



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GEOLOGIA ECONÔMICA E APLICADA

**Estudo de inclusões fluidas e isótopos de oxigênio e enxofre em veios de
quartzo-carbonato-sulfetos do depósito Carvoaria Velha, lineamento
aurífero Córrego do Sítio, Quadrilátero Ferrífero, MG, Brasil**

AUTOR: Yuri Ribeiro

ORIENTADORA: Profa. Dra. Rosaline Cristina Figueiredo e Silva (UFMG)

COORIENTADORA: Profa. Dra. Lydia Maria Lobato (UFMG)

Belo Horizonte

2013

Estudo de inclusões fluidas e isótopos de oxigênio e enxofre em veios de quartzo-carbonato-sulfetos do depósito Carvoaria Velha, lineamento aurífero Córrego do Sítio, Quadrilátero Ferrífero, MG, Brasil

Dissertação de Mestrado apresentada junto ao Colegiado de Pós-graduação em Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de mestre.

Área de Concentração: Geologia Econômica e Aplicada.

Orientadora: Profa. Dra. Rosaline Cristina Figueiredo e Silva

Coorientadora: Profa. Dra. Lydia Maria Lobato

Belo Horizonte

2013

Agradecimentos

O autor expressa sua gratidão às seguintes pessoas por contribuir com a realização deste trabalho:

À professora PhD. Rosaline Cristina Figueiredo e Silva, que iniciou aqui sua orientação de mestrado e mostrou ser uma grande e cativante orientadora. Obrigado pela oportunidade, apoio e orientação, que deram forma a esse trabalho e abriram portas incríveis tanto no Brasil quanto no exterior.

À coorientadora PhD. Lydia Lobato, pelo apoio e a incansável transmissão da enorme experiência sobre a geologia econômica do Quadrilátero ferrífero em aulas, cursos e “encontros auríferos”, que pude participar.

À AngloGold Ashanti Brasil Mineração Ltda, pelo apoio logístico, disponibilização de mapas e dados e treinamentos fornecidos. À equipe de geólogos técnicos, secretários e ajudantes por todo o suporte e em especial aos colegas Marcos Aurélio Sequetto e Tatiana Mascarenhas, pela colaboração na fase inicial de reconhecimento da área de trabalho, movimentação na mina e da etapa de amostragem.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pela concessão da Bolsa de estudos de Mestrado. E em parceria com a VALE consideram suporte financeiro para o laboratório através do edital MCT/CT-Mineral/VALE/CNPq 12/2009.

Aos professores PhD. Carlos Alberto Rosiere e PhD. Steffen Gerd Hagemann por acompanharem em visita à mina auxiliando na classificação dos veios. Ao Professor PhD. Steffen Gerd Hagemann e PhD. John Cliff pela parceria que permitiu a realização das medidas de isótopos estáveis feitas no *Centre for Microscopy, Characterisation and Analysis* na *Universit of Western Australia*.

Aos geólogos Luiz Cláudio Lima, Francisco Javier Rios, Kazuo Fuzikawa, James Alves Vieira pelas oportunas sugestões na fase de amostragem e análises de laboratório.

Ao geólogo Ulisses Cyrino Penha pela cooperação na fase inicial do projeto e pela revisão do texto.

A todos os funcionários do instituto de Geociências da UFMG e do Centro de Pesquisa Manoel Teixeira da Costa – CPMTC, que propiciaram um ambiente de qualidade para o desenvolvimento dos trabalhos.

A PhD. Maria Sylvia Dantas pela dedicação com que me orientou nas análises de espectroscopia Raman realizadas no Laboratório de Espectroscopia Raman – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – UFMG.

Ao PhD. Luis R. A. Garcia pela aquisição das análises e imagens dos minerais na microsonda – Laboratório de Microanálises do Consórcio Física/Geologia/Química-UFMG/CDTN-CNEN (LMA).

À FAPEMIG pelo suporte financeiro ao laboratório de metalogenia e inclusões fluidas do CPMTC, através do edital 01/2010 - DEMANDA UNIVERSAL.

À minha família pelo suporte que sempre foi essencial, em especial a meus pais que mesmo distantes acompanharam meu dia-dia, à Nath, pelo apoio, pelo carinho e pela compreensão nas horas de ausência.

Índice

Agradecimentos.....	i
Lista de Figura.....	i
Lista de Tabela.....	ii
Resumo.....	iii
Abstract.....	iv
Capítulo 1 – Introdução.....	1
1.1 Apresentação da dissertação.....	2
1.2 – Objetivo e justificativa.....	2
1.3 – Localização e vias de acesso.....	3
1.4 – Métodos de trabalho.....	4
Capítulo 2 – Amostragem.....	6
Capítulo 3 – Geologia Regional.....	12
3.1 – Estratigrafia.....	12
3.2 – Geologia Estrutural.....	15
3.3 – Metamorfismo.....	16
Capítulo 4 – Características do fluido hidrotermal mineralizador com base em estudos de inclusões fluidas e isótopos em veios do depósito Carvoaria Velha.....	17
1. Introduction.....	19
2. Materials and Analytical Methods.....	20
3. Regional Geology.....	22
3.1 Stratigraphy.....	22
3.2. Structural geology.....	25
4. Geology of Córrego do Sítio Lineament.....	26
4.1. Mineralization at the Córrego do Sítio lineament.....	28
4.2. Structural geology of Córrego do Sítio lineament.....	30
5. Córrego do Sítio Vein System and Mineral Chemistry.....	31
5.1. Veins Petrography.....	33
5.2. Mineral Chemistry.....	36
6. Fluid Inclusions.....	41
6.1. Fluid inclusions petrography.....	41
6.2. Microthermometry results.....	44
6.3. Quantitative estimation of fluid inclusions composition.....	50
7. Stable Isotopes.....	52
7.1. Oxygen stable isotopes.....	52
7.2. Sulphur stable isotopes.....	54
8. Discussions and Conclusions.....	54
8.1. Petrography of veins.....	55
8.2. Mineral chemistry of ore minerals.....	56
8.3. Fluid inclusions.....	57
8.4. Oxygen and sulphur isotopes.....	58
Capítulo 5 – Considerações finais.....	61
Referências Bibliográficas.....	67
ANEXO I.....	71
ANEXO II.....	99
ANEXO III.....	103

