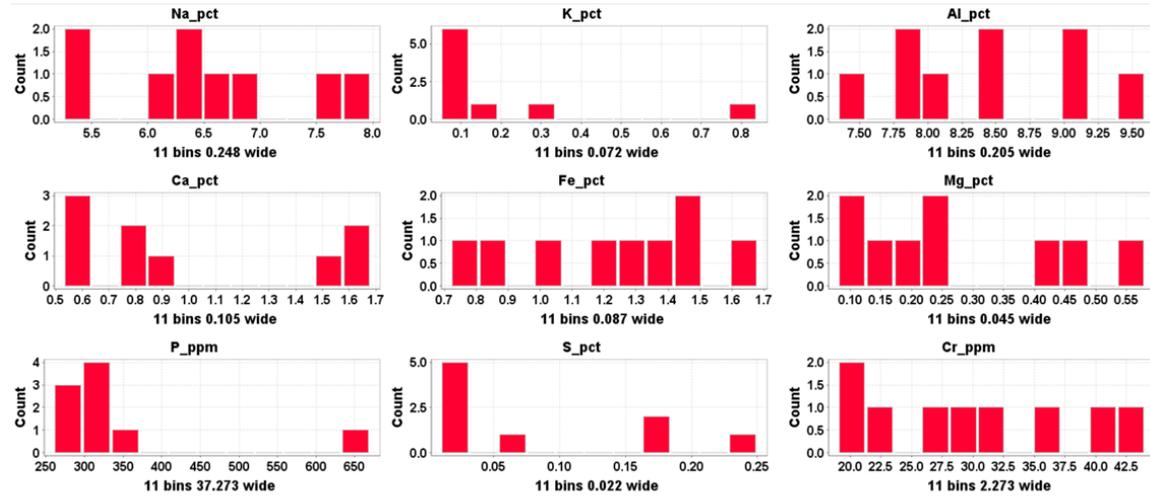


Figura 56 - Histogramas do setor Pista mostrando as distribuições das quantidades e frequências absolutas globais que ocorrem nas unidades geoquímica x elementos químicos maiores.

UNIDADE SODICA



UNIDADE SODICO-SILÍCA

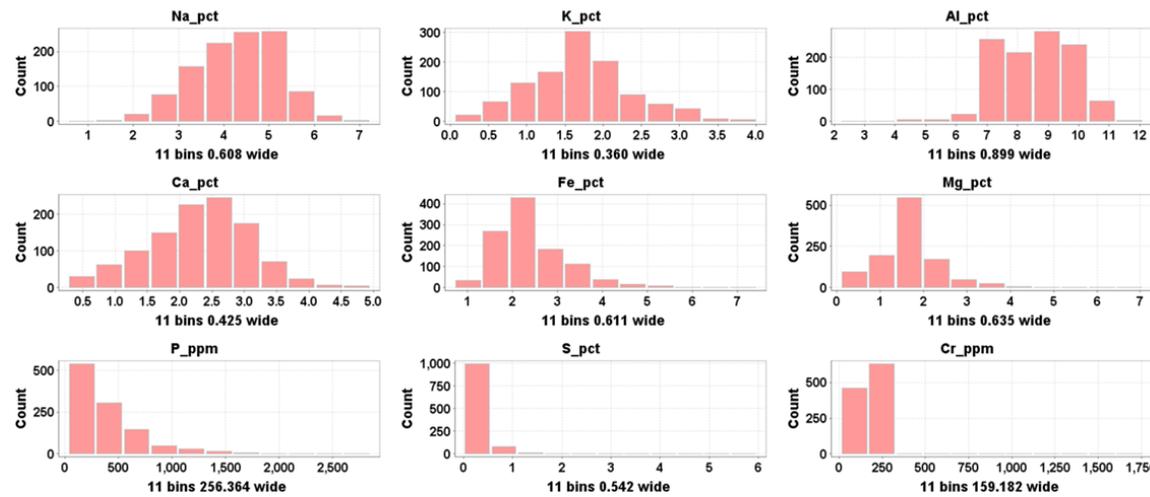
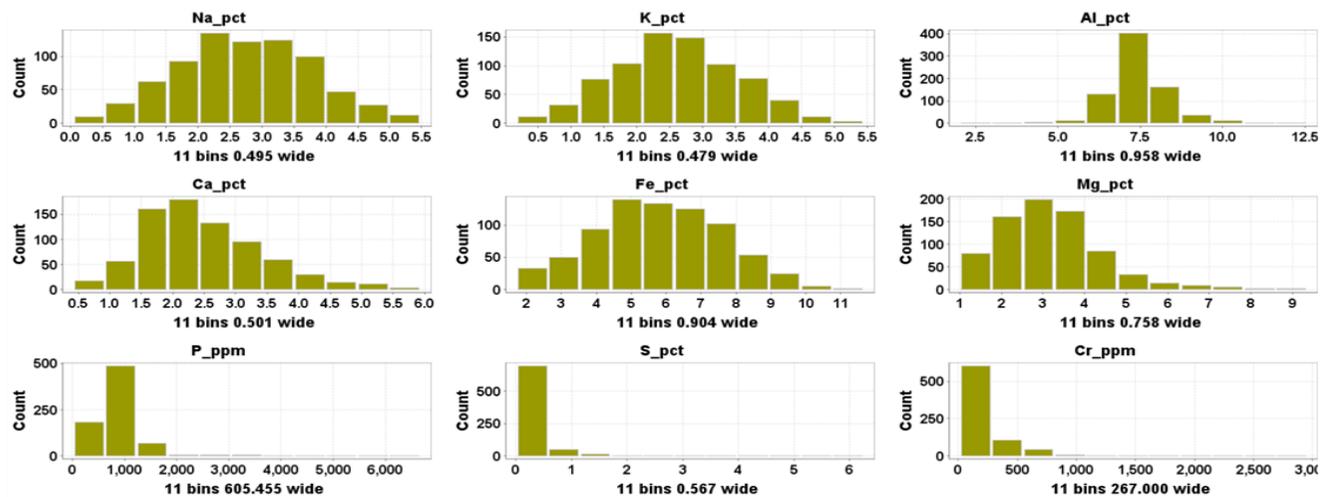


Figura 57 - Histogramas do setor Pista mostrando as distribuições das quantidades e frequências absolutas individualizadas das unidades geoquímica sódica e sódica-silica x elementos químicos maiores.

UNIDADE POTÁSSICA



UNIDADE MAGNESIANA

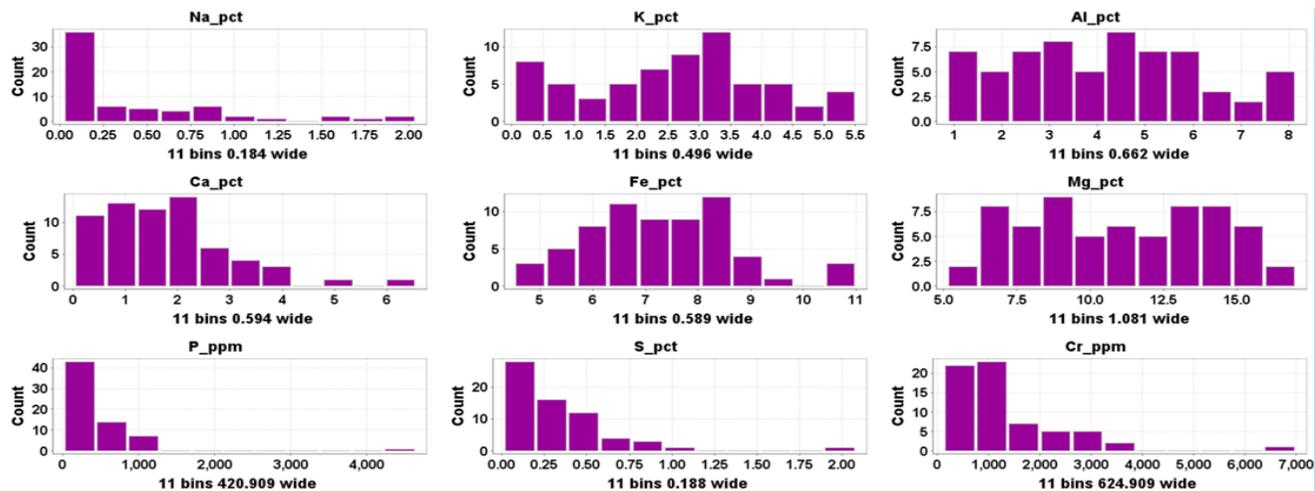


Figura 58 - Histogramas do setor Pista mostrando as distribuições das quantidades e frequências absolutas de maneira individualizadas das unidades geoquímica potássica e magnésiana x elementos químicos maiores.

UNIDADE FELDSPÁTICA POTÁSSICA

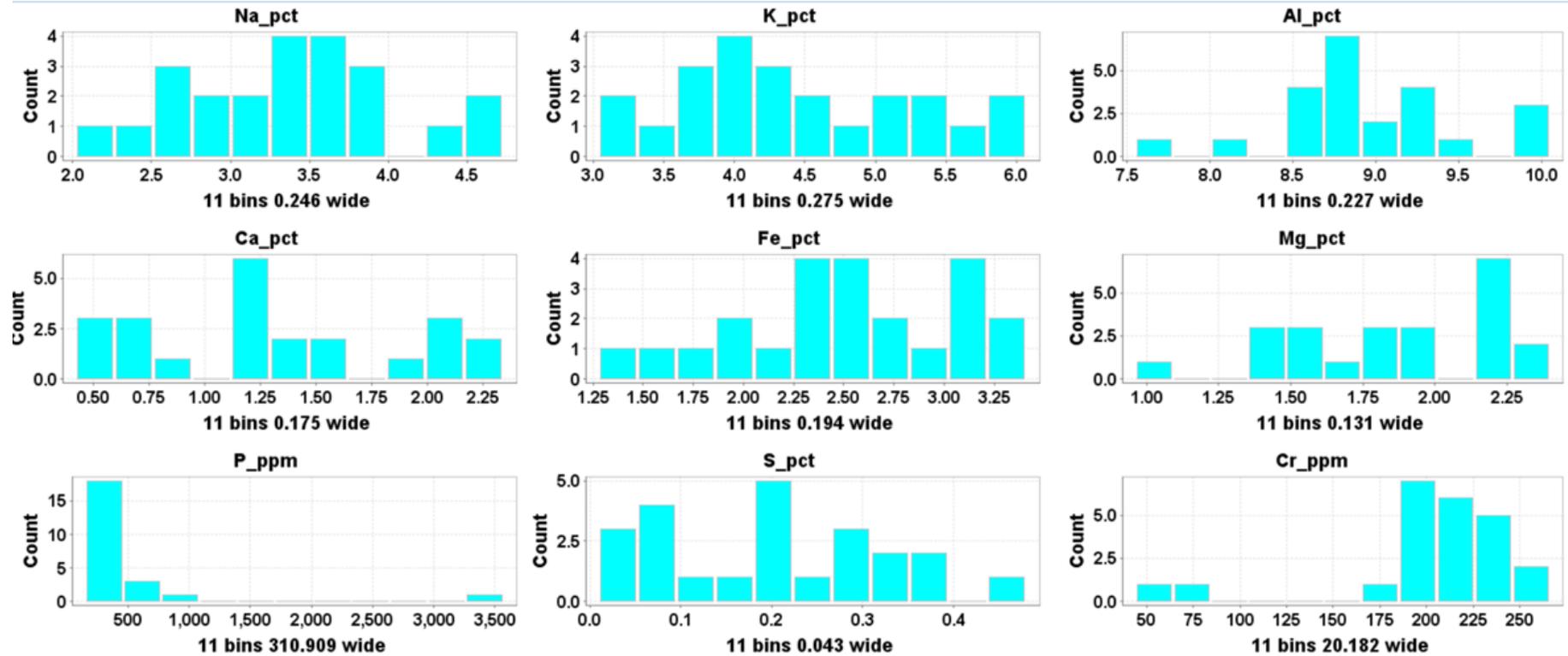


Figura 59 - Histogramas do setor Pista mostrando as distribuições das quantidades e frequências absolutas de maneira individualizada da unidade geoquímica feldspática potássica x elementos químicos maiores.

No setor Sequeirinho/Baiano os diagramas de probabilidade foram satisfatórios e coesos para Na, K, Al, Ca, Fe, Mg, P, S e Cr em relação às unidades geoquímicas (Fig. 56). Eles mostram que as tendências e comportamentos das curvas tem desempenho semelhantes nas maiorias das unidades geoquímicas, principalmente nas sódicas (baixo Fe), sódico-sílica, sódico-cálcica e sódica-férrica e, em alguns casos, na potássico-clorítica. Algumas unidades geoquímicas tiveram suas curvas destacadas e indicam prováveis vetores químicos, como: a) cálcico-férrica e férrica tem suas curvas se destacando isoladamente para Ag, As, Co, Cu, In, Te e Ni; b) unidade magnésiana com destaque em Zn, Mn e Li; e c) feldspático potássica em Ce, La, Nb, Ta, Th, U, Hf, Ba e Tl (Figs. 57 e 58). Os histogramas revelam predominantemente comportamento padrão de *log* normal com tendências a inclinações para direita em suas distribuições amostrais, demonstrando uma aderência e classificação dos elementos químicos dentro das unidades geoquímicas definidas (Figs. 59–64). Porém, foram observados comportamentos de *log* normal com desvios para esquerda em algumas unidades geoquímicas em relação a alguns elementos químicos, a exemplo das unidades sódico-sílica e potássico-clorítica que evidenciam leves desvios nas configurações da distribuição amostral do Na (Figs. 60 e 63), ao passo que as unidades sódico-sílica, sódico-férrica e cálcico-férrica tiveram desvios para Al (Figs. 60, 61 e 63).

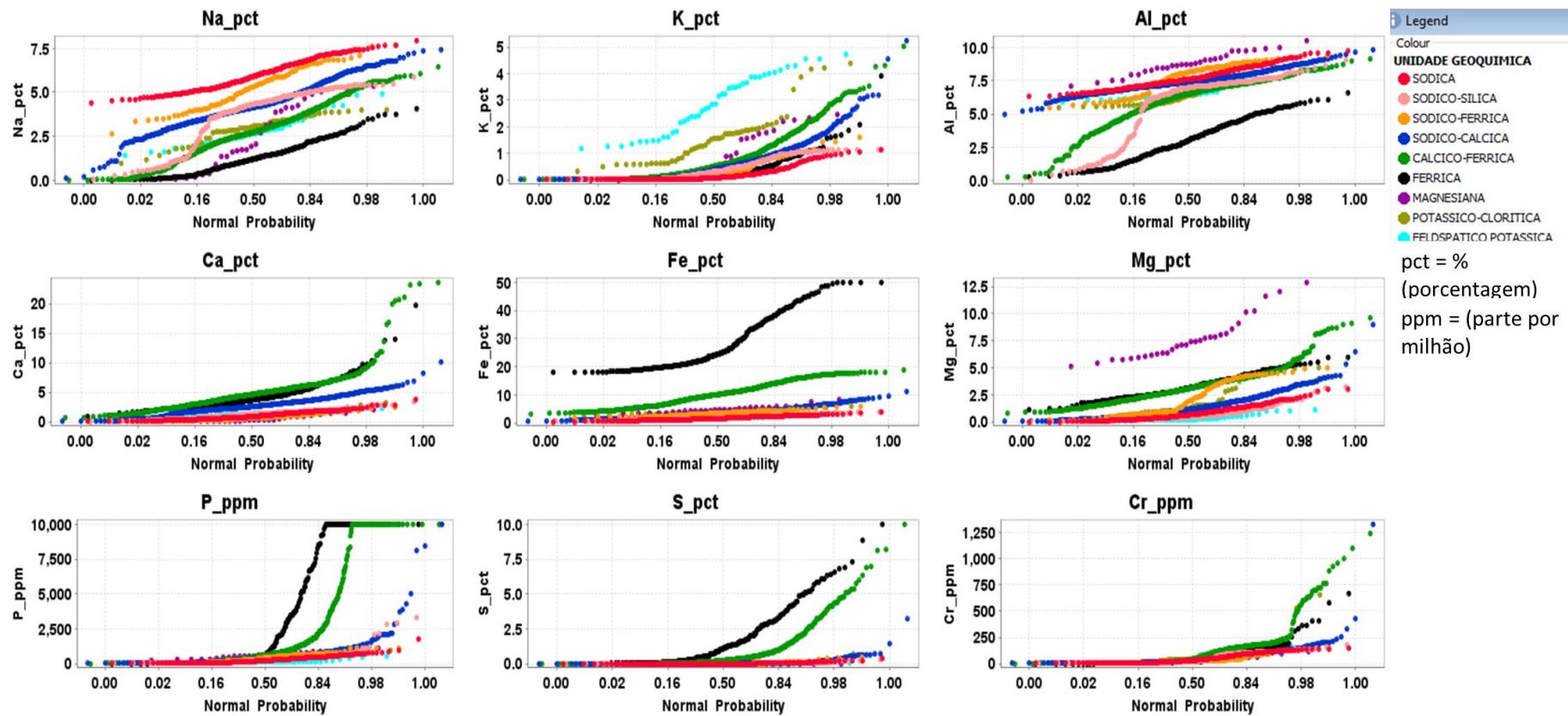


Figura 60 - Diagramas de probabilidades (*split*) no setor Sequeirinho/Baiano mostrando as curvas de cada unidade geoquímica x elementos químicos maiores.