Lista de Figura

Fig 1.1 – Localização da Mina Córrego do Sítio modificado de Porto (2008).....	03
Figura 3.1 – Mapa geológico simplificado do QF com as associações de litofácies do SGRV..	13
Figure 1 – Simplified geological and structural map of the Quadrilátero Ferrífero. The main lithofacies associations of the Nova Lima Group, and some of the gold deposits are shown.....	24
Figure 2 – Geological map of the northeastern portion of QF, showing the location of the Córrego do Sítio mining area (dashed circle), and indication of four deposits, including the Carvoaria Velha deposit (number 4). Modified after CPRM (1996), and Lima (2012).	29
Figure 3 – Schematic logging of sampled FCS 296 drill core showing gold grades (in ppm), and depths from where veins-veinlets were collected. Source of gold grades data: AGABM.	34
Figure 4 – Schematic diagram illustrating the different vein-breccia types at the deposit. Also shown are photographs of examples from core and hand samples.....	35
Figure 5 – Photomicrographs: A) Types of quartz in V1 vein type; B) Types of carbonate in V1 vein type; C) Chalcopyrite inclusion with ullmannite edge in berthierite crystals; D) Arsenopyrite overgrowing from pyrrhotite. Image from electron microprobe showing: E) Berthierite overgrowing pyrite; F) Arsenopyrite overgrowing pyrrhotite, and inclusions of berthierite in carbonate; G) Cobaltite overgrowing chalcopyrite; H) Detail of image showing pyrrhotite being replaced by tetrahedrite and ullmannite.....	37
Figure 6 – Image showing variable composition and EDS spectra of: A) composition of chalcopyrite; B) and C) nickel and cobalt rich border, and Cu and Fe depletion.	41
Figure 7 – Backscattered scanning image of electron microprobe, showing two textural types of carbonate, both ankerite in composition.	42
Figure 8 – A) Backscattered scanning image of arsenopyrite crystal showing compositional zoning. B) Diagram of Kretschmar and Scott (1976) showing arsenic % atomic concentration versus temperature applied for arsenopyrite geothermometer.	43
Figure 9 – Photomicrographs: A) Smoky and recrystallized quartz with random orientation of pseudosecondary FIs; B) Secondary trails of fluid inclusions cross-cutting quartz boundary; C) Pseudosecondary type 1a restricted to smoky quartz; D) Pseudosecondary liquid-rich type 1b inclusions restricted to recrystallized quartz; E) Detail showing secondary type 1b inclusions in QtzII; F) Pseudosecondary type 2 inclusions trapped in quartz from V4 vein type.....	45
Figure 10 – Histograms showing microthermometric characteristics of fluid inclusions trapped in quartz veins from Carvoaria Velha deposit.	48
Figure 11 – Diagram showing salinity versus decrepitation temperature (Td) for inclusions: A) type 1a; B) type 1b; and salinity x temperature of total homogenization $Th_{tot L-V}$ of C) type 2 inclusions.	53
Figure 12 – A) Diagram showing oxygen isotope values ($\delta^{18}O$ and $\delta^{18}O_{fluid}$) of quartz crystals from V1, V2, V3 and V4 vein types. B) Diagram showing sulphur isotopes values ($\delta^{33}S$ and $\delta^{34}S$) of sulphides. C) Plot of $\delta^{34}S$ vs. $\Delta^{33}S$ data for the studied samples..	55
Figure 13 – Schematic hydrothermal fluid model for the gold mineralization at the Carvoaria Velha deposit. Metamorphic fluid (red arrows) and meteoric waters (blue arrows). Modified from Robert (1990) in Dubé and Gosselin (2007).....	59
Figure 5.1 – Desenho esquemático mostrando o modelo hidrotermal para o depósito, modificado de Robert (1990) in Dubé e Gosselin (2007). Sugere-se fluido produzido pela devolatilização metamórfica das sequências metassedimentares e máfica/ultramáfica, com assimilação de Sb, Ni e Co, aprisionado em veios de cisalhamento (segundo S_n) e extensionais (segundo S_{n+1}).....	65

Lista de Tabela

Tabela 2.1 – Lista de amostras, com respectivas profundidades, selecionadas no testemunho de sondagem 926 do depósito Carvoaria Velha.	07
Tabela 3.1 – Síntese da evolução tectono-estrutural do Quadrilátero Ferrífero segundo diversos autores.	16
Table 1 – Summary of tectonic-structural evolution of Quadrilátero Ferrífero according to the following authors.	27
Table 2 – Summary of lithological units in the Córrego do Sítio lineament based on Lima (2012).	30
Table 3 – Paragenetic sequence from distal to proximal/mineralization hydrothermal alteration of metasedimentary wallrocks (after Porto, 2008).	31
Table 4 – Main structural events and related features at the Córrego do Sítio lineament (Lima, 2012).	33
Table 5 – Synthesis of vein characteristics in the Carvoaria Velha deposit.....	38
Table 6 – Composition data obtained from electron microprobe analysis of samples from the Carvoaria Velha deposit. Values in % weight of elements. Abbreviations: Bert= berthierite, Py= pyrite, Po=pyrrhotite, Cpy=chalcopyrite, Ull=ullmannite, Tet=tetrahedrite, Ga=galena, Co=cobaltite and Arg=argentopetlandite.	39
Table 7 – Composition data of arsenopyrite crystals from mineralized samples obtained from electron microprobe analysis.	40
Table 8 – Main microscopic characteristics, form of occurrence and average composition of analysed carbonates using electronic microprobe.	42
Table 9 – Main phase transitions observed for each type of fluid inclusion and their corresponding information.	47
Table 10 – Microthermometry data for V1, V2 and V4 veins of the Carvoaria Velha deposit. Mean and standard deviation (1σ) values are shown for $N > 3$ in the second line of each sample/area.	49
Table 11 – Microthermometric data of aqueous-carbonic inclusions (types 1a, 1b FIAs) and aqueous inclusions (type 2).	51
Table 12 - Oxygen isotope composition of quartz from different vein types at Carvoaria Velha deposit, obtained using ionprobe SIMS 1280.	54
Table 13 – Composition of sulphur isotopes of chalcopyrite, pyrite and pyrrhotite from Carvoria deposit veins, obtained using ionprobe SIMS 1280.	56
Table 5.1 – Dados de inclusões fluidas em rochas metassedimentares arqueanas do Quadrilátero Ferrífero. Modificado de Lobato <i>et al.</i> (2001).....	66