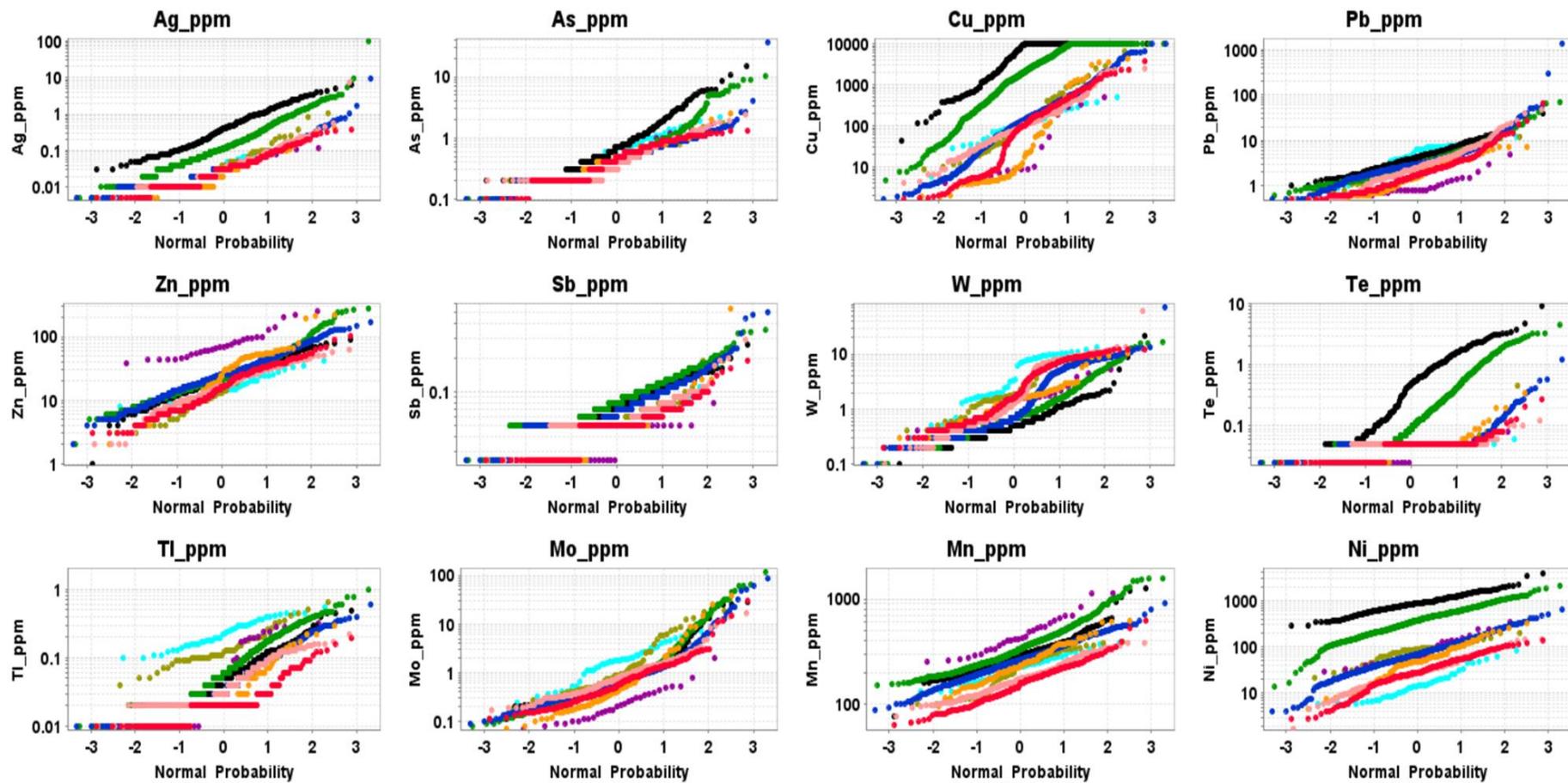


Figura 61 - Diagramas de probabilidades (*split*) no setor Sequeirinho/Baiano mostrando as curvas de cada unidade geoquímica x elementos químicos maiores. Símbolos conforme Figura 56.

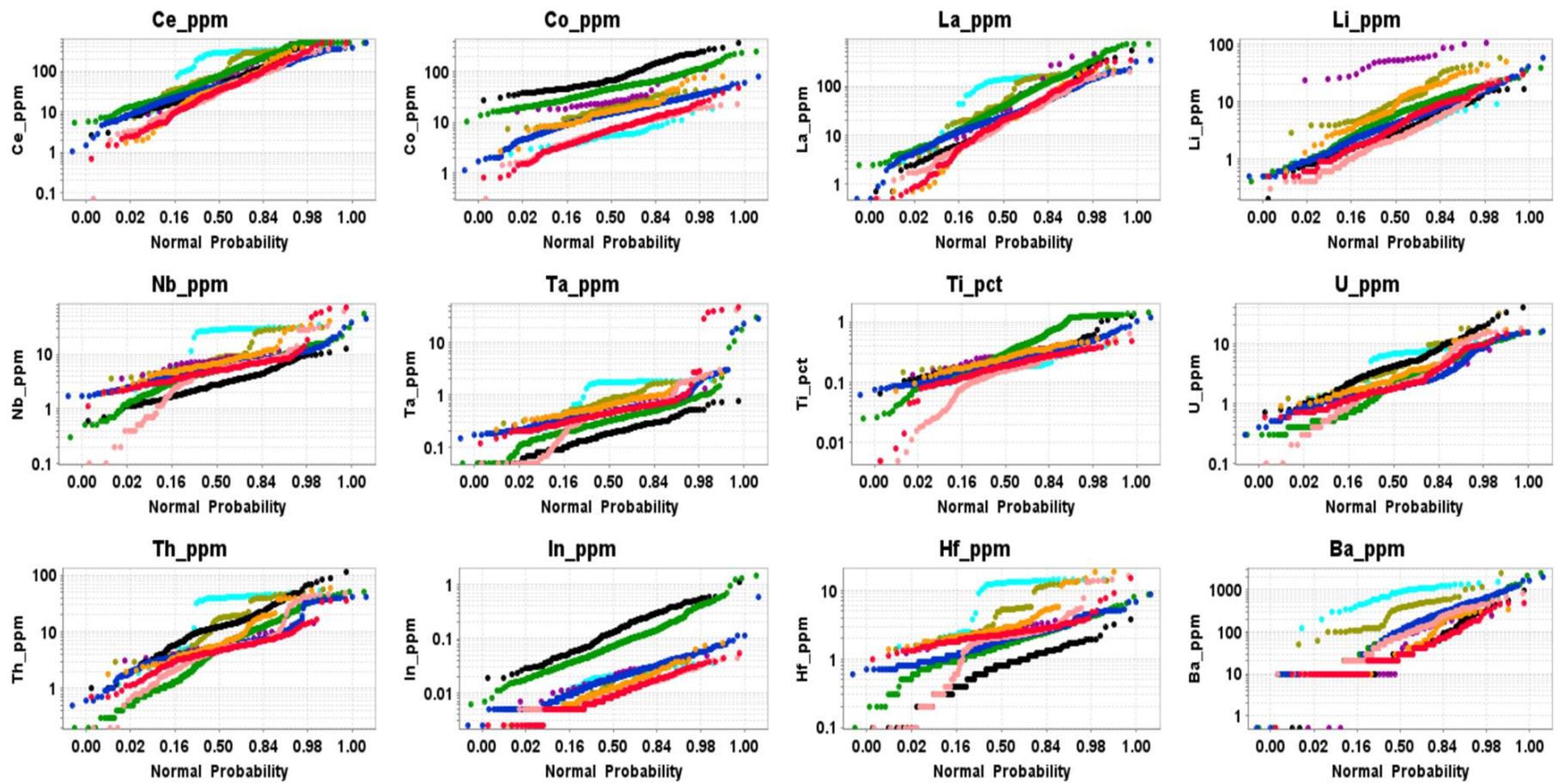


Figura 62 - Diagramas de probabilidades (*split*) no setor Sequeirinho/Baiano mostrando as curvas de cada unidade geoquímica x elementos químicos maiores. Símbolos conforme Figura 56.

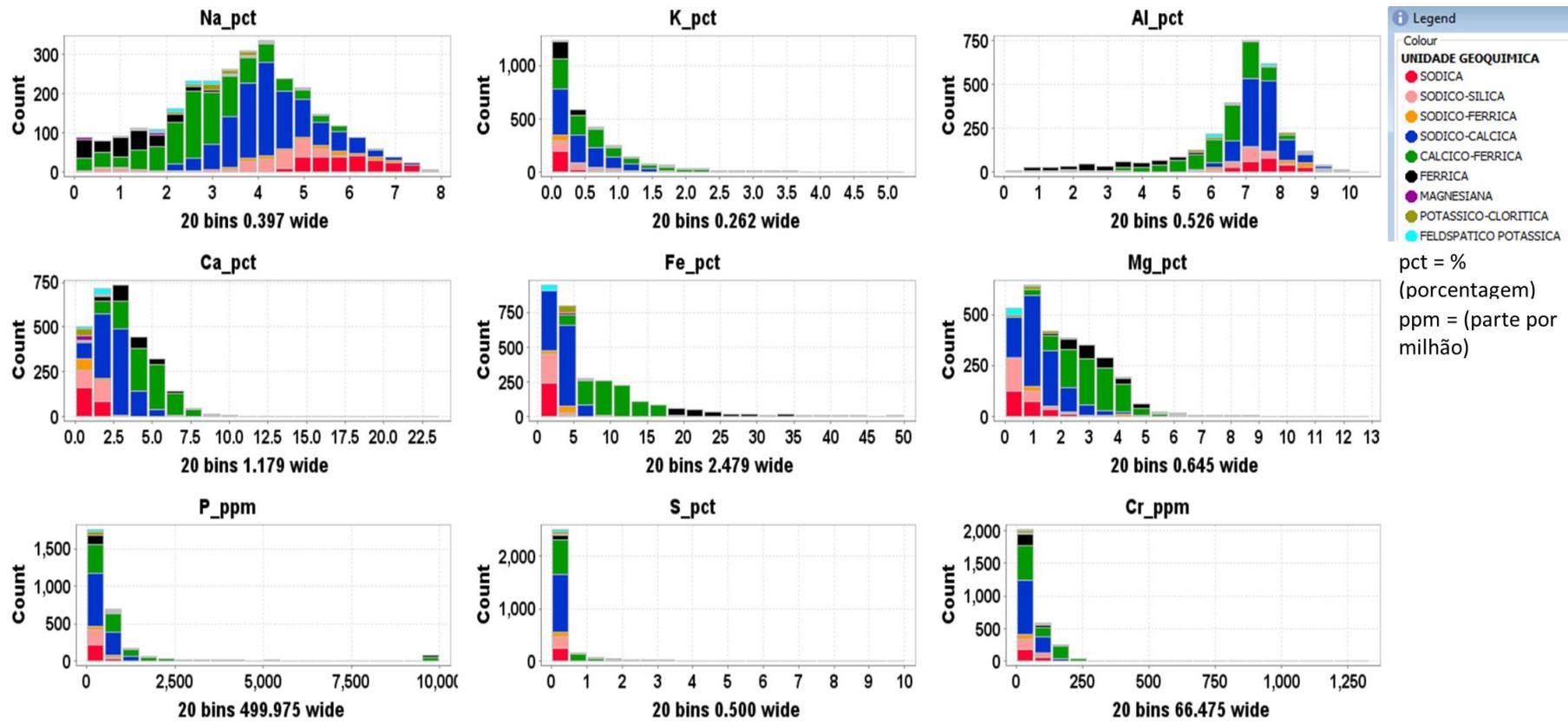


Figura 63 - Histogramas do setor Sequeirinho/Baiano mostrando as distribuições das quantidades e frequências absolutas globais que ocorrem nas unidades geoquímica x elementos químicos maiores.

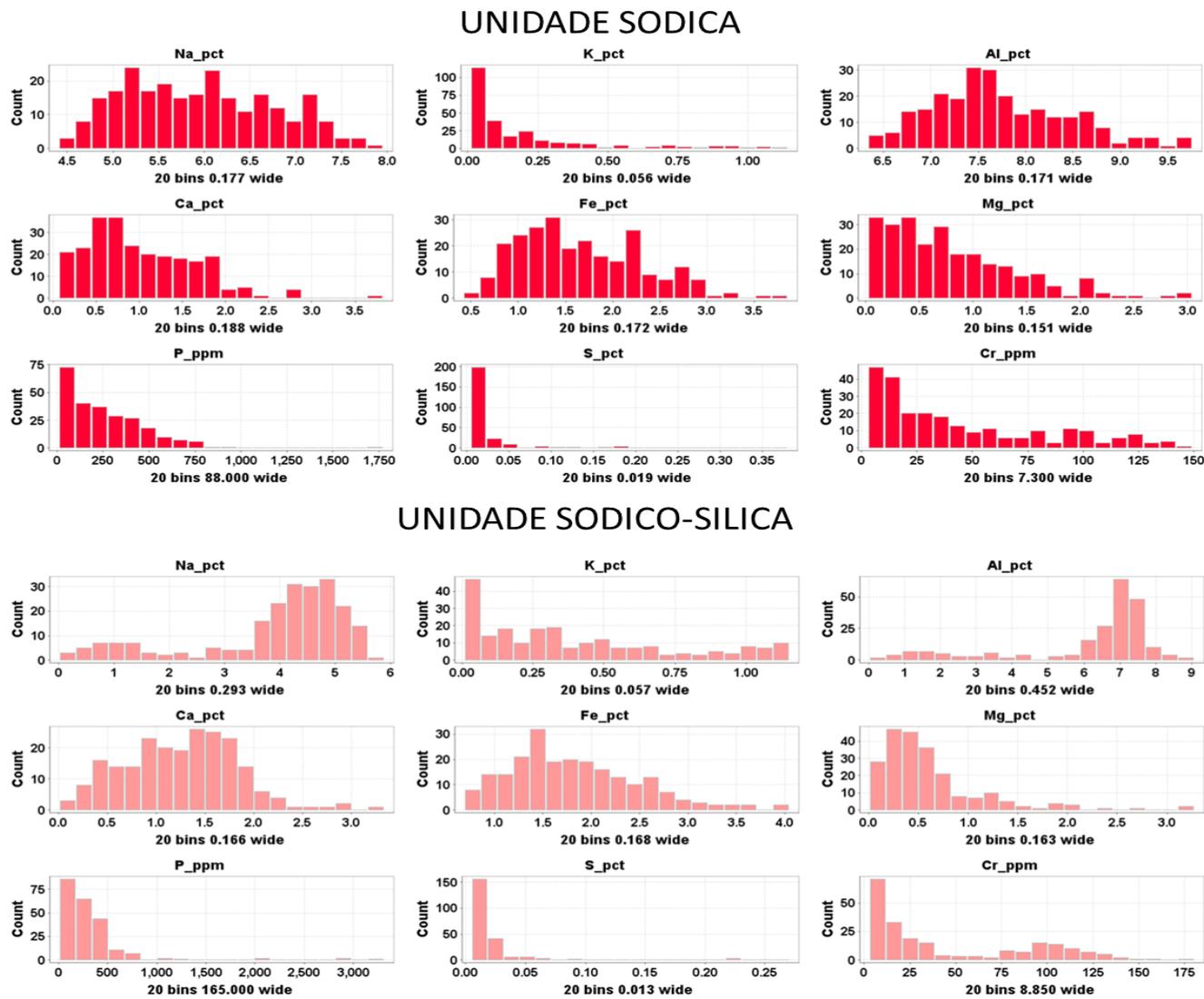
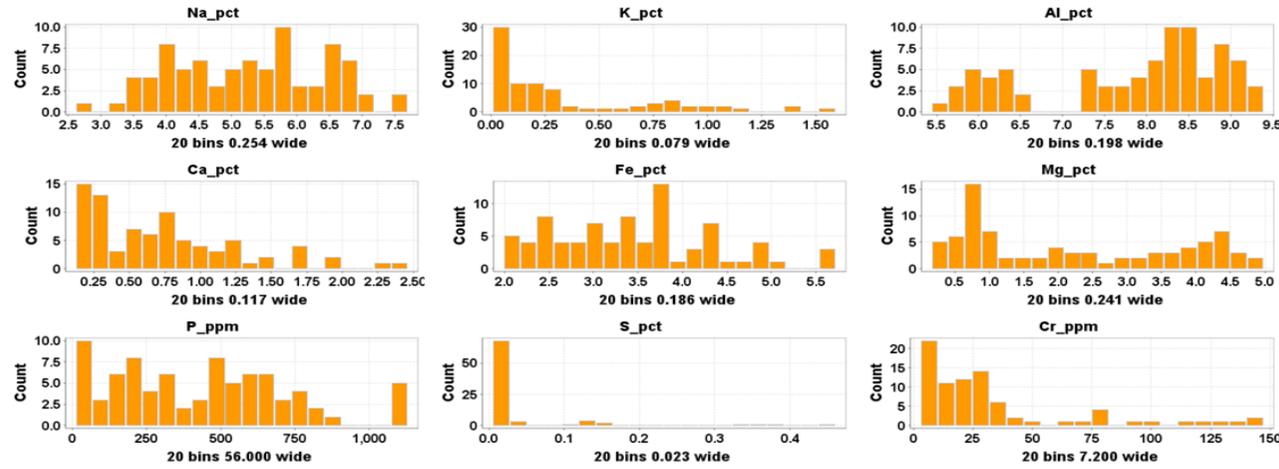


Figura 64 - Histogramas do setor Sequeirinho/Baiano mostrando as distribuições das quantidades e frequências absolutas de maneira individualizadas das unidades geoquímica sódica e sódica-silica x elementos químicos maiores.