Resumo

O lineamento aurífero Córrego do Sítio corresponde a uma zona de cisalhamento dúctil com um *trend* NE-SW controlando quatorze depósitos de ouro, ao longo do qual se inclui o depósito Carvoaria Velha. A mineralização de ouro se hospeda em rochas metassedimentares arqueanas do *greenstone belt* Rio das Velhas, sendo as mesmas filitos e xistos finos alterados hidrotermalmente a quartzo, carbonato e sericita, além de sulfetos e sulfossais. O estilo de mineralização principal ocorre em veios de quartzo-carbonato-sulfetos (\pm sulfossais). Os tipos de veios encontrados no depósito Carvoaria Velha são classificados como: Veios V1 – quartzo-ankerita-sulfetos-berthierita-ouro – paralelos à principal foliação S_n e localmente mineralizados em ouro. Veios V2 – quartzo-ankerita-pirita – desenvolvidos no plano de clivagem de crenulação S_{n+1} , extensionais e não mineralizados em ouro. Veios V3 – quartzo-ankerita – que preenchem fraturas S_{n+3} , geralmente sem sulfetos e sulfossais. Veios V4 – quartzo-calcita – restritos aos diques e *sills* metamáficos, sendo extensionais e sem orientação preferencial. Os minerais-minério mais comuns em todos os veios são arsenopirita, pirita, berthierita e pirrotita. Análises por microsonda eletrônica revelam a presença de fases metálicas ricas em As, Sb e Co (boulangerita, tetraedrita, galena, cobalita e ullmanita), que sobrecrescem aos minerais-minério. Dados de inclusões fluidas caracterizam fluido mineralizador com composição $H_2O-CO_2\pm CH_4-NaCl$, com traços de N_2 , podendo conter KCl , $MgCl_2$ e $FeCl_2$. A presença de CH_4 nas inclusões dos veios V1 e V2 refletem a interação de fluido com as rochas encaixantes metapelíticas ricas em matéria carbonosa das unidades Córrego do Sítio e Santa Quitéria.

Este fluido teria pelo menos dois estágios de evolução: i) cedo-hidrotermal, aprisionado em quartzo fumê, com salinidade moderada (~ 8.5 eq. wt% NaCl) e temperatura mínima de aprisionamento $330\pm 17^\circ C$; e ii) tardi-hidrotermal, representado por fluido aprisionado em quartzo recristalizado, menos salino (~ 4.6 eq. wt% NaCl), de temperatura mínima de $365\pm 33^\circ C$. A pressão é variável entre 0,5 a 5,5 kbars. O fluido hidrotermal tem razões isotópicas de $\delta^{18}O_{fluido}$, dados $\Delta^{33}S$ e $\delta^{34}S$ que indicam origem metamórfica característica de depósitos auríferos orogênicos arqueanos, e que sugerem interação com rochas metassedimentares, resultando na assimilação de enxofre crustal. A interação fluido-rocha propiciou ainda a adição de CH_4 , causando decréscimo na fO_2 ; essa a variação da fO_2 desestabiliza complexos de ouro-enxofre liberando S^{-2} para a formação sulfetos e sulfossais de Fe (Apy, Py, Po e Bert etc.), resultando na precipitação de ouro.

Abstract

The Córrego do Sítio lineament is defined as a 16-km long, NE-SW-trending ductile shear zone, which controls fourteen gold deposits, one of them being the Carvoaria Velha deposit. The mineralization is hosted in Archean rocks of Rio das Velhas greenstone belt, represented by carbonaceous phyllites and schists that exhibit alteration to quartz, carbonate and sericite, besides sulphides and sulphosalts. The main gold mineralization styles at the Córrego do Sítio lineament are quartz-carbonate-sulphide±sulphosalt veins of varied distribution. The veins are classified as: V1 veins – quartz-ankerite-pyrite-berthierite-gold – parallel to the main regional foliation S_n , and usually mineralized in gold; V2 veins – quartz-ankerite-pyrite – developed at the crenulation cleavage S_{n+1} , extensional and rarely gold mineralized; V3 veins – quartz-ankerite – filling S_{n+3} fractures, usually free of sulphides and sulphosalts; V4 veins – quartz-calcite – of restricted occurrence in metamafic dykes and sills; they crosscut the metasedimentary sequence, are extensional and display no preferential orientation. The most common ore minerals in all vein types are arsenopyrite, pyrite, berthierite and pyrrhotite. Microprobe analyses reveal the presence of metallic phases rich in Sb, Pb and Co, such as stibnite, ullmanite, tetrahedrite, galena, cobaltite, which commonly overgrow the sulphides. Fluid inclusion data have identified a $H_2O-CO_2\pm CH_4-NaCl$ mineralizing fluid that may contain KCl, $MgCl_2$ e $FeCl_2$. The presence of CH_4 in fluid inclusions of the V1 and V2 veins reflect interaction of the fluid with the Córrego do Sítio and Santa Quitéria carbon-bearing metapelitic host units.