UNIDADE SODICO-FERRICA



UNIDADE SODICO-CALCICA

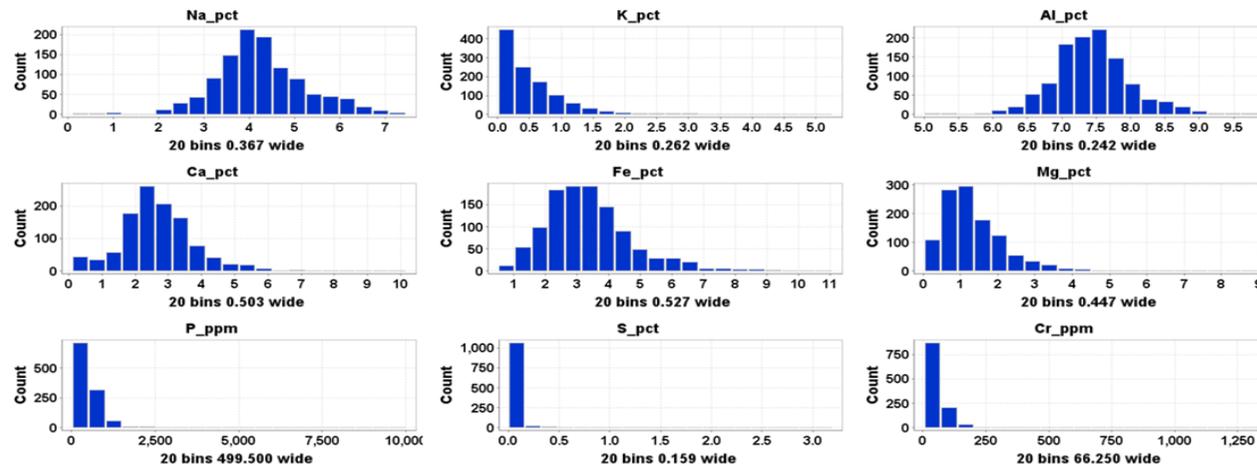
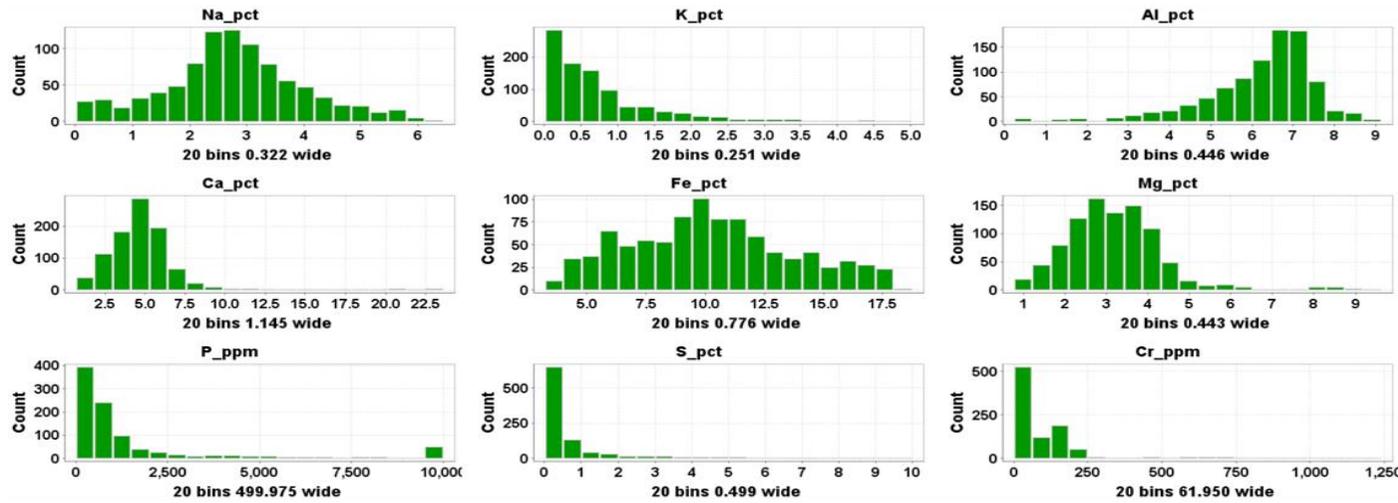


Figura 65 - Histogramas do setor Sequeirinho/Baiano mostrando as distribuições das quantidades e frequências absolutas de maneira individualizadas das unidades geoquímica sódico-férrica e sódico-cálcica x elementos químicos maiores.

UNIDADE CALCICO-FERRICA



UNIDADE FERRICA

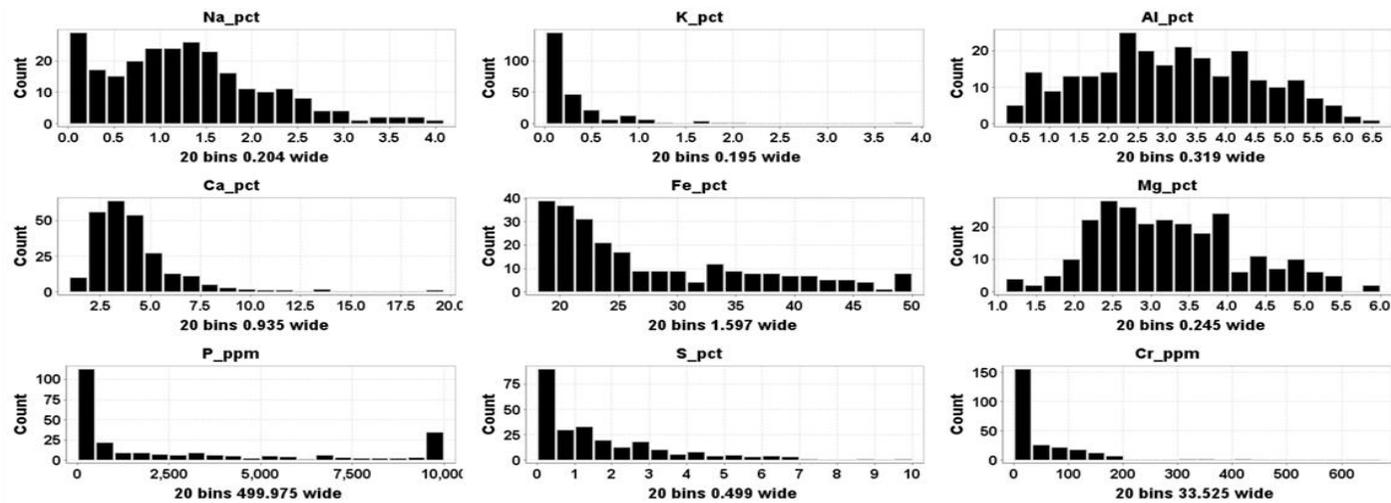
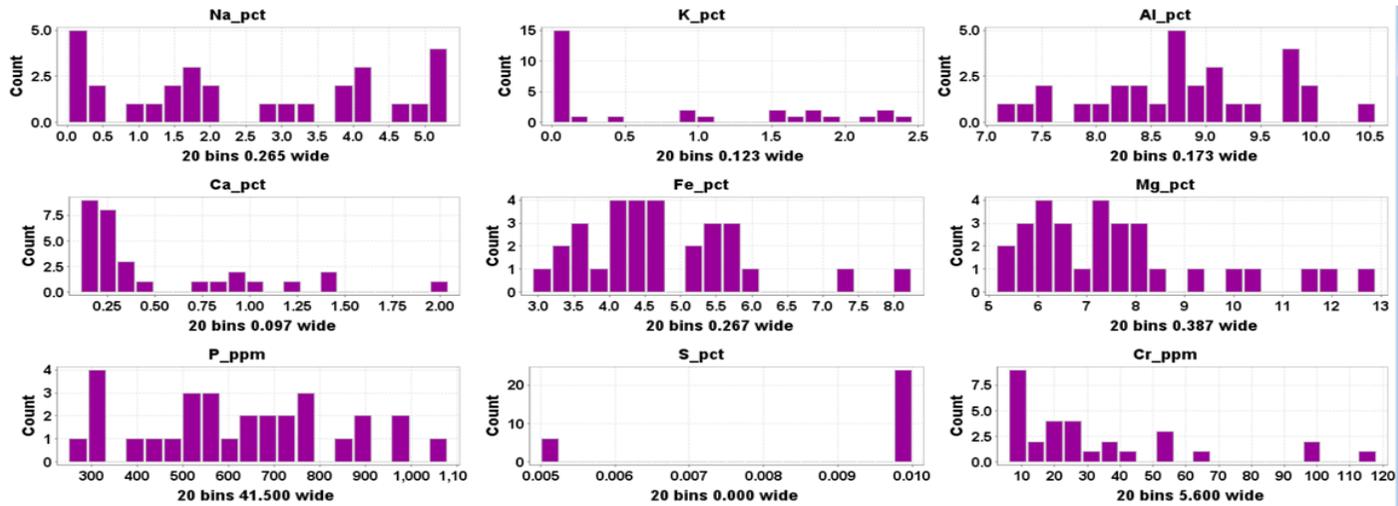


Figura 66 - Histogramas do setor Sequeirinho/Baiano mostrando as distribuições das quantidades e frequências absolutas de maneira individualizadas das unidades geoquímica cálcico-férrica e férrica x elementos químicos maiores.

UNIDADE MAGNESIANA



UNIDADE POTÁSSICO-CLORÍTICA

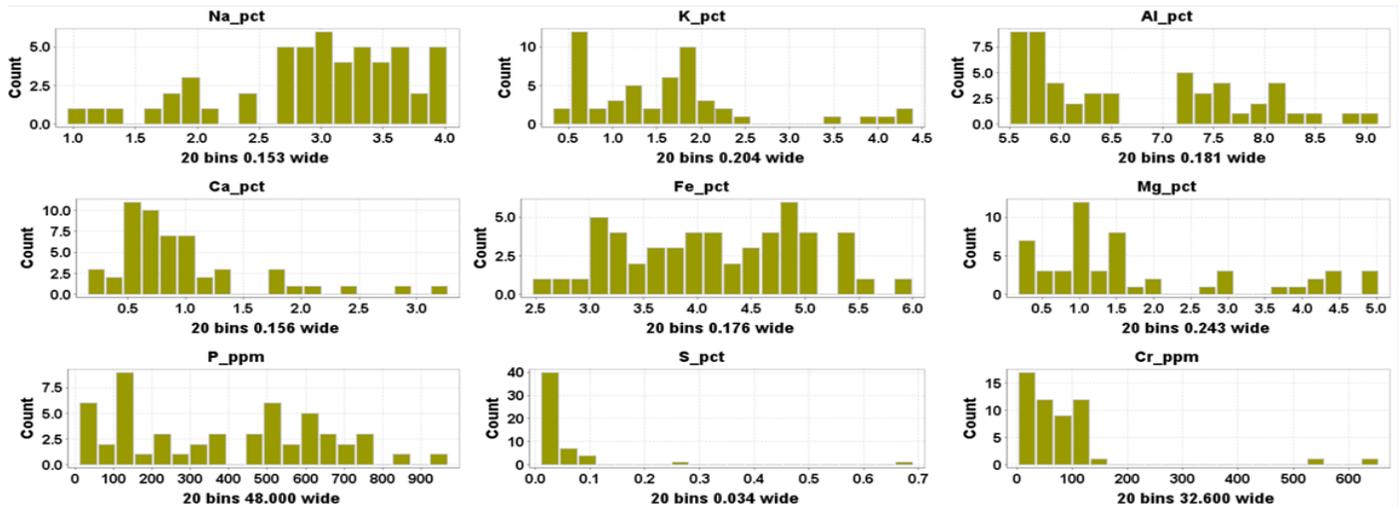


Figura 67 - Histogramas do setor Sequeirinho/Baiano mostrando as distribuições das quantidades e frequências absolutas de maneira individualizadas das unidades geoquímica magnésiana e potássico-clorítica x elementos químicos maiores.

UNIDADE FELDSPÁTICA POTÁSSICA

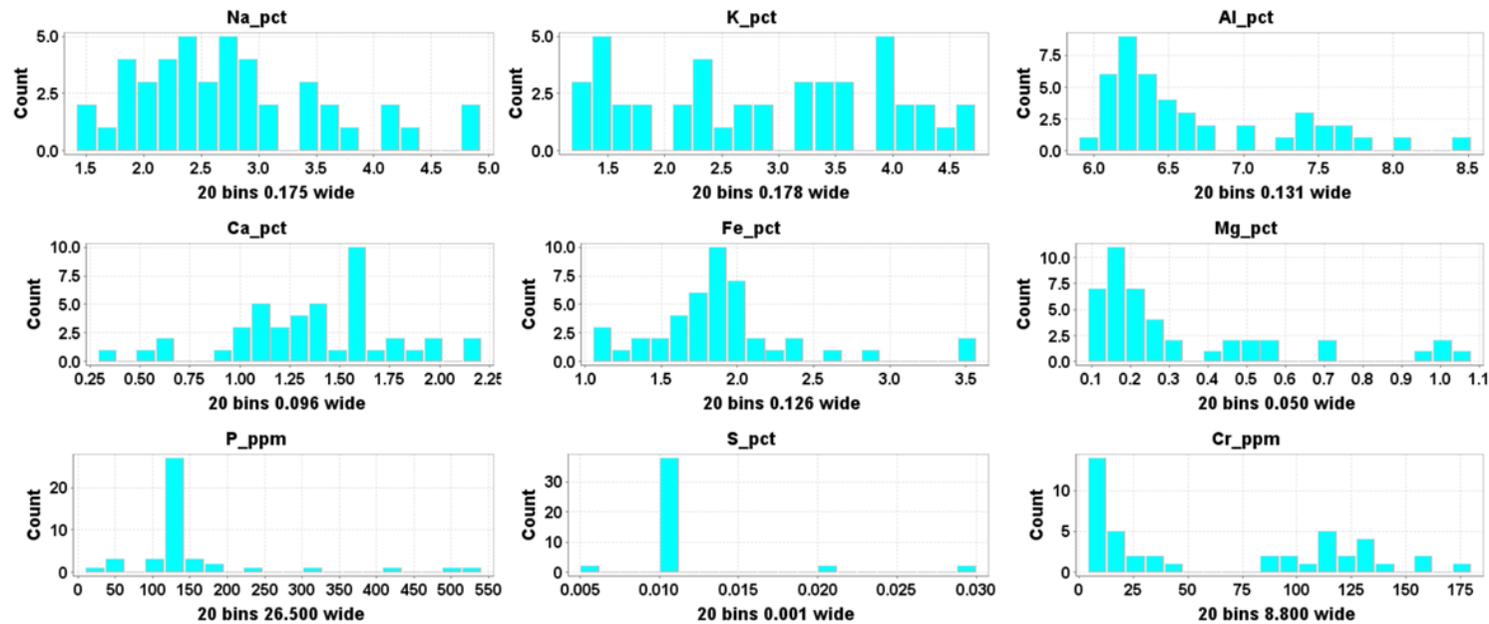


Figura 68 - Histogramas do setor Sequeirinho/Baiano mostrando as distribuições das quantidades e frequências absolutas de maneira individualizada da unidade geoquímica feldspática potássica x elementos químicos maiores.

No setor Sossego/Curral, os diagramas de probabilidade são coerentes nas avaliações independentes de cada elemento químico, principalmente os maiores em relações aos grupos geoquímicos definidos (Fig. 65). Os dados mostram que o comportamento das curvas se assemelham para algumas unidades (Figs. 65–67): a) unidades sódica, sódico-sílica e sódico-potássica (baixo Ca) contém comportamento semelhantes para quase todos os elementos; b) unidades potássica e clorítica para Na, Fe, Mg, Tl, Mo, Co, Li, Nb, Sc e Th; c) unidades clorítica e férrica para K, Pb, Ca, Cr, Nb, Tl, U, Th, Ce, La e Y; d) sódico-sílica e potássica para La, Nb, Ta, U, Th e Hf) a unidade cálcica é a mais distinta, demonstrando que sua classificação está bem definida com base na composição química (Figs. 65–67). Algumas unidades exibem curvas se destacando isoladamente para alguns elementos químicos, indicando prováveis vetores químicos: f) unidade férrica com Ag, As, Cu, Fe, S, P, Tl, Ni, La e In; g) unidade cálcica com Ca, Al, Mg, Zn e Mn; h) unidade potássica com K, Tl, Mo e Ba; e i) unidades sódica, sódico-sílica e sódico-potássica se destacando para Na, W, Nb e Hf (Figs. 65–67). Os histogramas tiveram em sua grande maioria comportamento de *log* normal e tendências à direita. As distribuições amostrais dos elementos químicos avaliados mantiveram aderência e classificação dentro dos grupos geoquímicos propostos (Fig. 68). Nos grupos geoquímicos sódico, potássico e cálcico os comportamentos dos elementos Fe, Na, S e Ca mostram comportamento de *log* normal com deslocamento à esquerda, sugerindo que esses elementos químicos apresentaram em suas distribuições amostrais teores mais elevados (Figs. 69, 70, 71 e 72).

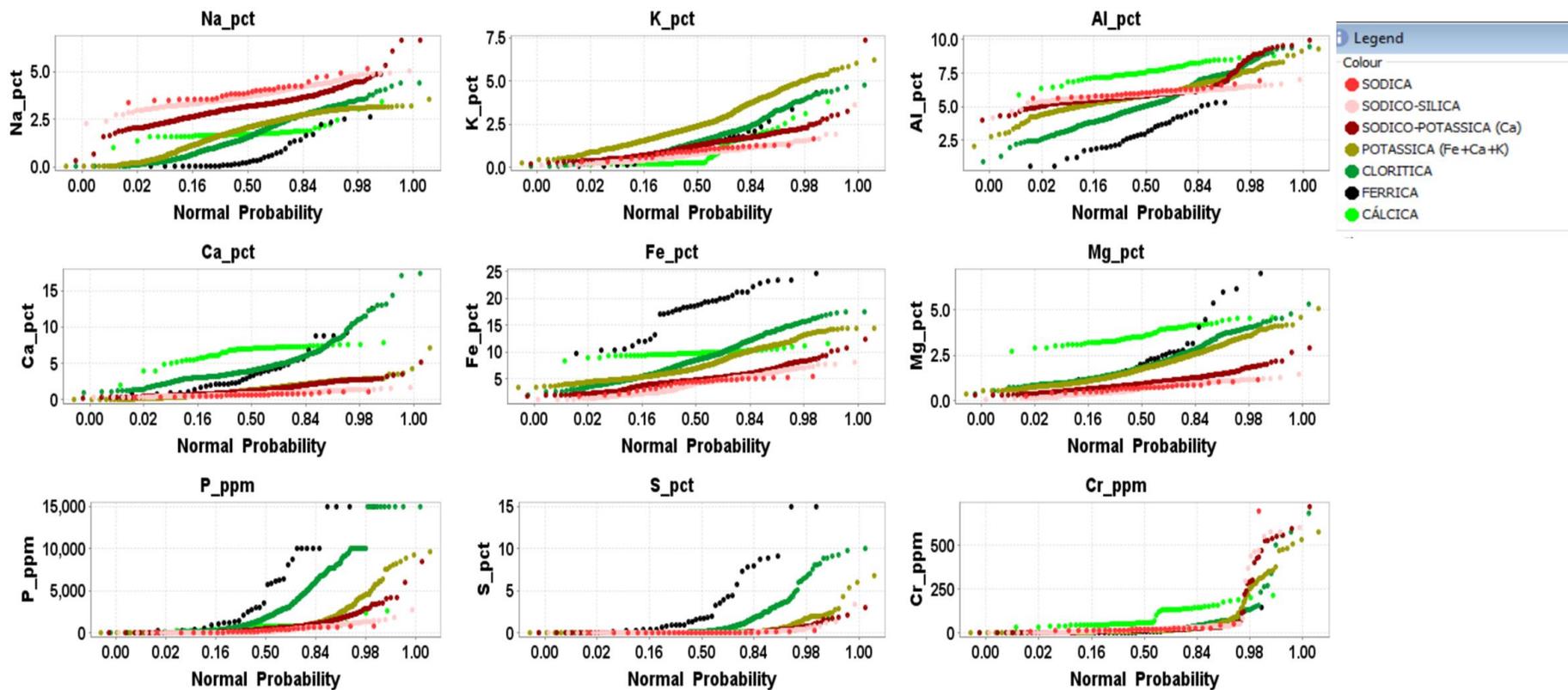


Figura 69 - Diagramas de probabilidades (*split*) no setor Sossego/Curral mostrando as curvas de cada unidade geoquímica x elementos químicos maiores.