Based on the microthermometric data, the hydrothermal fluid is interpreted to have evolved in at least two stages: i) an early fluid stage, trapped in smoky quartz, of moderate ~8.5 eq. wt% NaCl salinity, and minimal trapping temperature of $330\pm 17^\circ C$; and ii) a late-stage fluid trapped in recrystallized quartz with lower ~4.6 eq. wt% NaCl salinity, and a minimal trapping temperature of $365\pm 33^\circ C$. The pressure is variable from 0.5 to 5.5 kbars. Isotopic values of $\delta^{18}O_{fluid}$, $\Delta^{33}S$ e $\delta^{34}S$ suggest that indeed the hydrothermal fluid responsible for the gold mineralization at the Carvoaria Velha deposit must have had a metamorphic origin, and interacted with metasedimentary sequences during its ascending path. The addition of CH_4 during fluid-rock carbon interaction may have caused some decrease in fO_2 of the fluid which, as a consequence, destabilized gold-bearing sulfur complexes, liberating S^{-2} for the formation of Fe sulphides and sulphosalts (Apy, Py, Po and Bert etc.), and outcome gold deposition.

Capítulo 1 – Introdução

O Quadrilátero Ferrífero (QF) é uma das mais importantes províncias metalogenéticas do mundo, contendo importantes depósitos de ferro e ouro do tipo *world-class*. Está localizado na borda sul de um dos núcleos cratônicos brasileiros, o Cráton do São Francisco. O *Greenstone Belt* Rio das Velhas (GBRV) é a unidade basal das supracrustais que compõe o QF, e hospeda seus principais depósitos auríferos. A mineralização hospeda-se principalmente em formações ferríferas bandadas, vulcânicas máficas e veios de quartzo associados ao Grupo Nova Lima, porção inferior do *greenstone belt* Rio das Velhas.

Em função de sua importância científica, econômica e história o QF tem sido alvo de grandes investimentos exploratórios, mapeamentos governamentais e de diversos estudos acadêmicos, como dissertações de mestrado, teses de doutorados, trabalhos de graduação e mapas geológicos; na busca do entendimento dos padrões estruturais e estilos de mineralização aurífera (e. g. Lobato *et al.* 1998, Ribeiro-Rodrigues e Lobato 1999, Lobato *et al.* 2001a, b, 2007, Pereira *et al.* 2007, Baltazar e Zucchetti 2007, Junqueira *et al.* 2007, Ribeiro-Rodrigues *et al.* 2007, Vial *et al.* 2007). O avanço do conhecimento dos depósitos orogênicos e a busca de modelos quantitativos exigem novos parâmetros, atualmente inexistentes ou insuficientes, tais como dados de isótopos estáveis (C, S, O), isótopos radiogênicos, incluindo aqueles com objetivo geocronológico, estudos de inclusões fluidas e determinações de elementos químicos tanto em grãos de minerais-minério como em inclusões fluidas.

O lineamento aurífero Córrego do Sítio localiza-se na porção nordeste do QF, no distrito de Brumal, município de Santa Bárbara-MG. Essa faixa corresponde a um lineamento aurífero de cerca de 16 km de comprimento, que é composto pelo alinhamento de quatorze escavações mineiras e duas anomalias geoquímicas de ouro, ao longo de um trend NE-SW (Lima 2012). Destacam-se nesta região do QF grandes minas de minério de ferro — como Brucutu e Gongo Soco (Vale 2012) — e as minas de ouro de Pilar (Jaguar 2012) e da produção histórica de São Bento (Pereira *et al.* 2007) (Fig. 1). Em 1981, na busca da continuidade da mineralização da Mina São Bento, esse lineamento foi descoberto, através de mapeamento geológico e análises químicas de solos, de sedimentos de corrente e de rochas, pela equipe de exploração da UNIGEO Ltda. (Porto, 2008). Os trabalhos de lavra dos corpos de minério transcorreram no período entre 1990 a 1998, sendo retomados em 2002, pela AngloGold Ashanti Brasil Mineração Ltda. (AGABM, 2011) e persistindo até os dias de hoje, com uma produção acumulada próxima de 11 toneladas de ouro (Lima 2012). O minério tem teor médio de 4,27 g/t, em uma reserva que alcança 3,7 milhões de onças, dentre as quais, 2,1 milhões de onças de recursos lavráveis (minérios sulfetado e oxidado) (AGABM 2011).

1.1 Apresentação da dissertação

Esta dissertação de mestrado será apresentada na forma de um artigo, apresentado no Capítulo 4, que expõe os principais resultados obtidos através dos estudos de inclusões fluidas e de isótopos estáveis de oxigênio e enxofre em veios mineralizados e estéreis do depósito Carvoaria Velha, integrante do lineamento aurífero de Córrego do Sítio. São também apresentados os métodos de trabalho no Capítulo 1, amostragem no Capítulo 2, Geologia Regional no Capítulo 3, e discussões e conclusões no Capítulo 5.

A dissertação faz parte do programa de Pós-graduação em Geologia Econômica e Aplicada do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, e tem orientação da Profa. Dra. Rosaline Cristina Figueiredo e Silva, e coorientação da Profa. Dra. Lydia Maria Lobato. A pesquisa insere-se em dois projetos de pesquisa intitulados:

- (i) “Características e Influência da Alteração Hidrotermal nas Mineralizações Auríferas e Ferríferas na Província Mineral do Quadrilátero Ferrífero, do Arqueano ao Paleo-proterozóico: Implicações para Exploração Geológica”, CNPq, edital MCT/CT-Mineral/VALE/CNPq 12/2009;
- (ii) "Características e Influência de Fluidos Hidrotermais nas Mineralizações Auríferas Arqueanas na Província Mineral do Quadrilátero Ferrífero: Implicações para Exploração Geológica", FAPEMIG, edital 01/2010 - DEMANDA UNIVERSAL.