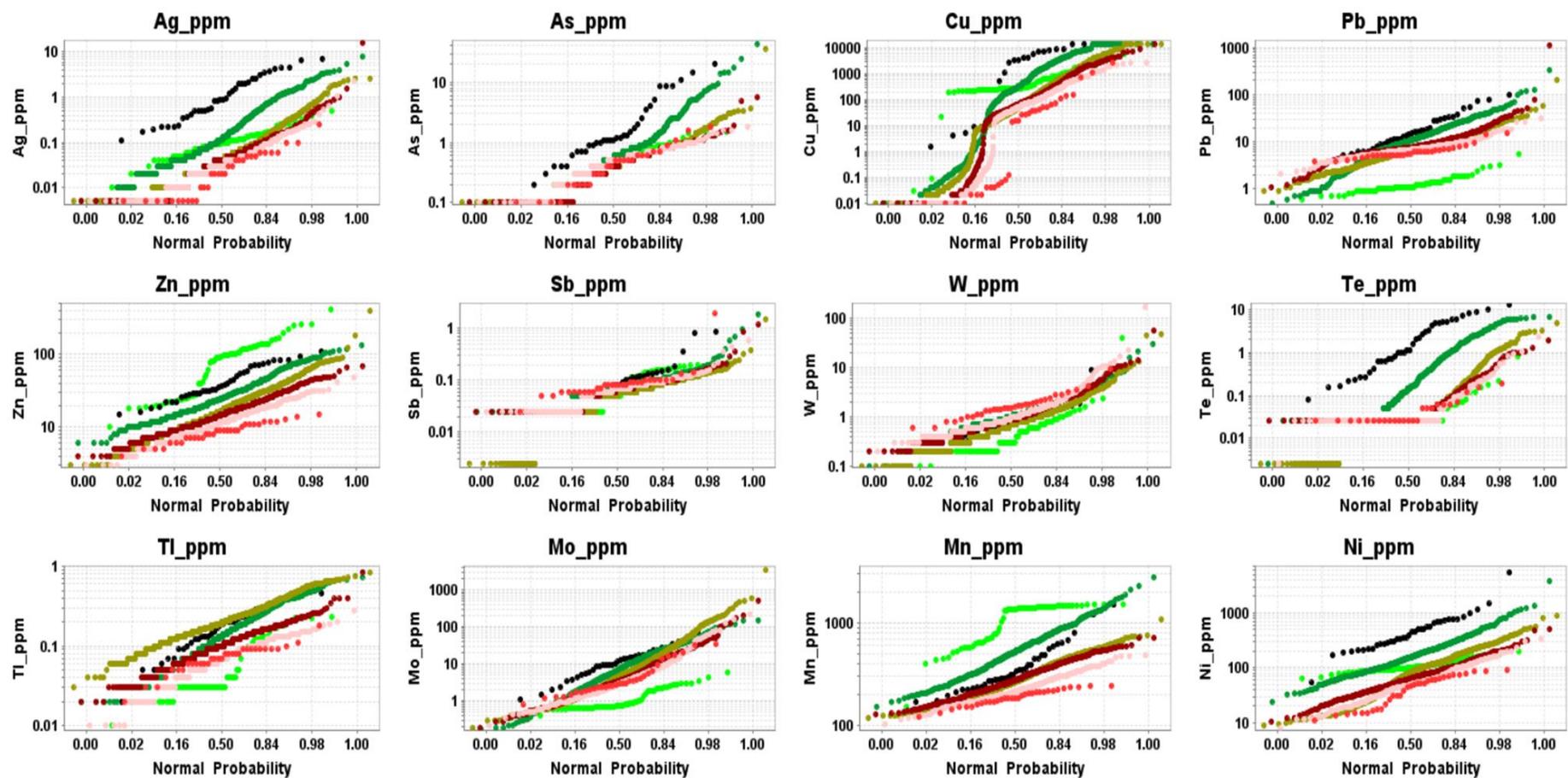


Figura 70 - Diagramas de probabilidades (*split*) no setor Sossego/Curral mostrando as curvas de cada unidade geoquímica x elementos químicos maiores. Símbolos conforme Figura 65.

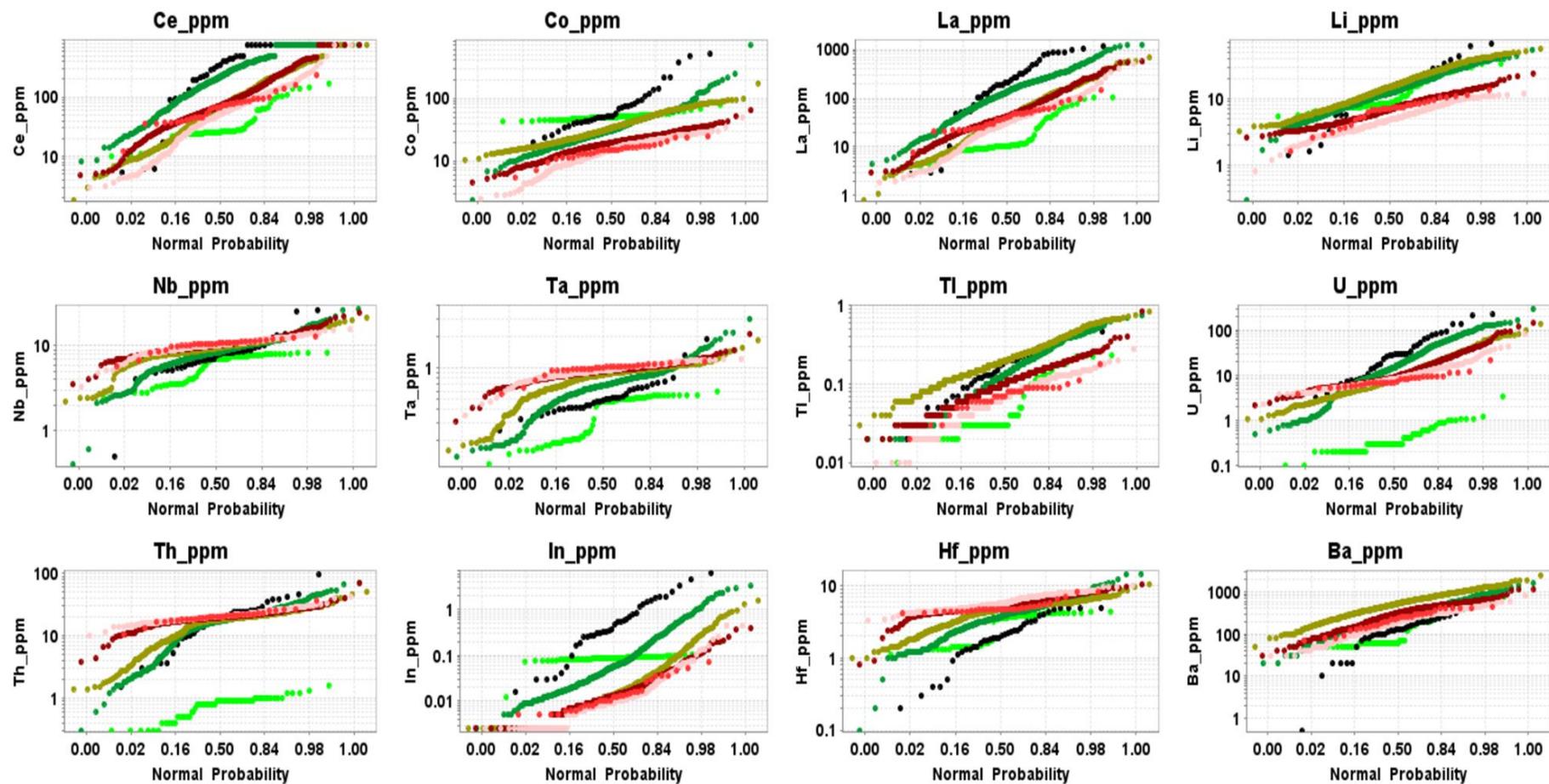


Figura 71 - Diagramas de probabilidades (*split*) no setor Sossego/Curral mostrando as curvas de cada unidade geoquímica x elementos químicos maiores. Símbolos conforme Figura 65.

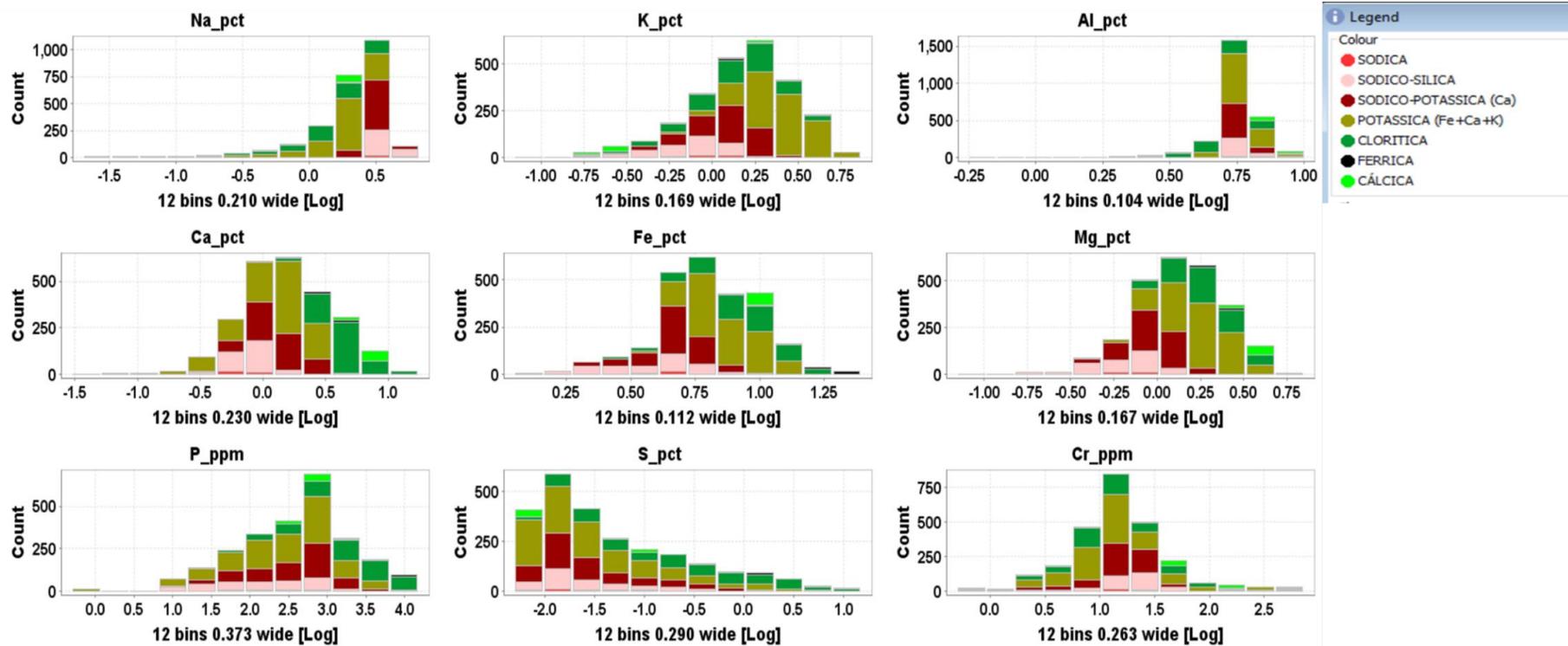
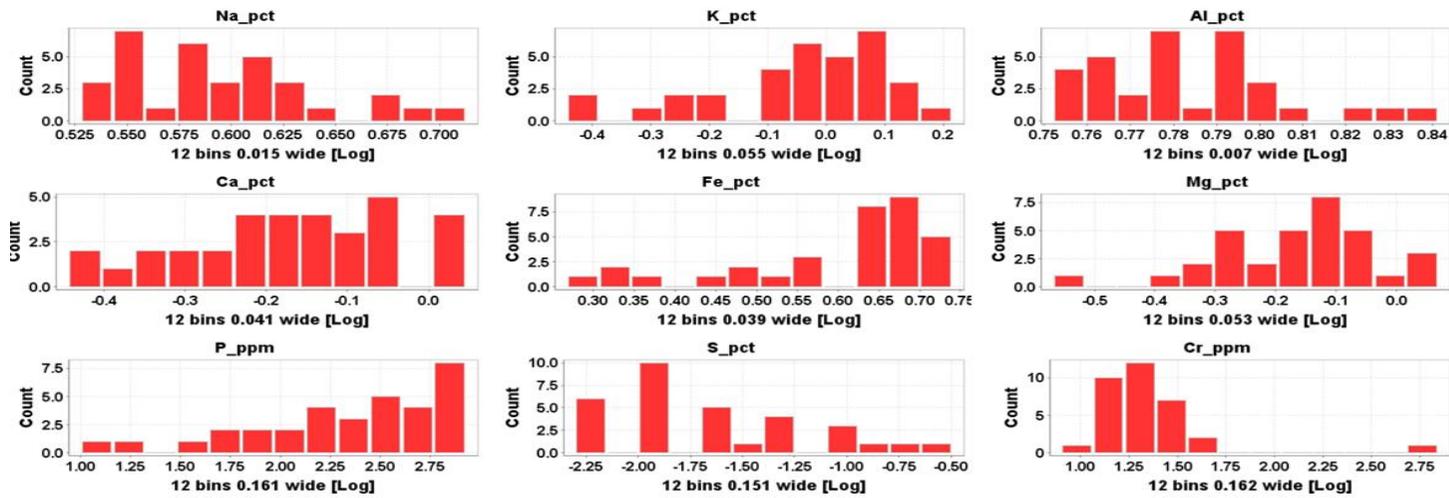


Figura 72 - Histogramas do setor Sossego/Curral mostrando as distribuições das quantidades e frequências absolutas de maneira individualizadas das unidades geoquímica x elementos químicos maiores.

UNIDADE SODICA



UNIDADE SODICO-SILICA

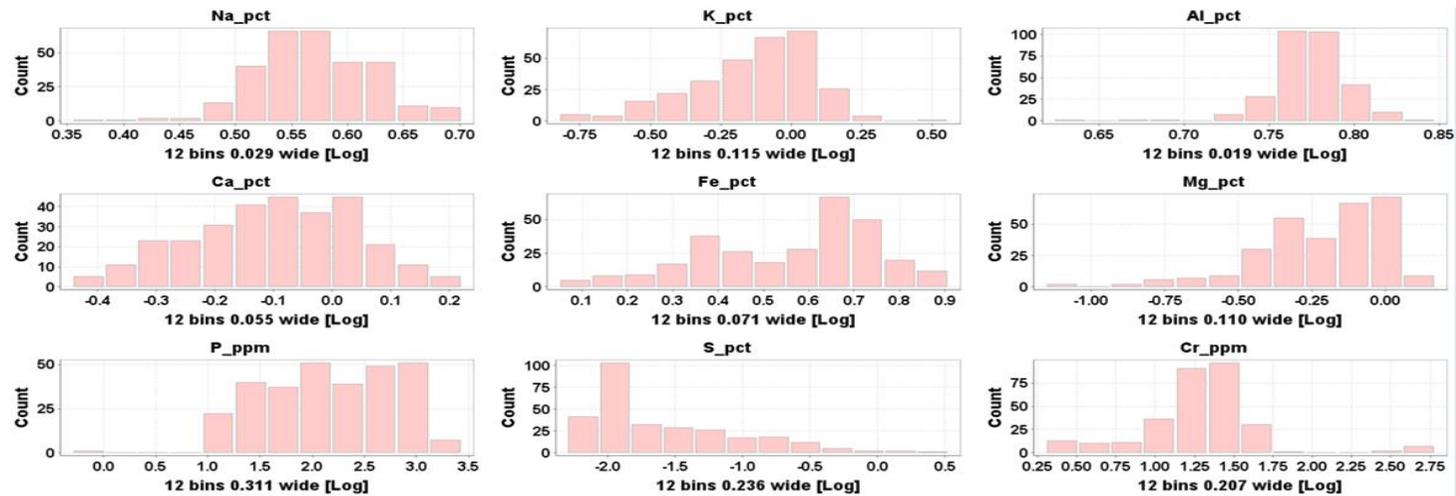
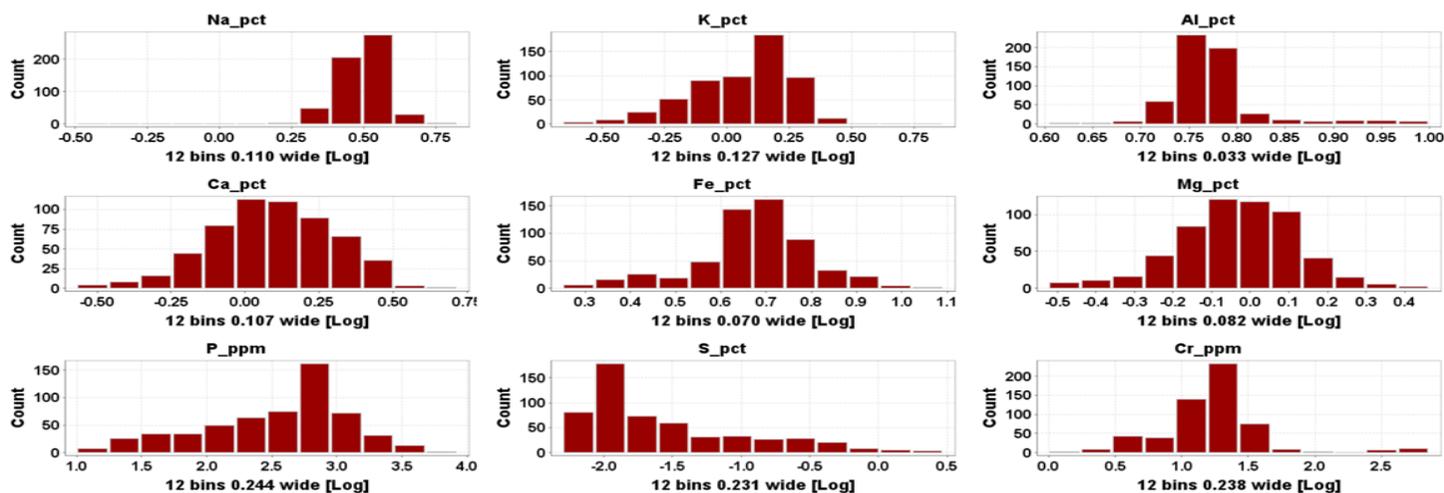


Figura 73 - Histogramas do setor Sossego/Curral mostrando as distribuições das quantidades e frequências absolutas individualizadas das unidades geoquímica sódica e sódico-silica x elementos químicos maiores.

UNIDADE SODICO-POTASSICA



UNIDADE POTASSICA

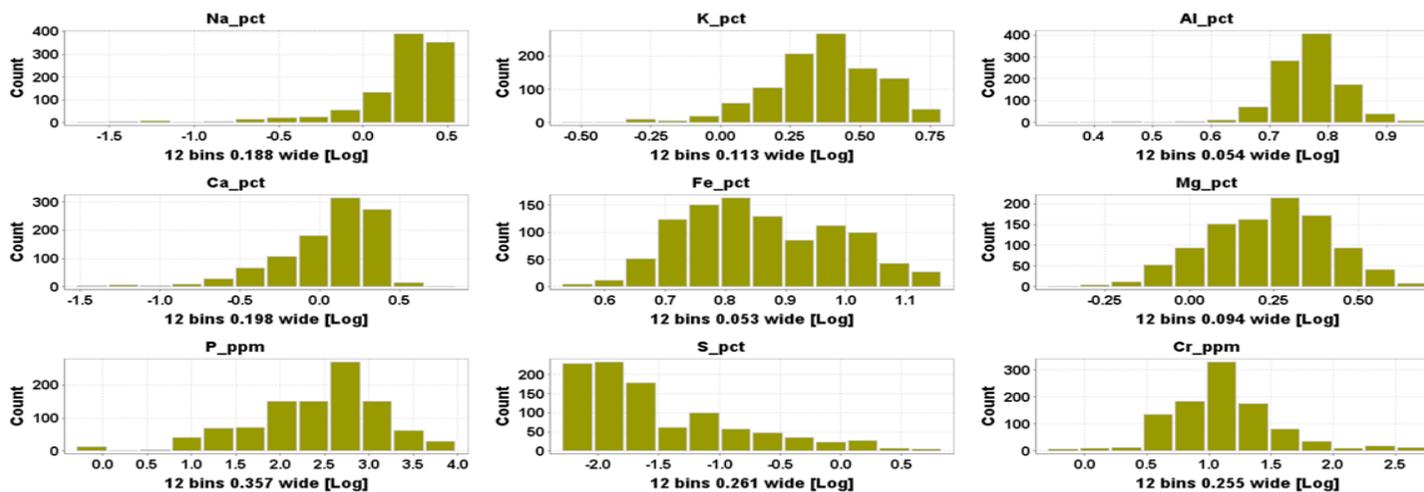
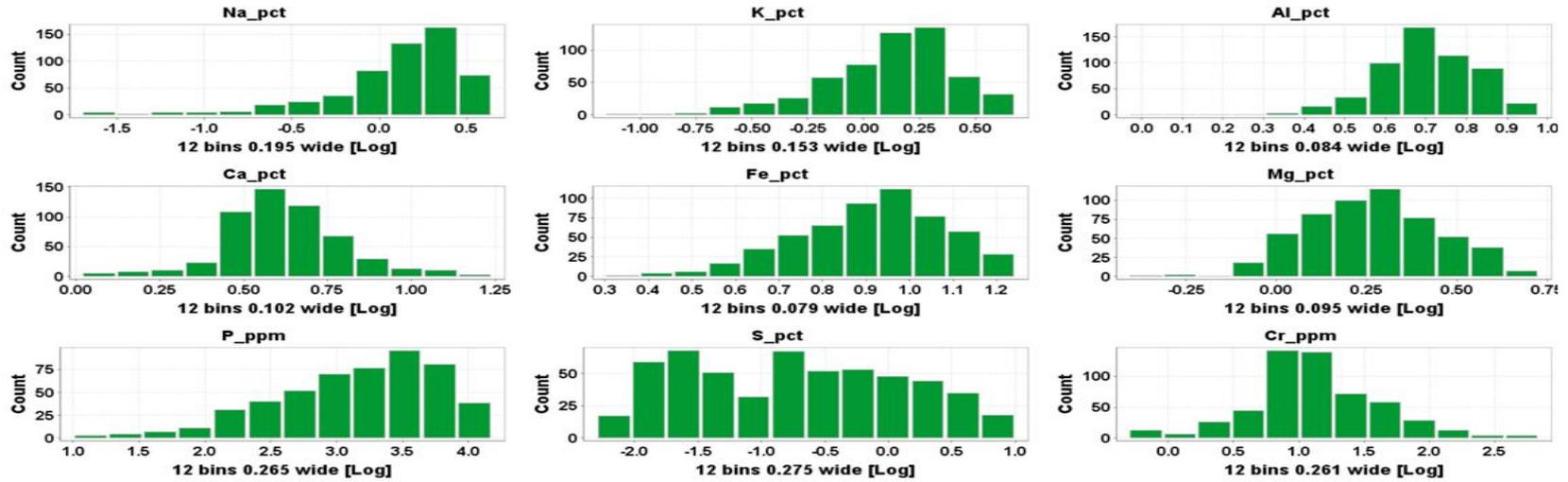


Figura 74 - Histogramas do setor Sossego/Curral mostrando as distribuições das quantidades e frequências absolutas individualizadas das unidades geoquímica sódico-potássica e potássica x elementos químicos maiores.

UNIDADE CLORITICA



UNIDADE FERRICA

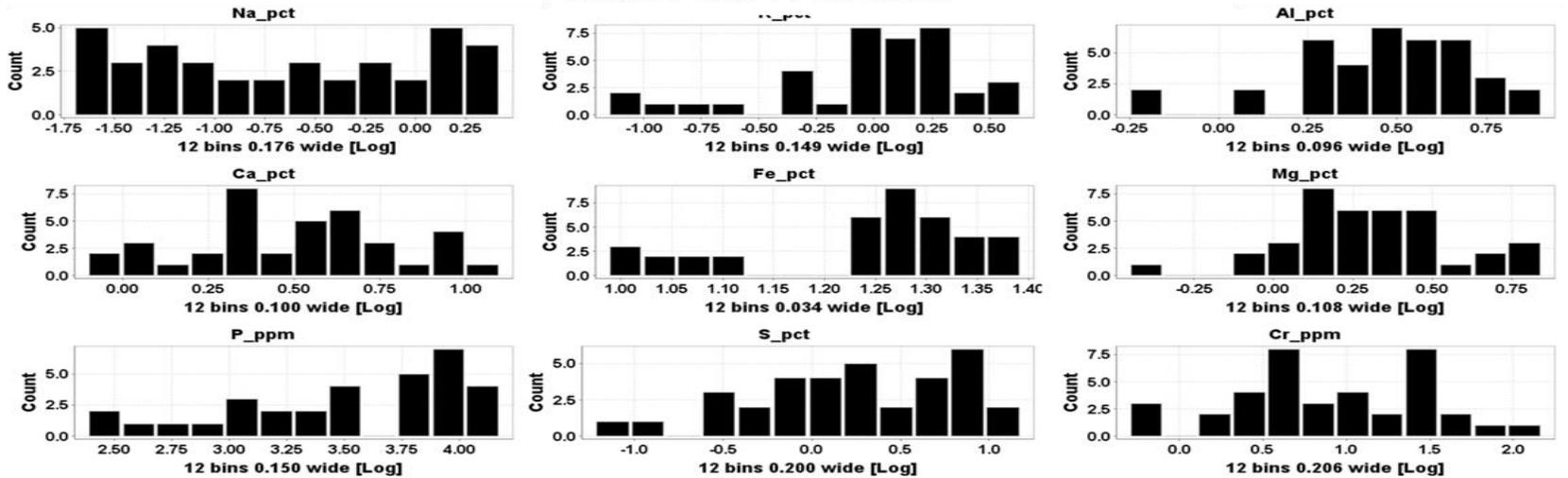


Figura 75 - Histogramas do setor Sossego/Curral mostrando as distribuições das quantidades e frequências absolutas individualizadas das unidades geoquímica clorítica e férrica x elementos químicos maiores.

UNIDADE CALCICA

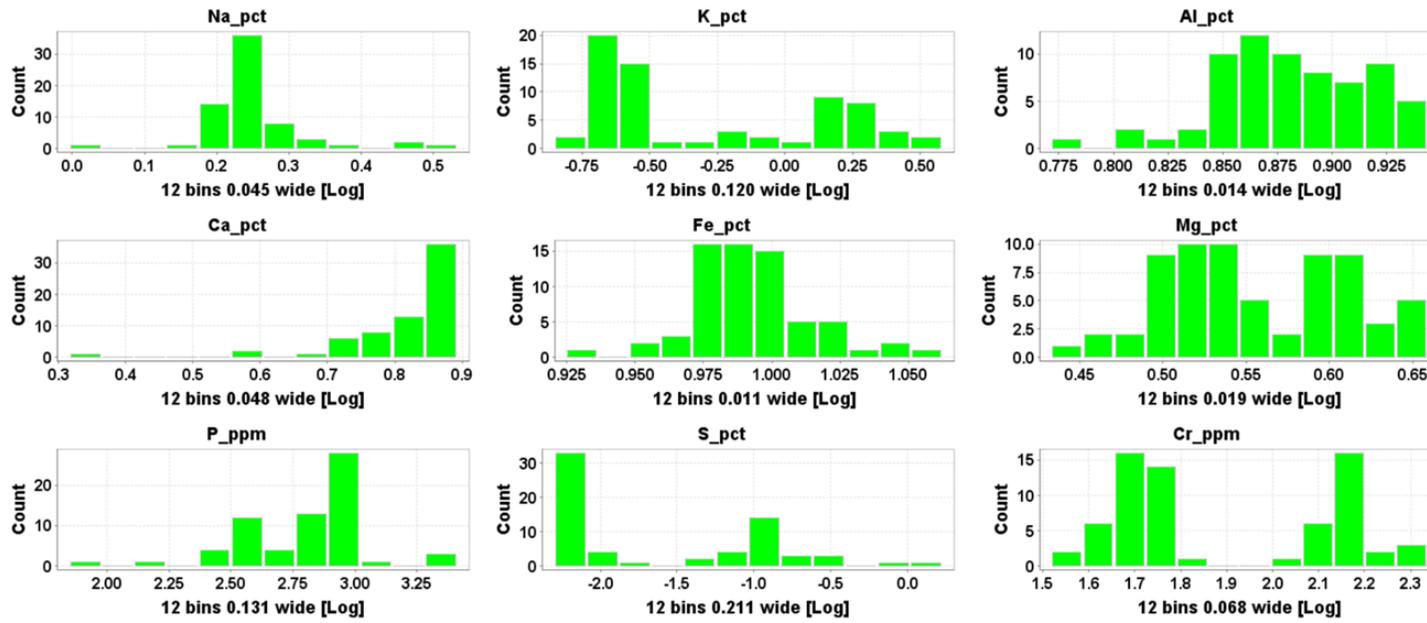


Figura 76 - Histogramas do setor Sossego/Curral mostrando as distribuições das quantidades e frequências absolutas individualizadas da unidade geoquímica cálcica x elementos químicos maiores.

6.8.1.2 Diagramas binários e ternários

Os diagramas binários são úteis para classificação e separações das unidades geoquímicas. Nesse método de geoestatística multivariada é possível verificar as distribuições das amostras baseadas em seus teores e separar os intervalos para cada unidade (Suslick 1978, 1986). Vale ressaltar que as descrições litológicas visuais e mineralogia contribuíram para essas definições. Para todos os setores foram escolhidos elementos químicos chave, tais como Al, Ca, Cr, Mg, K e principalmente Fe e Na. Os dois últimos são elementos que apresentam maiores teores e presença nas composições dos minerais nos depósitos, bem como são inversamente proporcionais nas distribuições geoquímicas.

Na correlação de Fe x Na foi possível separar as unidades sódicas e férricas de maneira bastante coerente, pois são nítidas as distribuições das populações nos gráficos binários, o que é confirmado no diagrama de probabilidade. Os cruzamentos independentes de Fe, Na e Cu com os demais elementos (Al, Ca, Mg, K, Cr, S, P, Pb, Ag, Au, Ni, U, Co, Th e terras raras como Ce, La, Y e Sc.) permitiram realizar os refinamentos das classificações das unidades geoquímicas propostas e principalmente entender as correlações e distribuições entre os elementos químicos dentro das unidades.

De maneira geral, as classificações das unidades geoquímicas revelam boas correlação e separação das suas populações, principalmente para os setores Sequeirinho/Baiano e Pista, que mostram interfaces semi-gradacionais das populações com relação aos teores e distribuições espaciais das amostras. Contudo, as gradações das unidades sódica para sódico-cálcica, e sódico-cálcica para cálcico-férrica, mostram intercalações dessas interfaces, impedindo a separação dessas populações e implicando na utilização dos diagramas de probabilidades para melhor resultado. Para o setor Sossego/Curral as separações de quase todas as unidades geoquímicas são baseadas nas descrições visuais de testemunhos, por se tratar de um depósito com arcabouços e tramas estruturais mais complexas.

Os diagramas ternários ajudaram a entender e confirma a coerência das distribuições amostrais dos elementos químicos em relação as unidades geoquímicas definidas, além de sugerirem prováveis paragêneses minerais hidrotermais. As visualizações das populações nesses diagramas são extremamente didáticas para tais interpretações. Nos depósitos do Complexo Sossego foram utilizados os elementos com teores inversamente proporcionais Na e Fe, e um terceiro elemento dentro das unidades geoquímicas como Ca, Mg, Al e K.

No setor Pista os cruzamentos variados de três elementos químicos demonstraram uma provável evolução dos fluidos hidrotermais e sugerem fase inicial sódica migrando para uma fase potássica. Porém, observa-se nos diagramas uma fase intermediária de silicificação que afetaram as duas unidades geoquímicas (Figs. 73–74). Temporalmente a silicificação ocorre posteriormente e substitui e/ou isola núcleos de metavulcânica afetada por alterações albítica (\pm escapolita) ou potássica (biotita) (Carvalho *et al.* 2005, Monteiro *et al.* 2008).

No setor Sequeirinho/Baiano as avaliações visuais dos diagramas para as distribuições espaciais dos elementos químicos com relação as unidades geoquímicas definidas sugerem, ao menos, dois estágios de evoluções dos fluidos hidrotermais com paragêneses minerais diferentes. Para ambas as evoluções (mostra um estágio inicial sódico, porém um dos estágios evolui para sódico-férrica e o outro para sequência sódico-cálcica, posteriormente para cálcico-férrica e, por fim, para um estágio férrico (altos teores de Fe) (Figs. 75 e 76).

Para o setor Sossego/Curral os diagramas ternários sugerem um estágio inicial sódico (zonas mais distais às mineralizações), evoluindo gradativamente para uma fase intermediária sódico-potássica e finalizando com estágio predominantemente potássico. A fase potássica evolui gradativamente para clorítica (Figs. 77 e 78). Os estágios férricos e cálcicos ocorrem associados ao preenchimento de veios e/ou vênulas e assim podem ser considerados como distintos na provável evolução dos fluidos hidrotermais descritos.

DIAGRAMA TERNARIO SETOR PISTA

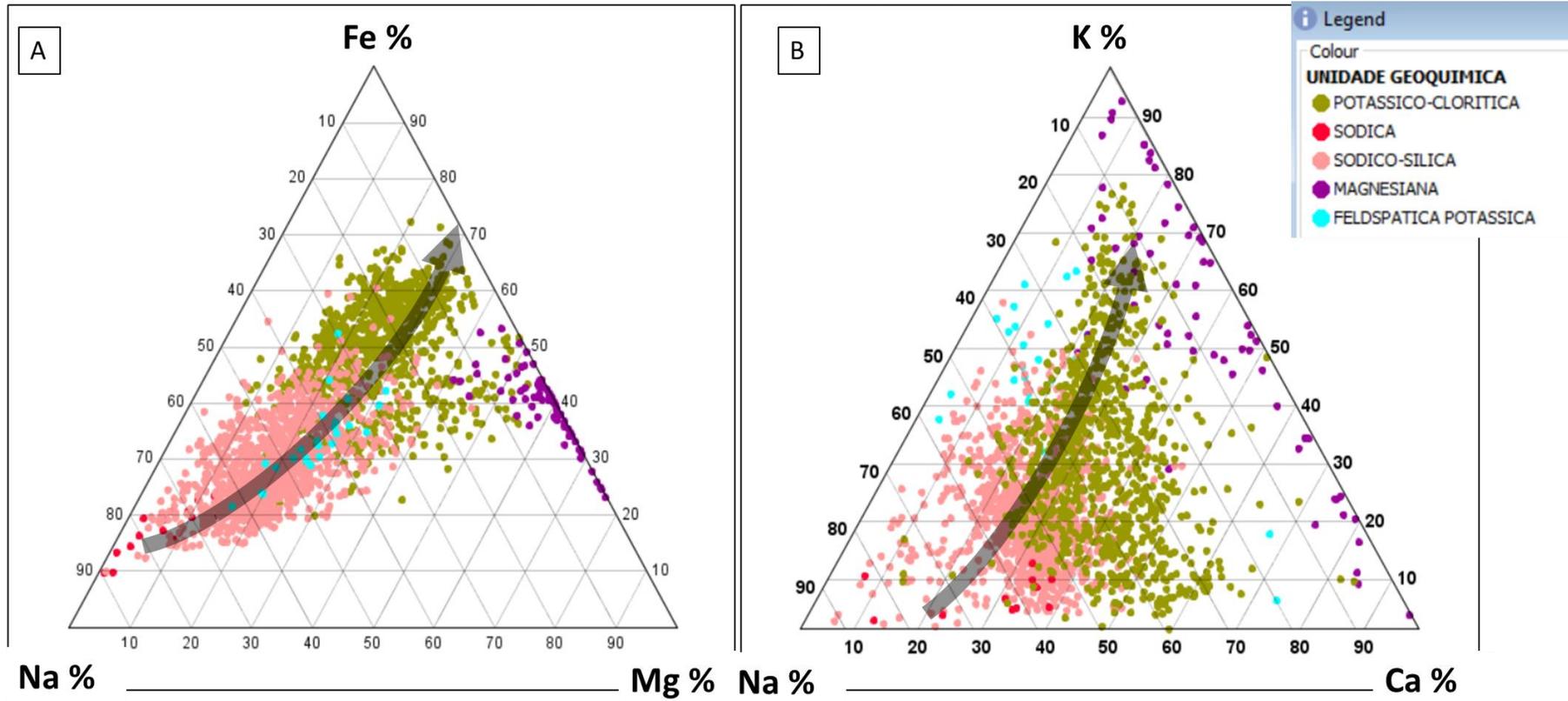


Figura 77 - Diagramas ternários do setor Pista (A) cruzamentos de Fe x Na x Mg e (B) cruzamentos de K x Na x Ca; ambos mostrando uma provável evolução dos fluidos hidrotermais.