1.2 – Objetivo e justificativa

O depósito Carvoaria Velha, um dos depósitos do lineamento Córrego do Sítio, será o alvo desse trabalho. Este trabalho propõe desenvolver estudos petrográficos dos veios de quartzo-carbonato-sulfetos±sulfossais, de química mineral, de inclusões fluidas, e de isótopos de oxigênio e enxofre para entendimento e caracterização do fluido envolvido na mineralização aurífera. Com tais estudos, pretende-se, também, contribuir para o conhecimento geológico do QF, produzindo novos dados sobre um de seus depósitos. Os objetivos específicos do trabalho são:

- i. Classificar as diversas gerações de veios observados nos corpos de minério e rochas encaixantes;
- ii. Analisar a composição dos fluidos hidrotermais em cristais de quartzo
- iii. Definir condições físico-químicas (P-T-composição) e prováveis fontes de fluidos (metamórficos/magmáticos/águas meteóricas?) associados aos eventos estruturais e hidrotermais.

1.3 – Localização e vias de acesso

O lineamento aurífero Córrego do Sítio é situada na porção nordeste do QF, a 120 km de Belo Horizonte, capital do estado, no distrito de Brumal, município de Santa Bárbara (Fig. 1.1). O acesso à área se faz por via terrestre percorrendo 70 km pela BR-381/262 no sentido Vitória, a partir de Belo Horizonte, até o trevo de Barão de Cocais. Saindo da BR pela direita neste trevo pela MG-436 seguir 30 km, passar pelo município de Barão de Cocais, até o trevo de Brumal, onde se vira à direita sentido a Serra do Caraça até uma ponte estreita, que fica a 3 km deste último trevo. A partir daí, segue-se à direita por estrada não pavimentada por 10 km até a entrada da Mina Córrego do Sítio.

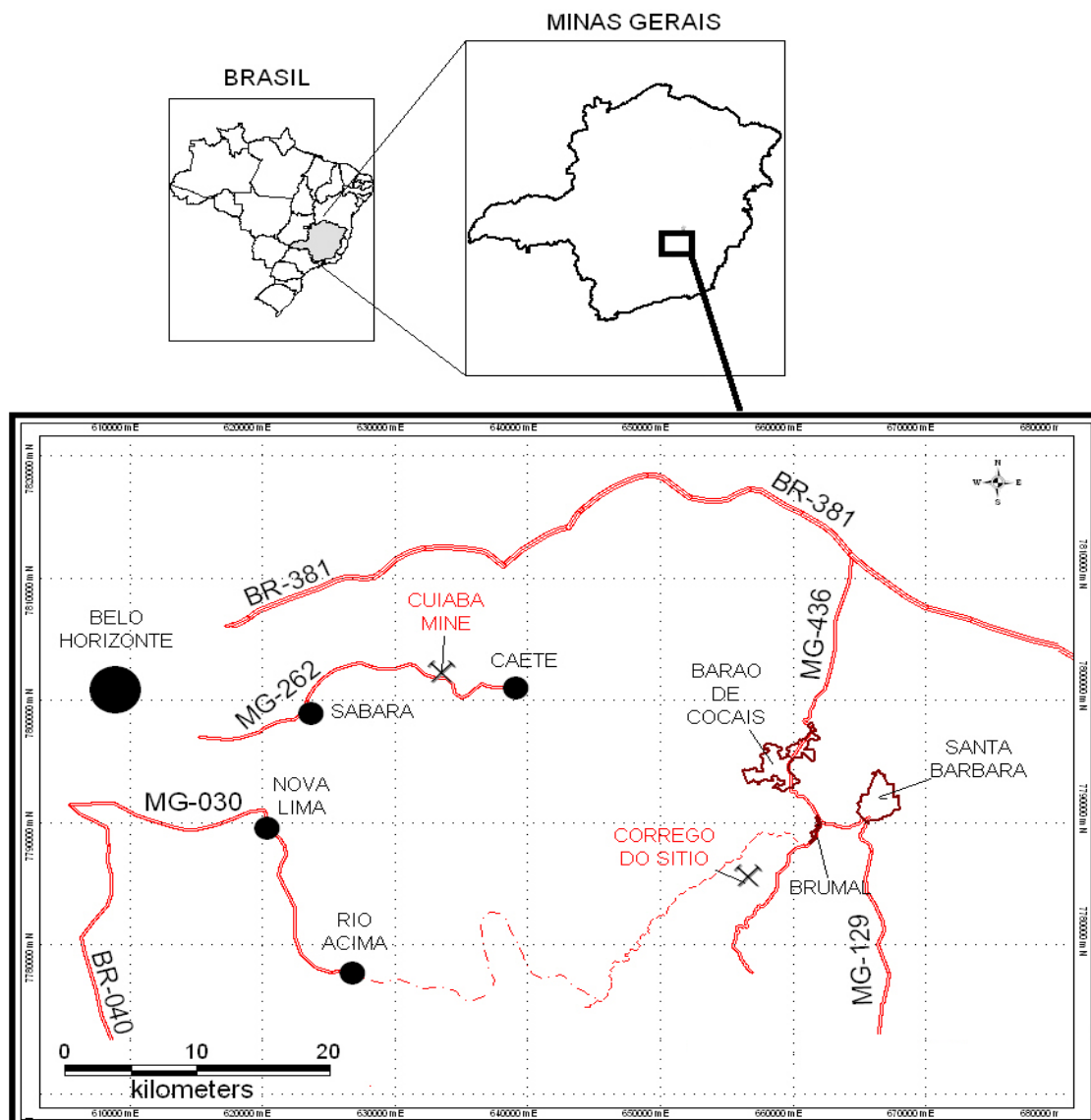


Figura 1.1 – Localização da Mina Córrego do Sítio modificado de Porto (2008).