DIAGRAMA TERNARIO SETOR PISTA

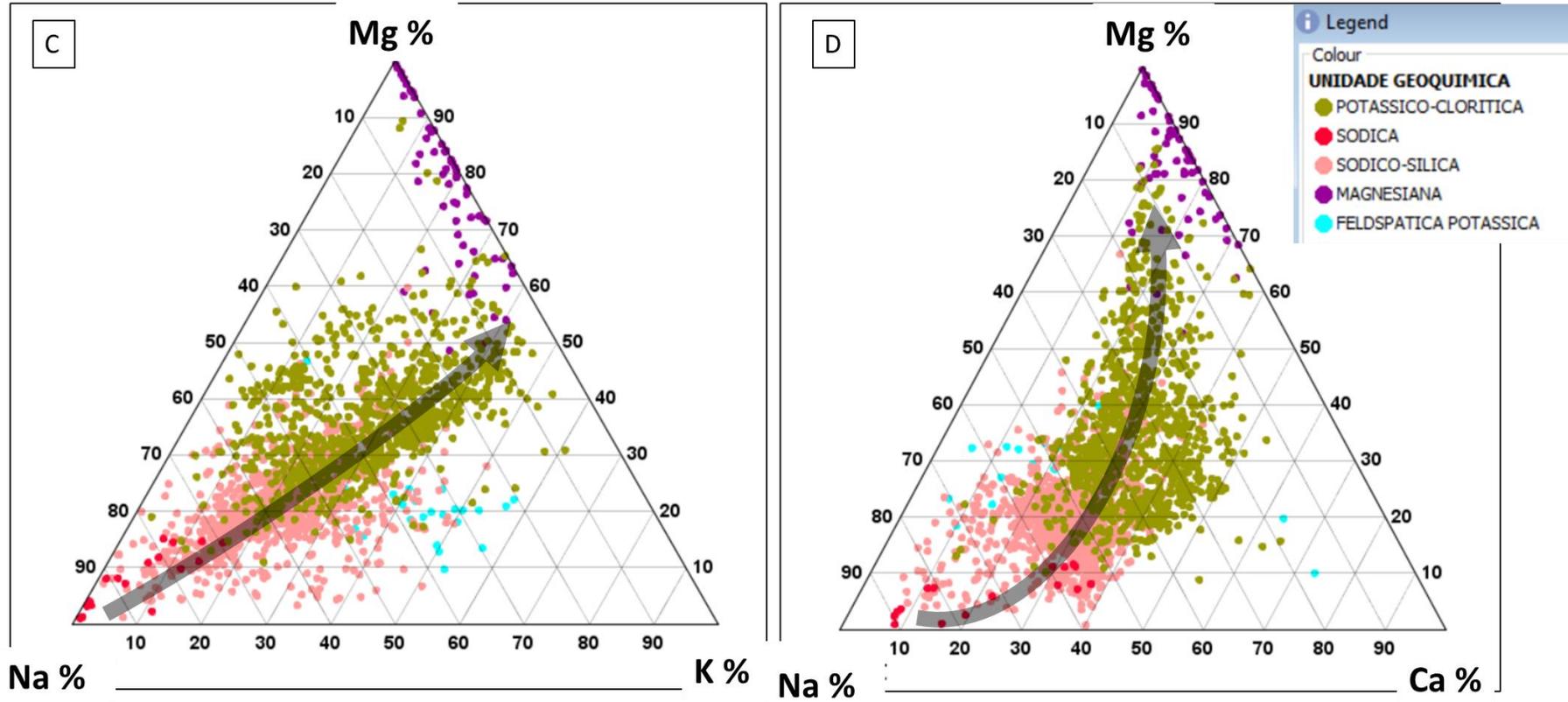


Figura 78 - Diagramas ternários do setor Pista (C) cruzamentos de Mg x Na x K e (D) cruzamentos de Mg x Na x Ca; ambos mostrando uma provável evolução dos fluidos hidrotermais.

DIAGRAMA TERNARIO SETOR SEQUEIRINHO/BAIANO

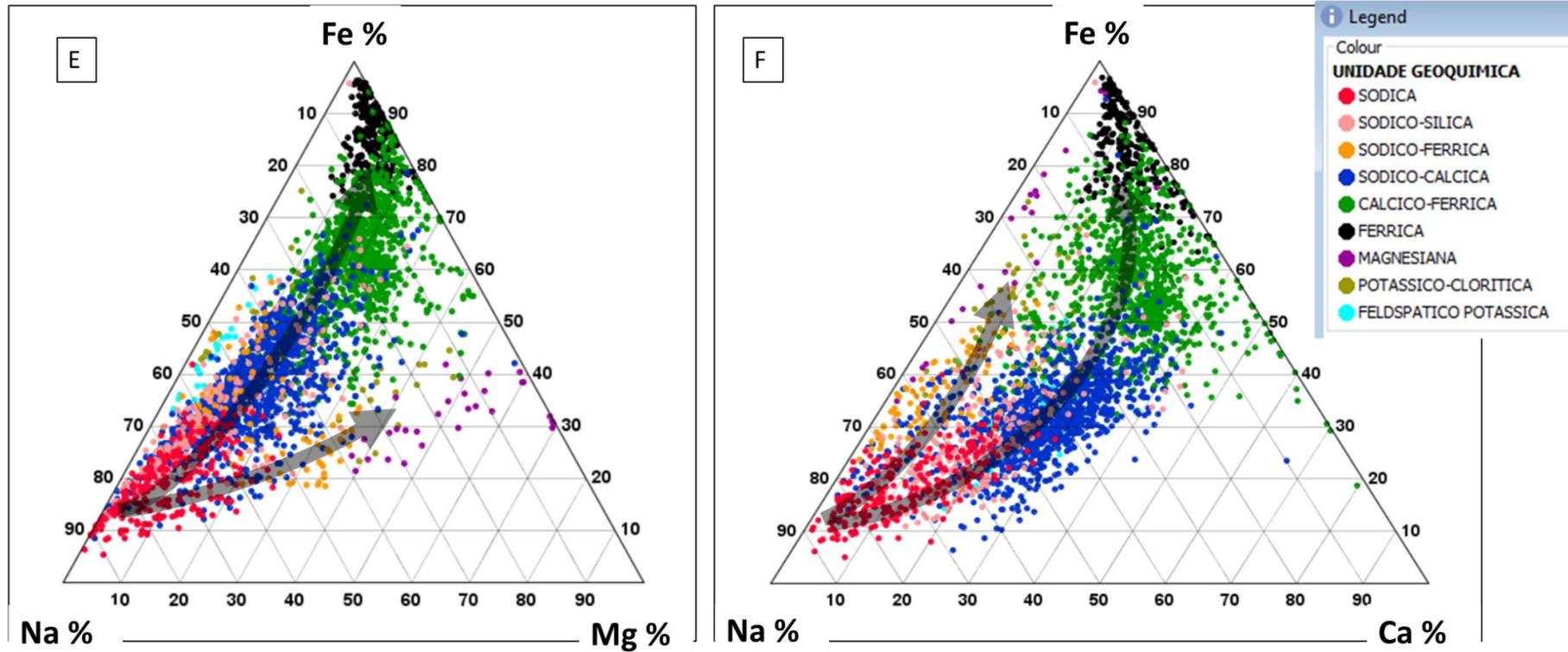


Figura 79 - Diagramas ternários do setor Sequeirinho/Baiano (E) cruzamentos de Fe x Na x Mg e (F) cruzamentos de Fe x Na x Ca; ambos mostrando duas prováveis evoluções dos fluidos hidrotermais.

DIAGRAMA TERNARIO SETOR SEQUEIRINHO/BAIANO

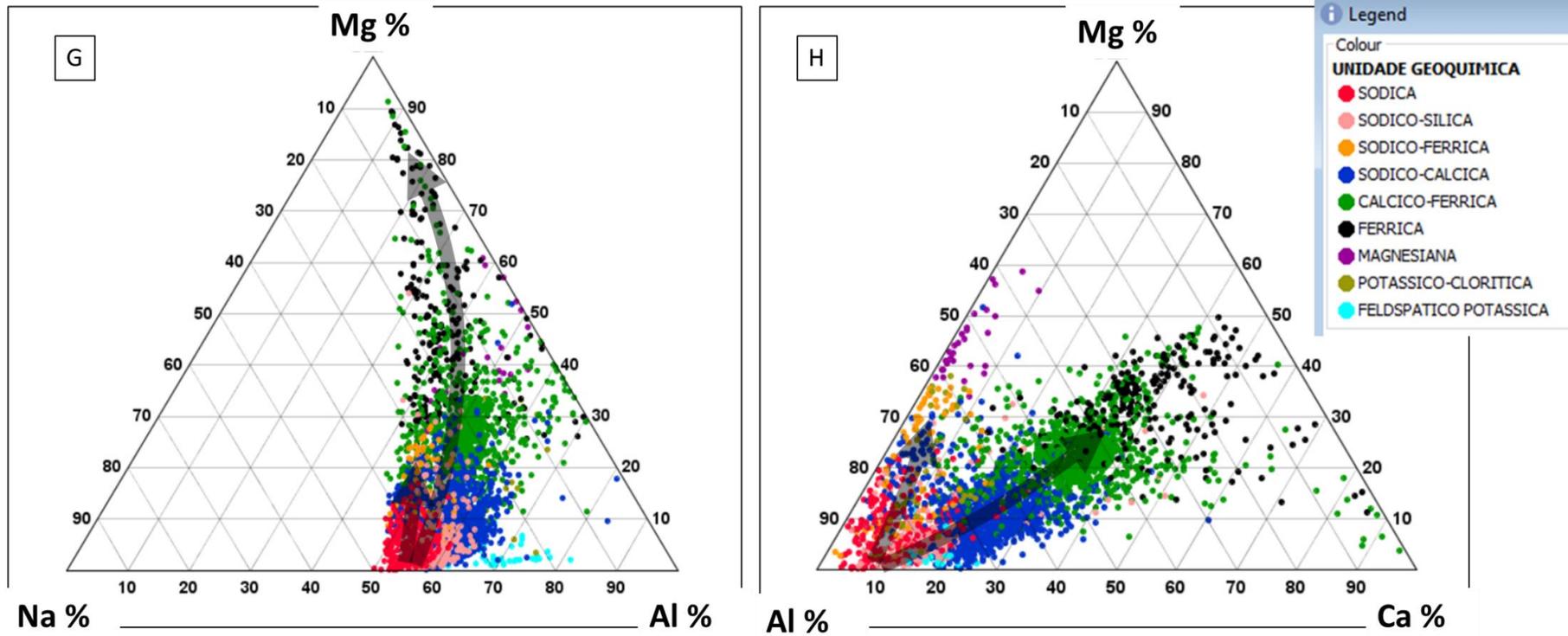


Figura 80 - Diagramas ternários do setor Sequeirinho/Baiano (G) cruzamentos de Mg x Na x Al; (H) cruzamentos de Mg x Al x Ca; ambos mostrando duas prováveis evoluções dos fluidos hidrotermais.

DIAGRAMA TERNARIO SETOR SOSSEGO/CURRAL

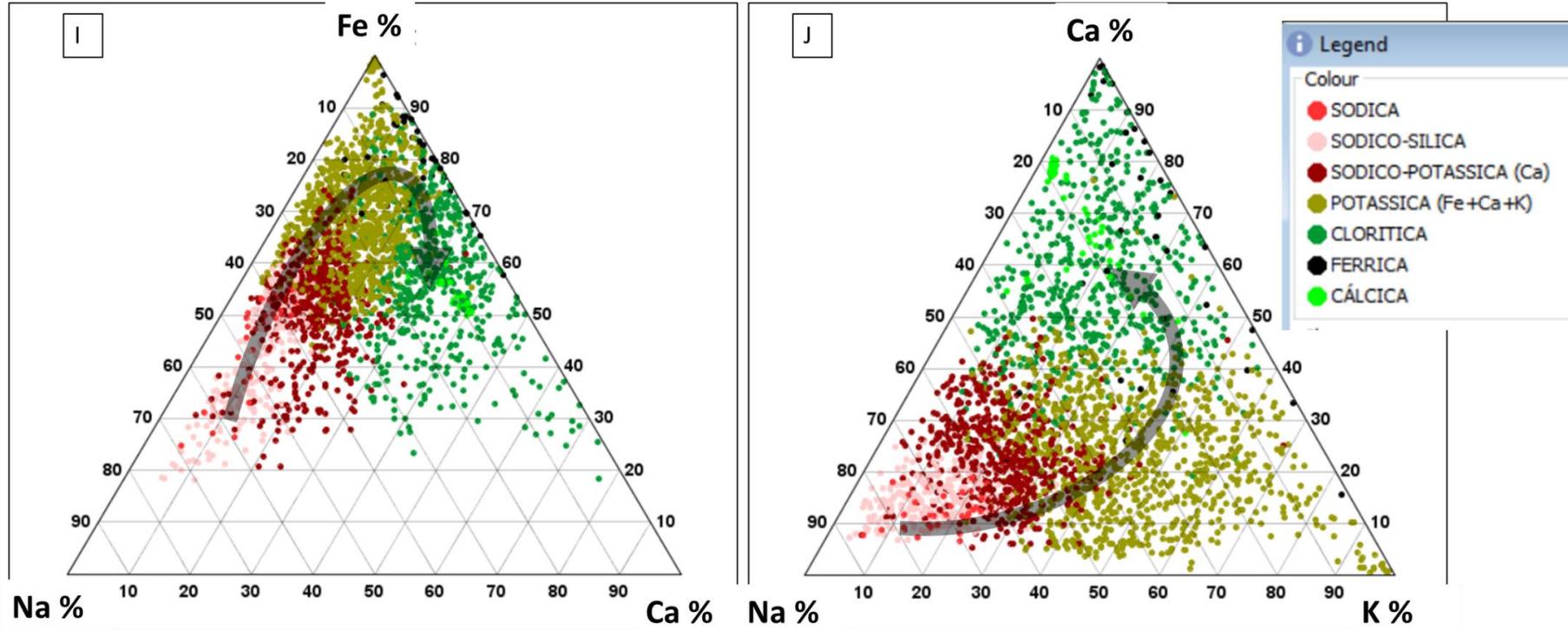


Figura 81 - Diagramas ternários do setor Sossego/Curral (I) cruzamentos de Fe x Na x Ca; (J) cruzamentos de Ca x Na x K; ambos mostrando uma provável evolução dos fluidos hidrotermais.

DIAGRAMA TERNARIO SETOR SOSSEGO/CURRAL

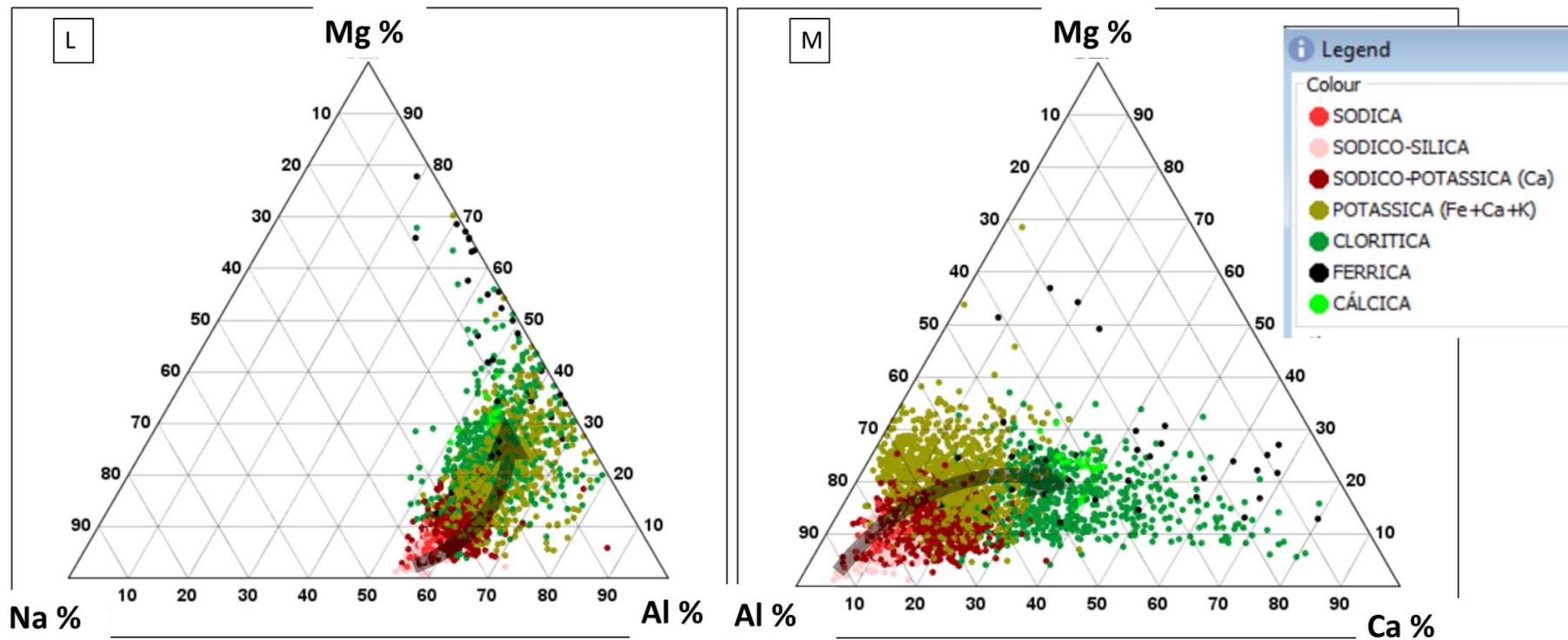


Figura 82 - Diagramas ternários do setor Sossego/Curral (L) cruzamentos de Mg x Na x Al; (M) cruzamentos de Mg x Al x Ca; ambos mostrando uma provável evolução dos fluidos hidrotermais.

6.8.1.3 *Boxplots*

No setor Pista os *Boxplots* demonstraram que as técnicas de estatísticas multivariadas revelaram correlações coerentes no uso de dados geoquímicos para definições de vetores e relação as unidades geoquímicas. Os elementos Ag, Ba, Be, Bi, Ce, Hf, In, Na, La, Sr, Th, W revelam elevados teores na unidade geoquímica sílico-sódica, onde ocorrem teores de Cu >0,9 %. Cd, Co, Cr, Cs, Ga, Ge, Li, Mg, Rb, Sc, Sn, Ti, V, Y foram observados em zonas mais distais à mineralização. Esses vetores geoquímicos são vinculados às zonas hidrotermais potássico-clorítica e magnesianas, em áreas com baixo teor de Cu (<0,5 %). As unidades sódica, sódico-sílica e feldspática potássica foram as que apresentaram resultados mais elevados para Al e distinta em relação às unidades mais deformadas como potássico-clorítica e magnesianas. A unidade potássico-clorítica apresenta afinidades com P, Ca, Ce, La e Y, mostrando uma provável ligação com zonas de deformações dúctil e carbonatação de eventos posteriores. A unidade magnesianas contém elevados teores de Co, Cu, Cr, Cs, Fe, Li e Ni, mostrando características típicas em termos de vetores geoquímicos. Essa unidade está associada às rochas ultramáficas encontradas principalmente no setor Pista. Além disso, a unidade feldspática potássica revela diversos elementos químicos com teores elevados que podem representar vetores, porém contém outros elementos químicos que também ocorrem em outras unidades geoquímicas separadas nesse setor, mas se diferenciam por estarem associadas às rochas intrusivas félsicas.

No setor Sequeirinho/Baiano os relacionamentos das unidades hidrotermais são bem marcado com os zonamentos geoquímicos dos elementos Na, Ca, Fe, Mg e Al. O minério nesse setor mostra afinidade com zonas enriquecidas em Fe, S, P, Ni, Ca e Mg. As principais unidades hidrotermais que estão associadas a altos teores de Cu (>0.9 %) são férrica e cálcica-férrica. As unidades geoquímicas cálcica-sódica, magnesianas, potássico-clorítica e feldspática-potássica apresentam teores mais baixos de Cu (0,2–0,7 %), ao passo que a unidade sódica apresenta teores muito baixos a estéreis de Cu (<0,2 %). Esses zonamentos hidrotermais bem permitiram a definição de associações de vetores geoquímicos que caracterizam cada unidade hidrotermal. As unidades sódica (baixo Fe) e sílica-sódica são bem marcadas pelos elementos químicos Na, Sr e W; a sódica-férrica pelos elementos Fe, Mo, Na, P e Th; a cálcica-sódica pelos elementos Ba, Ca, Sb, Sr e V; a potássica-clorítica pelos elementos Ba, Be, Ce, Cs, Hf, La, Mo, Rb, Ta, Th, U, W e Zr; a magnesianas pelos elementos Li, Mg, Mn, Tl e Zn; a cálcica-férrica pelos elementos Ca, Cu, Fe, Ga, S, Sb, Sc, Ti, V e Y; a férrica pelos elementos Ag, Bi, Co, Cu, Fe, Ga, Ge, In, Ni, P, S, Sb, Se, Te, U, V e Y; e a feldspática-potássica pelos elementos Ba, Ce, Hf, K, La, Mo,

Nb, Pb, Te, Th, Tl, U, W, Y e Zr. A integração dos dados geológicos, mineralógicos e geoquímica sugere a existência de uma sequência de estágios de evoluções hidrotermais no setor Sequeirinho/Baiano. Em áreas mais distais à mineralização ocorrem zonas enriquecidas em minerais de composição sódica, passando para uma zona rica em Ca, em seguida evoluindo para zonas com Ca, Fe e Cu, e por fim, zonas ricas em potássio no *footwall* do sistema hidrotermal.

O setor Sossego/Curral revela complexas correlações entre o zonamento hidrotermal e as unidades geoquímicas em função do seu comportamento estrutural. Nas descrições dos testemunhos de sondagem foram identificadas associações mineralógicas de brechas, veios, vênulas e disseminações que seccionam a rocha hospedeira. As unidades geoquímicas no Sossego/Curral que mais apresentaram afinidades com zonas de teores $>0.9\%$ Cu foram as clorítica, cálcica e férrica, onde geralmente nas descrições visuais dos testemunhos correspondem às zonas de brechas. Nas zonas consideradas como baixo e médios teores de cobre ($>0,2\%$ Cu $<0,9$) as unidades que apresentaram afinidade além das unidades clorítica, potássica e férrica também tiveram resultados positivos as unidades sódico-potássica e sódico-sílica. Nesses dois últimos grupos (unidades sódico-potássica e sódico-sílica) as ocorrências de mineralizações são observadas em pequenas vênulas e veios centimétricos de calcopirita associadas com carbonatos tardios. Para os zonamentos hidrotermais do setor Sossego/Curral podemos considerar que as unidades geoquímicas sódica, sódico-sílica e sódico-potássica são zonas como menores afinidades com mineralizações e mais distais as prováveis fontes de minério. No geral, grande parte dos furos descritos e amostras analisadas apresentaram predominância da unidade clorítica, comumente pervasiva e/ou vênulas/veios nas porções mais distais ao minério ou ocorrem nas porções mais proximais as zonas mineralizadas associadas a outras unidades geoquímicas definidas tais como potássicas ou cálcicas.

Na unidade clorítica ocorrem vênulas e veios de carbonato que geram teores anômalos de Ca, P e ETR. Nessa unidade se destacam Ag, Be, Bi, Ca, Ce, Cu, La, Mn, Mo, Ni, P e S. Com teores medianos ocorrem K, Al, Mg e Fe. As unidades sódicas e sódico-sílica (média de $3,5\%$ de Na) ocorrem localmente associadas aos granitos granofíricos na porção WSW do setor Sossego/Curral e podem estar associadas ou influenciadas por eventos regionais similares aqueles do setor Sequeirinho. Entretanto, a geoquímica sugere uma gradação paragenética de fase sódica para potássica. As mesmas mostram teores de sílica distintos (unidade sódica $<28\%$ SiO₂ e unidade sódico-sílica $>28\%$ SiO₂), bem como destaques para Na, Hf, Nb, Ta e Zr.

A unidade sódico-potássica apresenta características intermediárias entre a unidade sódica e a potássicas e apresenta elementos químicos de ambas as unidades, porém de teores

mais baixos para os elementos químicos, parecendo uma fazer fase transitória de uma unidade para outra. Se destacaram os elementos Hf, Na, Nb, Ta e Zr que também aparecem na unidade sódica, K e Ba que ocorrem na unidade potássica, porém em menores teores. A unidade potássica é relacionada à formação de biotita e feldspato potássico pela substituição de plagioclásio sódico, indicando uma transição da fase sódica para potássica. Os elementos que se destacam nessa unidade são Ba, Cs, K, Li, Rb, Tl e Fe, Mg, Ni, Sc subordinados.

A unidade geoquímica férrica ocorre principalmente associada às zonas clorítica e cálcica, porém se diferencia pelos altos teores de ferro (>15 % Fe). Ocorre sobretudo em zonas de brechas e veios e está associada diretamente com zonas mineralizadas, porém pode ocorrerem zonas com matriz carbonática ou formando películas em torno de fragmentos de rocha nas brechas. Seus principais vetores geoquímicos são Ag, As, Bi, Cd, Ce, Co, Cs, Cu, Fe, Ga, Ge, In, La, Li, Mo, Ni, P, Pb, Re, S, Se, Sn, Te, TL, U e Y.

A unidade cálcica corresponde a intervalos ricos principalmente em calcita, actinolita e epidoto de brechas e vênulas que seccionam as rochas cloritizadas. Porém, ocorrem vetores geoquímicos que permitiram a divisão dessa unidade, a exemplo de Al (> 7 %), Ca (> 7 %), Cr (> 50 ppm), Mn, Sc, Sr, V e Zn.

6.8.2 Modelos implícitos

Os modelos implícitos, confeccionados com os resultados de teores e unidades geoquímicas definidas através das estatísticas multivariadas, se mostraram bastante coerentes ao compará-los em suas distribuições espaciais. Foram utilizadas duas técnicas de modelamento: a) função de base radial (RBF) para dados de elementos químicos independentes, que permitiu as avaliações dos comportamentos, distribuições e alcances espaciais, bem como gerar possíveis vetores geoquímicos (Cowan 2002); e b) criação de modelos categóricos a partir das definições das unidades geoquímicas propostas na técnica de estatística multivariada. Foram agrupados pequenos intervalos em unidades maiores, facilitando as interpolações nos *softwares* (Relatório de Modelamentos Implícitos da Vale).

Ao comparar as duas propostas de modelos por meio da ferramenta no *LEAPFROG* de combinações de modelos (*combined models*), observou que os vetores geoquímicos estão bastante coerentes com as unidades geoquímicas propostas. Isso mostra que todos os trabalhos estatísticos para separações e definições das unidades geoquímicas estão de acordo com as prováveis evoluções dos fluidos hidrotermais e suas vetorizações químicas.

7 CONCLUSÕES

Essa Dissertação de Mestrado demonstrou a importância de caracterizações geoquímicas e vetores para os setores do Complexo do Sossego em função das grandes diferenças de seus setores.

No setor Pista as litologias alteradas hidrotermalmente com zonas sódicas (albita) e intensa silicificação estão geralmente associadas aos elevados teores de cobre ($> 1 \% \text{ Cu}$). As zonas com teores de cobre medianos a baixos ($0,2-0,99 \% \text{ Cu}$) estão associadas às unidades potássico-clorítica (biotita e/ou clorita). Ocorrem baixíssimos teores de Fe nas zonas mineralizadas em comparação aos setores Sequeirinho/Baiano e Sossego/Curral. Esse setor revela as unidades litogeoquímicas sódica, sódico-sílica, potássico-clorítica, unidade magnésiana e feldspática potássica que contribuíram com o entendimento das distribuições geoquímicas, principais vetores e evolução paragenética. Essas informações ajudam a operação da mina e usina do Sossego e criam mecanismos de tratamento e beneficiamento do minério de forma otimizada, em função de altos teores de sílica associados ao minério. O processo de liberação desse minério de cobre associado a sílica no beneficiamento é complexo, necessitando cominuição, taxa de energia e quantidades de bolas no moinho bem maiores em comparação ao minério não silicatado que comumente ocorre nos outros setores do complexo.

O setor Sequeirinho/Baiano mostra química distinta em sua extensão. Na porção central e ENE ocorrem zonamentos típicos de sistemas *IOCG* arqueanos de Carajás. Nas porções distais ao corpo de minério ocorre metassomatismo sódico, passando por cálcico-sódico, cálcico-férrico e férrico e zona de mineralização. As associações das unidades litogeoquímicas definidas para o setor com os “*cut-off grade*” definidos estatisticamente como alto ($>1 \% \text{ Cu}$) e baixo ($>0,2$ e $<0,99 \% \text{ Cu}$), mostra que as zonas consideradas como alto teor (calcopirita maciça) são associadas às zonas definidas como férrica com $>20 \% \text{ Fe}$ (magnetita maciça e/ou fragmentos subarredondados) e/ou cálcico-férrica com $>8 \% \text{ Ca}$ e >10 e $<20 \% \text{ Fe}$ (anfíbólio e magnetita). Aquelas de baixo teor (minério em veios/vênulas e/ou disseminado) estão associadas principalmente nas unidades sódico-cálcica, cálcico-férrica e férrica. A porção WNW do setor revela características semelhantes às unidades descritas para o setor Pista. Mostra ainda unidades com intensa silicificação/albitização, unidade com teores médios a altos de Fe e K; médios a altos de Mg. Provavelmente as diferenças dos zonamentos geoquímicos e evoluções dos fluidos hidrotermais que ocorrem nas porções WNW, central e ENE do setor

Sequeirinho/Baiano estão diretamente associados ao contexto estrutural, composição dos fluidos, intensidades de interações e principalmente ao tipo de rocha.

No setor Sossego/Curral, devido à presença de brechas e principalmente “*stockworks*”, alguns locais são caracterizados por preenchimentos de fluidos tardios nessas estruturas e com isso os dados litogeoquímicos mascaram as correlações com a mineralogia nos diagramas. Alguns domínios geoquímicos classificados, apesar de bem definidos, apresentaram variações em suas assembleias minerais e teores químicos em decorrências de veios e/ou vênulas. Nesses casos, foram avaliados visualmente os testemunhos para demarcar e avaliar as proporções espaciais da mineralogia nos intervalos amostrados e analisados. As unidades geoquímicas no Sossego/Curral que mais apresentaram afinidades com zonas mineralizadas para teores acima de $>1\%$ Cu foram as unidades clorítica, cálcica e férrica. Nas zonas consideradas como baixos e médios teores ($>0,2\%$ Cu $<0,9$) praticamente todas as unidades geoquímicas propostas tiveram resultados positivos para mineralizações de Cobre devido as questões estruturais. O setor Sossego/Curral foi formado através de brechas (corpo principal) e zonas de veios aos entornos. As extensões das zonas de veios influenciaram quase todas as unidades geoquímicas com eventos composicionais tardios inclusive mineralizações. Em grande parte do setor Sossego/Curral há predominância das unidades clorítica e potássica, permitindo elaboração de quadros de evoluções paragenéticas e/ou dos fluidos hidrotermais para todas as unidades geoquímicas definidas para o setor.

Os modelos implícitos foram fundamentais para o trabalho, representando a materialização e concretização dos dados brutos numéricos em volumes espaciais 3D que contemplam todo o arcabouço geológico do depósito em estudo, onde se consideram *inputs* de informações os dados petrográficos, mineralogia, dados estruturais e geofísicos. As propostas de modelos geoquímicos aqui desenvolvidos servirão como testes operacionais, tais como desmontes de rochas e beneficiamentos do minério de acordo com as características baseadas no zonamento geoquímico. Além disso, auxiliarão prováveis expansões nas cavas em operações e nas explorações de novos depósitos de cobre.

Conclui-se que o método utilizado para a criação de vetores geoquímicos, caracterização das alterações hidrotermais e definições de unidades geoquímicas tiveram correlações significativas entre a química, descrições visuais dos litotipos e petrografia das rochas do Complexo Sossego. Assim, representa uma ferramenta de guia vetorial geoquímico para explorações futuras, no auxílio de planejamentos de avanços dos setores nas cavas, planejamentos de desmontes e principalmente no beneficiamento do minério na usina.

REFERÊNCIAS

- Almeida F.F.M., Hasui Y., Brito Neves, B.B., Fuck R.A. 1981. Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth-Science Reviews*, **17**(1-2): 1-29.
- Almeida J.A.C., Dall’Agnol R., Oliveira M.A., Macambira M.J.B., Pimentel M.M., Rämö O.T., Guimarães F.V., Leite A.A.S. 2011. Zircon geochronology, geochemistry and origin of the TTG suites of the Rio Maria granite-greenstone terrane: Implications for the growth of the Archean crust of the Carajás province, Brazil. *Precambrian Research*, **187**(1-2): 201-221.
- Althoff F.J., Barbey P., Boulier A.M. 2000. 2.8–3.0 Ga plutonism and deformation in the SE Amazonian Craton: the Archean granitoids of Marajoara (Carajás Mineral Province, Brazil). *Precambrian Research*, **104**: 187-206.
- Araújo Filho R.C., Nogueira A.C.R., Araújo R.N. 2020. New stratigraphic proposal of a Paleoproterozoic siliciclastic succession: Implications for the evolution of the Carajás basin, Amazonian craton, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102665
- Bettencourt J.S., Juliani C., Xavier R.P., Monteiro L.V.S., Bastos Neto A.C., Klein E.L., Assis R.R., Leite Jr W.B., Moreto C.P.N., Fernandes C.M.D., Pereira V.P. 2016. Metallogenic systems associated with granitoid magmatism in the Amazonian Craton: An overview of the present level of understanding and exploration significance. *Journal of South American Earth Sciences*, **68**: 22-49.
- Brand N.W. 1999. Element ratios in nickel sulphide exploration: vectoring towards ore environments. *Journal of Geochemical Exploration*, **67**(1-3): 145-165.
- Carneiro C. de C., Juliani C., Carreiro-Araujo S.A., Monteiro L.V.S., Crosta A.P., Fernandes C.M.D. 2019. New Crustal framework in the Amazon Craton based on geophysical data: Evidences of Deep East-West Trending Suture Zones. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, **16**(1): 20-24.
- Carvalho E.R., Monteiro L.V.S., Souza Filho C.R.de. 2005. Geology and hydrothermal alteration of the Sossego iron oxide–copper–gold deposit, Carajás Mineral Province, Brazil. Presented at the 1 Simpósio Brasileiro de Metalogenia, Gramado: *Anais [...]* UFRGS, CD-ROM.
- Cowan E.J., Beatson R.K., Fright W.R., McLennan T.J., Mitchell T.J. 2002. Rapid geological modelling. In: AIG, Applied structural geology for mineral exploration and Mining, International Symposium, Kalgoorlie. *Extended Abstract Volume*, p. 23-25.
- Dall’Agnol R., Oliveira M.A., Almeida J.A.C., Althoff F.J., Leite A.A.S., Oliveira D.C., Barros C.E.M. 2006. Archean and Paleoproterozoic granitoids of the Carajás Metallogenic Province, Eastern Amazonian Craton. In: PRONEX-UFPA/SBG-NO, 2º Symposium on Magmatism, Crustal Evolution, and Metallogenesis of the Amazonian Craton, Belém. *Proceedings[...]*. p. 97-150.

Dall'Agnol R., Teixeira N.P., Ramo O.T., Moura C.A.V., Macambira M.J.B., Oliveira D.C. 2005. Petrogenesis of the Paleoproterozoic rapakivi A-type granites of the Archean Carajás metallogenic province, Brazil. *Lithos*, **80**(1-4): 101-129.

DOCEGEO. 1988. Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás, Pará. In: SBG, 35º Congresso Brasileiro de Geologia, Belém. *Anais [...]*. p. 11-54.

Domingos F.H.G. 2009. *The structural setting of the Canaã dos Carajás region and Sossego-Sequeirinho deposits, Carajás Brazil*. PhD Thesis, Durham University, Durham, 483p.

Fabris A.J., Halley S., van der Wielen S., Keeping T., Gordon G. 2013. *IOCG-style mineralisation in the central eastern Gawler Craton, SA*; characterisation of alteration, geochemical associations and exploration vectors. Adelaide, Resources and Energy Group, Technical Report No. 2013/00014.

Fallara F., Legault M., Rabeau O. 2006. 3-D Integrated Geological Modeling in the Abitibi Subprovince (Quebec, Canada): Techniques and Applications. *Exploration and Mining Geology*, **15**(1-2): 27-43.

Faustinoni J.M., Moreto C.P.N., Silva M.A.D., Monteiro L.V.S., Xavier R.P. 2016. Migmatitos do Complexo Xingu na porção nordeste do Domínio Carajás, Cráton Amazônico, Brasil. In: SBG, 48º Congresso Brasileiro de Geologia, Porto Alegre. *Anais [...]*. p.803.

Feio G.R.L. & Dall'Agnol R. 2012. Geochemistry and petrogenesis of the Mesoarchean granites from the Canaã dos Carajás area, Carajás Province, Brazil: implications for the origin of Archean granites. *Lithos*, **154**: 33-52.