1.4 – Métodos de trabalho

A metodologia para caracterização do depósito de ouro Carvoaria Velha inclui as seguintes ferramentas:

- 1) Amostragem dos veios de quartzo-carbonato no testemunho de sondagem número FCS 926. A seleção das amostras ocorreu de forma a representar todos os tipos de veios, englobando porções mineralizadas ou não dos testemunhos de sondagem rotativa diamantada;
- 2) Estudos petrográficos macro e microscópicos são focados nos veios e vênulas de quartzo-carbonato para a definição das características petrográficas/mineralógicas dos minérios;
- 3) Mapeamento de detalhe e análises de microsonda eletrônica foram realizados em cristais de carbonato, sulfetos e sulfossais, em microsonda eletrônica JEOL, modelo JXA 8900RL, no Laboratório de Microscopia Eletrônica e Microanálises (LMA), do consórcio Física, Geologia, Química-UFMG/CDTN-CNEN, para análise da composição química quantitativa de minerais que não foram identificados por microscopia ótica convencional (*e.g.* classificação dos tipos de carbonatos e sulfossais). O aparelho é equipado com quatro espectrômetros dispersivos de comprimento de onda, e um espectrômetro de energia dispersiva Noran. As análises são adquiridas usando-se o software de análise JEOL ou a ponta de prova para o sistema operacional Windows, e a correção do raio X é feita usando o software de correção CITZAF, condições normais de funcionamento são de 15 KV potencial de aceleração e 25 nA sonda atual.
- 4) Mapeamento petrográfico de detalhe das inclusões fluidas (IFs) em quartzo de veios/brechas mineralizados a ouro, permitindo caracterizar os tipos, os tamanhos, as morfologias e a definição de FIAs (*fluid inclusion assemblages*). Foi utilizado microscópio petrográfico Leica, com oculares de 10x e objetivas de 2.5x, 5x, 10x, 20x, 50x e 63x. Estudos microtermométricos de resfriamento e aquecimento de IFs foram conduzidos utilizando-se uma platina de resfriamento (até -180°C) e aquecimento (até ~500°C), automática Linkam THMSG600 com um controlador de temperaturas TMS 93. A platina foi calibrada com inclusões sintéticas de CO₂ e H₂O fornecidas pela Linkam. A técnica cíclica (Goldstein e Reynolds, 1994) foi utilizada para obter melhor precisão nas medidas das temperaturas de transição das fases carbônicas. A precisão das medidas microtermométricas é de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ para resfriamento e de $\pm 1^{\circ}\text{C}$ para temperaturas entre de 200-500°C. Salinidades aparentes são reportadas em peso percentual equivalente de NaCl. Os cálculos de salinidade e densidade foram realizados com uso do programa MacFlinCor (Brown e Hagemann, 1995);



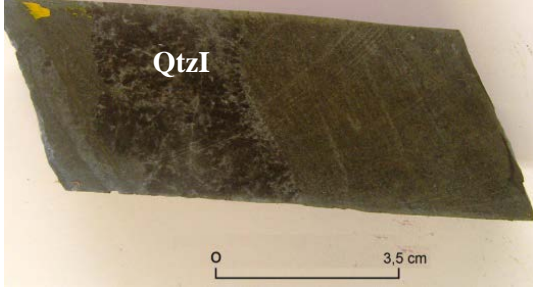
- 5) Espectroscopia Raman para avaliar os gases e fluido contido nas IFs. Essa técnica permite uma correlação entre a composição e o comportamento de fase, durante os estudos de resfriamento das Inclusões fluidas. Espectrômetro Raman LABRAM-HR 800, Horiba/Jobin Yvon, laser HeNe (632,8nm), 6 mW de potência incide na amostra por um microscópio Olympus BX-41 (objetivas 100x). A luz espalhada recolhida (pelo mesmo microscópio) após passar por um filtro *notch* (que rejeita a linha do laser) e por uma rede de difração (600g/mm) é detectada por uma CCD (*charge couple device*) resfriada a nitrogênio líquido. O tempo de aquisição variou entre 10 e 30s e para aumentar a razão sinal/ruído o número de aquisições foi de 10 vezes. As medições foram realizadas no Laboratório de Espectroscopia Raman – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – UFMG.
- 6) Estudos isotópicos *in situ* de oxigênio foram realizados em quartzo, e de enxofre em cristais de calcopirita, pirita e pirrotita. As amostras são cortadas em pequenos fragmentos de rocha e montadas junto a um padrão em um disco de *epoxy* de 25.4 mm. Para isótopos de oxigênio utilizou-se o padrão UWQ-1 ($12.33 \pm 0.01\text{‰}$ VSMOW, Kelly *et al.*, 2007), e para isótopos de enxofre usou-se o padrão do próprio laboratório (SON-1 $\delta^{34}\text{S} = 0.78 \pm 0.06\text{‰}$ VCDT, 1 SE, n=3 and $\delta^{34}\text{S} = 1.45 \pm 0.08$ VCDT, 1 SE n=3). Razões de isótopos de oxigênio ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) foram medidas com uma microsonda iônica Cameca IMS 1280 multi-collector do Centre for Microscopy, Characterisation and Analysis (CMCA), University of Western Australia. Um laser estático de ~ 3 nA Cs^+ com uma energia de impacto de 20 keV e um diâmetro de 10-15 μm é focado sobre a superfície da amostra. Parâmetros do instrumento incluem: aumento de x130 entre amostra e campo de abertura, contraste de abertura de 400 μm , campo de abertura 4000 μm , 110 μm *entrance slit*, 500 μm *exit slits*, e 40 eV *band pass* para a energia de *slit* com um deslocamento de 5 eV para a banda de maior energia. Íons secundários O⁻ são acelerados a 10 keV e analisados com poder de resolução de massa de aproximadamente 2200 (10% altura do pico máximo) usando um detector *dual Faraday cup*. As análises consistem de quatro ciclos de 20 segundos, com um precisão média de $\sim 0.1\text{‰}$ (1 SE). Para as análises usa-se um laser de Cs^+ focado de ~ 1.5 nA, *presputtered* a 20 $\mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ por 30 s e um *slit* de entrada de 80 μm . Precisão interna para análise de isótopos de S tem média de 0.06 ‰ para $\delta^{33}\text{S}$, e 0.03 ‰ para $\delta^{34}\text{S}$. Precisão externa apresenta média de 0.08‰ para $\delta^{33}\text{S}$, 0.07‰ for $\delta^{34}\text{S}$, e 0.08‰ para $\Delta^{33}\text{S}$. Nós definimos $\Delta^{33}\text{S}$ como $\Delta^{33}\text{S} = \delta^{33}\text{S} - 1000 \times [(1 + \delta^{34}\text{S}/1000)^{0.515} - 1]$ (Faquhar, 2002). A avaliação dos dados medidos é baseada no modelo de correção de Kita *et al.* (2009) — *Guide to the expression of uncertainty in measurement* (GUM).

Capítulo 2 – Amostragem

Foram realizadas quatro etapas de campo, somando doze dias, em depósitos do lineamento aurífero Córrego do Sítio para reconhecimento, descrição macroscópica e amostragem. A primeira delas ocorreu em janeiro de 2011, objetivando o reconhecimento da geologia local e regional do lineamento, com visitas à mina subterrânea e a afloramentos representativos das principais unidades regionais. A segunda e a terceira etapas de campo foram realizadas em março de 2011, para seleção e descrição do furo de sondagem FCS926, objetivando a classificação dos diferentes tipos de veios-brechas. Ainda foi realizada amostragem objetivando confecção de lâminas delgadas para descrição microscópica e posterior seleção das seções para a realização de análises de microsonda eletrônica, inclusões fluidas e isótopos de oxigênio e enxofre. A quarta etapa foi realizada em setembro para detalhamento das relações entre os veios, o minério e a rocha encaixante e discussão com as orientadoras e geólogos da mina.

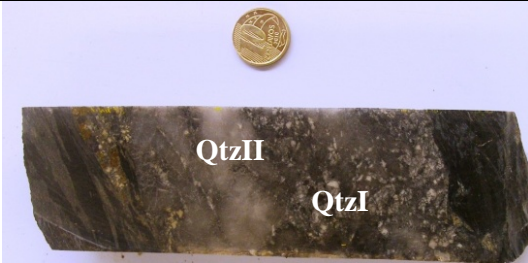


A Tabela 2.1 apresenta a relação de amostras investigadas, oriundas do testemunho de sondagem FCS926 do depósito Carvoaria Velha, além das técnicas analíticas usadas. O furo FCS926 foi selecionado para este fim devido à variação litológica, e presença dos diferentes tipos de veio que são objeto de estudo da dissertação. As fichas de descrições petrográficas das lâminas delgadas polidas estão no anexo I.

Tabela 2.1 – Lista de amostras, com respectivas profundidades, selecionadas no testemunho de sondagem 926 do depósito Carvoaria Velha.

Encaixante	Testemunho e profundidade	Foto amostra de testemunho	Tipo	Mineralogia	Química mineral	Inclusões Fluidas	Ramam	Isótopos de O	Isótopos de S
Metagrauvaca	FCS926-84,40m		V1	Qtz, Ank, Ser, Clo, Py, Cpy, Ga, Po, Bou	X	-	-	X	X
Metagrauvaca	FCS926-95,00m		V1	-	-	-	-	X	X
Metagrauvaca	FCS926-113,85m		V1	Qtz, Ank, Ser, clo, Py, Co, Po, Sph, Ull, Tet e Cpy	X	-	-	-	-




Lista de abreviações: DB1 – diques e *sills* metamáficos. **Veios:** V1 – quartzo+ankerita+sulfetos±sulfossais, V2 – quartzo+ankerita+sulfetos, V3 – quartzo+ankerita±sulfetos e V4 – veios quartzo+calcita. **Minerais:** Apy=arsenopirita, Bert=berthierita, Bou=Boulangerita, Clo=clorita, Cpy= calcopirita, Co=cobaltita, Ga=galena, Mg=magnetita, Sph=esfalerita, Ser= sericita, Py=pirita, Po=pirrotita, Qtz=quartzo, Sph=sphalerite, Tet=tetraedrita e Ull=ullmanita. QtzI = quartzo fumê.

(Cont. tabela 2.1)

Filito carbonoso	FCS926-130,80m		V1	Qtz, Ank, Ser, Py, Cpy, Apy, Po e Argentopentlandita	X	X	X	X	X
Filito carbonoso	FCS926-139,50m		V1	Qtz, Ank, Py, Apy	-	-	-	X	X
Filito carbonoso	FCS926-146,52m		V1	Qzt, Ank	-	-	-	-	-


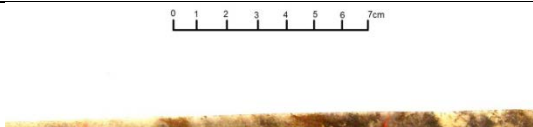
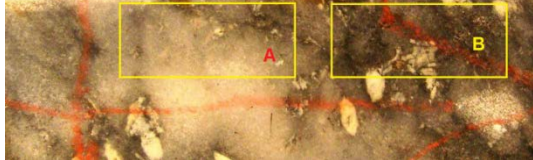


Lista de abreviações: DB1 – diques e *sills* metamáficos. **Veios:** V1 – quartzo+ankerita+sulfetos±sulfossais, V2 – quartzo+ankerita+sulfetos, V3 – quartzo+ankerita±sulfetos e V4 – veios quartzo+calcita. **Minerais:** Apy=arsenopirita, Bert=berthierita, Clo=clorita, Cpy= calcopirita, Co=cobaltita, Ga=galena, Mg=magnetita, Sph=esfalerita, Ser= sericita, Py=pirita, Po=pirrotita, Qtz=quartzo, Sph=sphalerite, Tet=tetraedrita e Ull=ullmanita. QtzI=quartzo fumê e QtzII=quartzo branco recristalizado.