Feio G.R.L., Dall'Agnol R., Dantas E.L., Macambira M.J.B., Santos J.O.S., Althoff F.J., Soares J.E.B. 2013. Archean granitoid magmatism in the Canaã dos Carajás area: implications for crustal evolution of the Carajás province, Amazonian craton, Brazil. *Precambrian Research*, **227**: 157-185.

Fernandes C.M.D., Galarza M.A., Gouvêa R.C.T., Souza H.P.T. 2021. Geochemical, geochronological, and isotopic constraints for the Archean metamorphic rocks of the westernmost part of the Carajás Mineral Province, Amazonian Craton, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, **110**: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103340>

Fernandes C.M.D. & Juliani C. 2019. The tectonic controls on the Paleoproterozoic volcanism and the associated metallogeny in the South Amazonian craton, Brazil: Sr–Nd–Pb isotope constraints. *Precambrian Research*, **331**: <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2019.105354>.

Fernandes C.M.D., Juliani C., Monteiro L.V.S., Lagler B., Echeverri Misas C.M. 2011. High-K calc-alkaline to A-type fissure-controlled volcano-plutonism of the São Félix do Xingu region, Amazonian craton, Brazil: Exclusively crustal sources or only mixed Nd model ages? *Journal of South American Earth Sciences*, **32**(4): 351-368.

Ferrari L., Lopez-Martinez M., Aguirre-Diaz G., Carrasco-Nunez G. 1999. Space-time patterns of Cenozoic arc volcanism in central Mexico: From the Sierra Madre Occidental to the Mexican Volcanic Belt. *Geology*, **27**(4): 303-306.

- Galley A.G. 1995. Target vectoring using lithogeochemistry: applications to the exploration for volcanic-hosted massive sulphide deposits. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, **32**(7): 329A.
- Gibbs A.K., Wirth K.R., Hirata W.K., Olszewski Júnior W.J. 1986. Age and composition of the Grão Pará Group volcanics, Serra dos Carajás. *Revista Brasileira de Geociências*, **16**(2): 201-211.
- Halley S., Dilles J., Tosdal R. 2015. Footprints: the hydrothermal alteration and geochemical dispersion around porphyry copper deposits. *Seg Newsletter*, **100**: 11-17.
- Hitzman M.W. 2000. Iron oxide–Cu–Au deposits: what, where, when, and why. In: Porter T.M. *Hydrothermal iron oxide cooper–gold and related deposits: a global perspective*. Adelaide, PGC Pub. V. 1, p. 9-26.
- Hitzman M.W., Oreskes N., Einaudi M.T. 1992. Geological characteristics and tectonic setting of proterozoic iron oxide (Cu-U-Au-REE) deposits. *Precambrian Research*, **58**(1-4): 241-287.
- Holdsworth R.E. & Pinheiro R.V.L. 2000. The anatomy of shallow-crustal transpressional structures: Insights from the Archaean Carajas fault zone, Amazon, Brazil. *Journal of Structural Geology*, **22**(8): 1105-1123.
- Hosseini-Dinani H. & Aftabi A. 2016. Vertical lithogeochemical halos and zoning vectors at Goushfil Zn–Pb deposit, Irankuh district, southwestern Isfahan, Iran: Implications for concealed ore exploration and genetic models. *Ore Geology Reviews*, **72**: 1004-1021.
- Hurley P.M., Rand J.R., Pinson W.H., Fairbairn H.W., de Almeida F.F.M., Melcher G.C., Cordani U.G., Kawashita K., Vandomos P. 1967. Test of Continental Drift by Comparison of Radiometric Ages: A pre-drift reconstruction shows matching geologic age provinces in West Africa and Northern Brazil. *Science*, **157**(3788): 495-500.
- Jesus A.J.C., Fernandes C.M.D., Juliani C., Monteiro L.V.S., Cruz R.S., Nascimento T.S., Misas C.M.E., Lagler B., Nunes S.S., Pereira D.F. 2015. O metamorfismo arqueano da região de Vila Tancredo Neves, NE de São Félix do Xingu (PA), Província Mineral de Carajás. In: Gorayeb P.S.S. & Meiguins A. (eds.). *Contribuições à geologia da Amazônia*. Belém, Sociedade Brasileira de Geologia - Núcleo Norte, p. 339-354.
- Juliani C., Assis R.R. de., Monteiro L.V.S., Fernandes C.M.D., Martins J.E.Z. da S., Costa J.R.C. 2021. Gold in Paleoproterozoic (2.1 to 1.77 Ga) Continental Magmatic Arcs at the Tapajós and Juruena Mineral Provinces (Amazonian Craton, Brazil): A New Frontier for the Exploration of Epithermal–Porphyry and Related Deposits. *Minerals*, **11**(7): <https://doi.org/10.3390/min11070714>.
- Juliani C. & Fernandes C.M.D. 2010. Well-preserved Late Paleoproterozoic volcanic centers in the São Félix do Xingu region, Amazonian Craton, Brazil. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **191**(3-4): 167-179.
- Juliani C., Fernandes C.M.D., Monteiro L.V.S. 2015. Características da subducção, paleoclima e eventos erosivos paleoproterozoicos (2,1 - 1,88 Ga) e seus efeitos na estruturação da parte sul do Cráton Amazônico. In: SBG-Núcleo Norte, 14º Simpósio de Geologia da Amazônia. Marabá, *Anais [...]*. p.81.

Juliani C., Monteiro L.V.S., Fernandes C.M.D. 2016. Potencial mineral: cobre. *In: Melfi A.J., Misi A., Campos D. de A., Cordani U.G. (eds.). Recursos minerais no Brasil: problemas e desafios.* Rio de Janeiro, Academia Brasileira de Ciências, p.134-154.

Kay S.M., Godoy E., Kurtz A. 2005. Episodic arc migration, crustal thickening, subduction erosion, and magmatism in the south-central Andes. *Geological Society of America Bulletin*, **117**(1-2): 67-88.

Lacasse C.M., Ganade C.E., Mathieu L., Teixeira N.A., Lopes L.B.L., Monteiro C.F. 2020. Restoring original composition of hydrothermally altered Archean metavolcanic rocks of the Carajás Mineral Province (Brazil): Geodynamic implications for the transition from lid to mobile tectonics. *Lithos*, **372-373**: <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105647>.

Lafon J.M., Rodrigues E., Macambira E.M.B., Pereira E.D. 1995. Magmatisme anarogénique du Protérozoïque Inférieur dans la région de São Felix do Xingu-Tucumã (Amazonie Orientale, Brésil). Nouvelles données géochronologiques. *C. R. Acad. Sci. Paris*, **320**: 937-944.

Lancaster O.J.J., Fanton J., Almeida A.J., Leveille R.A., Vieira S. 2000. Discovery and geology of the Sossego copper-gold deposit, Carajás District, Pará State, Brazil. *In: IUGS, 31^o International Geological Congress, Rio de Janeiro, Anais [...].* CD-ROM.

Large R.R., Gemell J.B., Paulick H., Huston D.L. 2001. The Alteration Box Plot: A Simple Approach to Understanding the Relationship between Alteration Mineralogy and Litho geochemistry Associated with Volcanic-Hosted Massive Sulfide Deposits. *Economic Geology*, **96**(5): 957-971.

Macambira M.J.B. & Lancelot J.R. 1996. Time Constraints for the Formation of the Archean Rio Maria Crust, Southeastern Amazonian Craton, Brazil. *International Geology Review*, **38**(12): 1134-1142.

Machado N., Lindenmayer Z., Krogh T.E., Lindenmayer D. 1991. U-Pb geochronology of Archean magmatism and basement reactivation in the Carajas area, Amazon shield, Brazil. *Precambrian Research*, **49**(3-4): 329-354.

Mark G., Wilde A., Oliver N.H.S., Williams P.J., Ryan C.G. 2005. Modeling outflow from the Ernest Henry Fe oxide Cu–Au deposit: implications for ore genesis and exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, **85**(1): 31-46.

Mathieu L. 2018. Quantifying hydrothermal alteration: a review of methods. *Geosciences*, **8**(7): <https://doi.org/10.3390/geosciences8070245>.

Mazdab F.K., Johnson D.A., Barton M.D. 2008. Trace element characteristics of hydrothermal titanite from ironoxide-Cu-Au (IOCG) mineralization. *In: TGS, 18^o Goldschmidt, Vancouver. Abstracts.* A609.

Monteiro L.V.S., Xavier R.P., Carvalho E.R., Hitzman M.W., Johnson C.A., Souza Filho C.R., Torresi I. 2008. Spatial and temporal zoning of hydrothermal alteration and mineralization in the Sossego iron oxide-copper-gold deposit, Carajás Mineral Province, Brazil: Paragenesis and stable isotope constraints. *Mineralium Deposita*, **43**(2): 129-159.

- Morais R.P.S. & Alkmin F.F., 2005. O controle litoestrutural da mineralização de cobre do Depósito Sequeirinho, Canaã dos Carajás, PA. *In*: 1º Simpósio Brasileiro de Metalogenia, Gramado. *Short Papers*. CD-ROM.
- Moreto C.P.N., Monteiro L.V.S., Xavier R.P., Amaral W.S., Santos T.J.S.dos, Juliani C., Souza Filho C.R. 2011. Mesoarchean (3.0 and 2.86 Ga) host rocks of the iron oxide-Cu-Au Bacaba deposit, Carajás Mineral Province: U-Pb geochronology and metallogenetic implications. *Mineralium Deposita*, **46**(7): 789-811.
- Moreto C.P.N., Monteiro L.V.S., Xavier R.P., Creaser R.A., DuFrane S.A., Melo G.H.C., Silva D.M.A., Tassinari C.C.G., Sato K. 2015a. Timing of multiple hydrothermal events in the iron oxide–copper–gold deposits of the Southern Copper Belt, Carajás Province, Brazil. *Mineralium Deposita*, **50**(5): 517-546.
- Moreto C.P.N., Monteiro L.V.S., Xavier R.P., Creaser R.A., DuFrane S.A., Tassinari C.C.G., Sato K., Kemp A.I.S., Amaral W.S. 2015b. Neoarchean and Paleoproterozoic Iron Oxide-Copper-Gold Events at the Sossego Deposit, Carajás Province, Brazil: Re-Os and U-Pb Geochronological Evidence. *Economic Geology*, **110**(3): 809-835.
- Moreto C.P.N., Monteiro L.V.S., Xavier R.P., Melo G., Silva M.A.D. 2013. Multiple hydrothermal and iron oxide Cu-Au systems in the Southern Copper Belt, Carajás Province. *In*: UFRGS, 3º Simpósio Brasileiro de Metalogenia. Gramado, *Resumo* [...] 1CD-ROM.
- Nogueira A.C.R., Truckenbrodt W., Pinheiro R.V.L. 1995. Formação Águas Claras, Pré-Cambriano da Serra dos Carajás: redescrição e redefinição litoestratigráfica. *Bol Mus Paraense Emílio Goeldi. Ciências da Terra*, **7**: 177-277.
- O'Driscoll E.S.T. 1985. The application of lineament tectonics in the discovery of Olympic Dam Cu-Au-U deposit at Roxby Downs, South Australia. *Global Tectonics and Metallogeny*, **3**(1): 43-57.
- Oliveira M.A., Dall'Agnol R., Scaillet B. 2010. Petrological constraints on crystallization conditions of Mesoarchean sanukitoid rocks, southeastern Amazonian craton, Brazil. *Journal of Petrology*, **51**(10): 2121-2148.
- Oliveira R.G. 2018. Insights on the framework of the Carajás Province, Amazonian Craton, Brazil, and on the three-dimensional shape of the Carajás Basin, based on gravity data. *Journal of the Geological Survey of Brazil*, **1**(3): 101-112.
- Pidgeon R.T., Macambira M.J.B., Lafon J.M. 2000. Th-U-Pb isotopic systems and internal structures of complex zircons from an enderbite from the Pium Complex, Carajas Province, Brazil: evidence for the ages of granulite facies metamorphism and the protolith of the enderbite. *Chemical Geology*, **166**(1-2): 159-171.
- Pinheiro R.V.L. & Holdsworth R.E. 1997. Reactivation of Archaean strike-slip fault systems, Amazon region, Brazil. *Journal of the Geological Society*, **154**(1): 99-103.
- Pirajno F. 2009. *Hydrothermal processes and mineral systems*. Berlin, Springer, 1250 p.
- Sacks I.S. 1983. The subduction of young lithosphere. *Journal of Geophysical Research*, **88**(B4): 3355-3366.

Santos B.A. 1986. Recursos Minerais de Carajás. *In: Almeida Júnior J.M.G. (ed.). Carajás: desafio político, ecológico e desenvolvimento.* São Paulo, CNPq-Editora Brasiliense, p. 295-361.

Santos J.O.S., Hartmann L.A., Gaudette H.E., Groves D.I., McNaughton N.J., Fletcher I.R. 2000. A New Understanding of the Provinces of the Amazon Craton Based on Integration of Field Mapping and U-Pb and Sm-Nd Geochronology. *Gondwana Research*, **3**(4): 453-488.

Silva M.A.D., Monteiro L.V.S., Moreto C.P.N., Sousa S. 2015. Metamorfismo e geoquímica do Complexo Xingu na região de Canaã dos Carajás: implicações para a evolução mesoarqueana do Domínio Carajás. *In: Gorayeb P.S.S. & Lima A.M.M. (eds.). Contribuições à geologia da Amazônia.* Belém, Sociedade Brasileira de Geologia - Núcleo Norte, p.251-270.

Souza Z.S., Potrel A., Lafon J.-M., Althoff F.J., Martins Pimentel M., Dall'Agnol R., Oliveira C.G.de. 2001. Nd, Pb and Sr isotopes in the Identidade Belt, an Archaean greenstone belt of the Rio Maria region (Carajás Province, Brazil): implications for the Archaean geodynamic evolution of the Amazonian Craton. *Precambrian Research*, **109**(3): 293-315.

Suslick S.B. 1978. *Estudo metodológico de técnicas estatísticas para análise de dados geoquímicos.* MS Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 116 p.

Suslick S.B. 1986. *Quantificação da potencialidade mineral com base em dados geoquímicos: um estudo aplicado as folhas Itaquaquecetuba, Piracaia, Igaratá, Camanducaia e Monteiro Lobato.* PhD Thesis, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 304 p.

Tallarico F.H.B. 2003. *O cinturão cupro-aurífero de Carajás, Brasil.* PhD Thesis, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 229 p.

Tallarico F.H.B., McNaughton N.J., Groves D.I., Fletcher I.R., Figueiredo B.R., Carvalho J.B., Rego J.L., Nunes A.R. 2004. Geological and SHRIMP II U-Pb constraints on the age and origin of the Breves Cu-Au-(W-Bi-Sn) deposit, Carajás, Brazil. *Mineralium Deposita*, **39**(1): 68-86.

Tassinari C.C.G. & Macambira M.J.B. 1999. Geochronological Provinces of the Amazonian Craton. *Episodes*, **22**: 174-182.

Tavares F.M., Trouw R.A.J., Silva C.M.G.da, Justo A.P., Oliveira J.K.M. 2018. The multistage tectonic evolution of the northeastern Carajás Province, Amazonian Craton, Brazil: Revealing complex structural patterns. *Journal of South American Earth Sciences*, **88**: 238-252.

Tokashiki C.C., Juliani C., Monteiro L.V.S., Misa C.M.E., Aguja M.A., Arrais L.B. 2015. Eventos vulcânicos de 1,97 Ga com mineralizações de ouro epitermais low- e intermediate-sulfidation na porção sul da Província Mineral do Tapajós (PA). *In: Gorayeb P.S.S. & Lima A.M.M. (eds.). Contribuições à geologia da Amazônia.* Belém, SBG-NO, p.119-138.

Trendall A.F., Basei M.A.S., Laeter J.R.de, Nelson D.R. 1998. SHRIMP zircon U-Pb constraints on the age of the Carajás formation, Grão Pará Group, Amazon Craton. *Journal of South American Earth Sciences*, **11**(3): 265-277.

Vale S.A. 2016. *Relatório do programa de exploração mineral no Bloco Sul de Carajás.* Relatório interno.

Vasquez M.L., Rosa Costa L.T., Silva C.M.G., Klein E.L. 2008. Compartimentação tectônica. *In: Vasquez M.L. & Rosa-Costa L.T. (eds.). Geologia e recursos minerais do Estado do Pará: Sistema de Informações Geográficas – SIG: Texto explicativo dos mapas geológico e tectônico e de recursos minerais do Estado do Pará. Escala 1:1.000.000. Belém, CPRM, p.39-112.*

Villas R.N.N., Lima L.F.O., Neves M.P., Sousa F.D.S., Lamarão C.N., Fanton J., Morais R., 2005. Relações entre deformação, alteração hidrotermal e mineralização no depósito Cu-Au do Sossego, Província Mineral de Carajás. *In: SBG, 1º Simpósio Brasileiro de Metalogenia, Gramado, Anais [...]. CD-ROM.*

Villas R.N.N. & Santos M. 2001. Gold deposits of the Carajás mineral province: deposit types and metallogenesis. *Mineralium Deposita*, **36**(3-4): 300-331.

Williams P.J., Barton M.D., Johnson D.A., Fontboté L., 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. *In: Hedenquist J. W., Thompson J.F.H., Goldfarb R.J., Richards J.P. One Hundredth Anniversary Volume. [S.l.], Society of Economic Geologists. <https://doi.org/10.5382/AV100.13>. Wirth K.R., Gibbs A.K., Olszewski Jr W.J. 1986. U-Pb ages of zircons from the Grão-Pará Group and Serra dos Carajás Granite, Pará, Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, **16**(2): 195-200.*

Xavier R.P., Monteiro L.V.S., Moreto C.P.N., Pestilho A.L.S., Melo G.H.C., Silva M.A.D., Aires B., Ribeiro C.F., Silva F.H. 2012. The Iron Oxide Copper-Gold systems of the Carajás Mineral Province. *In: Hedenquist J.W., Harris M., Camus F. (eds.). Geology and genesis of major copper deposits and districts of the world: a tribute to Richard H. Sillitoe. Littleton, SEG, p. 433-454.*

Xavier R.P., Moreto C., Melo G.H.C.de, Toledo P., Hunger R., Delinardo M., Faustinoni J., Lopes A., Monteiro L.V.S., Previato M., Jesus S.S.G.P., Huhn S.B. 2017. Geology and metallogeny of Neoproterozoic and Paleoproterozoic copper systems of the Carajás Domain, Amazonian Craton, Brazil. *In: 14º SGA Biennial Meeting, Mineral Resources to Discover. Quebec, Society for Geology Applied to Mineral Deposits, v.3, p. 899-902.*