(Cont. tabela 2.1)

Metamáfica DB1	FCS926- 150,00m		V4	Qtz, Ca, Py e Clo	-	-	-	X	X
Metamáfica DB1	FCS926- 160,00m		V4	Qtz, Ca, Clo, Mag e Py	X	X	X	-	-
Metagrauvaca na zona de contato com DB1	FCS926- 169,63m		V3	Qtz, Ank, Py e Cpy	X	-	-	X	-

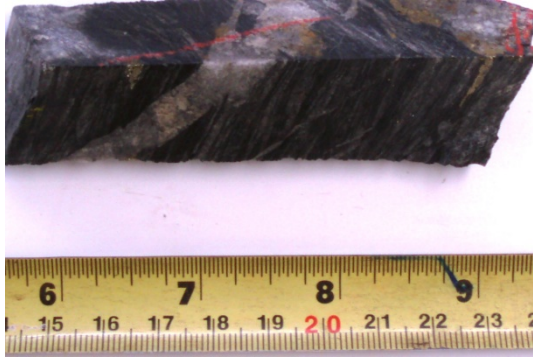


Lista de abreviações: DB1 – diques e *sills* metamáficos. **Veios:** V1 – quartzo+ankerita+sulfetos±sulfossais, V2 – quartzo+ankerita+sulfetos, V3 – quartzo+ankerita±sulfetos e V4 – veios quartzo+calcita. **Minerais:** Apy=arsenopirita, Bert=berthierita, Clo=clorita, Cpy= calcopirita, Co=cobaltita, Ga=galena, Mg=magnetita, Sph=esfalerita, Ser= sericita, Py=pirita, Po=pirrotita, Qtz=quartzo, Sph=sphalerite, Tet=tetraedrita e Ull=ullmanita.

(Cont. tabela 2.1)

Filito carbonoso	FCS926-176,10m		V2	Qtz, Ank, Py	-	-	-	-	-
Veio sulfetado espesso	FCS926-192,20A m		V1	Qtz, Carb, Ser, Bert, Py, Po e Cpy	-	-	-	-	-
Veio sulfetado espesso	FCS926-192,20B m		V1	Qtz, Ank, Ser, Bert, Py, Cpy	X	X	X	X	X
Filito sulfetado	FCS926-193,70m		V1	Qtz, Ank, Bert e Py	-	-	-	X	X
Veio sulfetado espesso	FCS926-195,70m		V1	Qtz, Ank, Ser, Apy, Bert, Cpy, Py, Ull	X	X	X	X	X

Lista de abreviações: DB1 – diques e *sills* metamáficos. **Veios:** V1 – quartzo+ankerita+sulfetos±sulfossais, V2 – quartzo+ankerita+sulfetos, V3 – quartzo+ankerita±sulfetos e V4 – veios quartzo+calcita. **Minerais:** Apy=arsenopirita, Bert=berthierita, Clo=clorita, Cpy= calcopirita, Co=cobaltita, Ga=galena, Mg=magnetita, Sph=esfalerita, Ser= sericita, Py=pirita, Po=pirrotita, Qtz=quartzo, Sph=sphalerite, Tet=tetraedrita e Ull=ullmanita.

(Cont. tabela 2.1)

Filito carbonoso	FCS926-202,50m		V2	Qtz, Ank, Bert, Py, Cpy	X	X	X	X	X
Veio sulfetado espesso	FCS926-213,85m		V1	Qtz, Ank, Ser, Clo, Py, Bert, Apy, Po, Stb	X	-	-	-	-
Sericita-quartzo Xisto	FCS926-238,60m		V1	Qtz, Ank, Ser, Py, Bert, Apy	-	-	-	-	-

Lista de abreviações: DB1 – diques e *sills* metamáficos. **Veios:** V1 – quartzo+ankerita+sulfetos±sulfossais, V2 – quartzo+ankerita+sulfetos, V3 – quartzo+ankerita±sulfetos e V4 – veios quartzo+calcita. **Minerais:** Apy=arsenopirita, Bert=berthierita, Clo=clorita, Cpy= calcopirita, Co=cobaltita, Ga=galena, Mg=magnetita, Sph=esfalerita, Ser= sericita, Py=pirita, Po=pirrotita, Qtz=quartzo, Sph=sphalerite, Tet=tetraedrita e Ull=ullmanita.

Capítulo 3 – Geologia Regional

O QF está situado na porção sul de um dos núcleos cratônicos pré-cambrianos brasileiros, o denominado Cráton São Francisco (Almeida, 1977; Inda *et al.*, 1984; Teixeira e Figueiredo, 1994). A geologia do QF é comumente dividida em três conjuntos de rochas principais as quais podem ser definidas pela ocorrência de: 1) Complexos granito-gnáissicos, que correspondem ao embasamento cristalino; 2) Greenstone belt arqueano e intrusões paleoproterozóicas, pertencente ao Supergrupo Rio das Velhas e faixas correlatas; 3) Unidades metassedimentares proterozóicas, representadas pelo Supergrupo Minas, Grupo Itacolomi e o Supergrupo Espinhaço (Fig.1).

3.1 – Estratigrafia

Os complexos granito-gnáissicos têm composição trondhjemítica-tonalítica-granodiorítica (TTG), são constituídos por rochas gnáissicas polideformadas e, subordinadamente, por granitos, anfibolitos e intrusões máficas a ultramáficas (Herz, 1970; Ladeira *et al.*, 1983; Teixeira *et al.*, 1996). São representados pelos complexos Bonfim, Caeté, Belo Horizonte, Bação e Santa Bárbara (Fig.1) (Herz, 1970). Sobre esses complexos, podem ocorrer intrusões de granitos de variada composição – neoarqueanos e paleoproterozóicos, foliados a não foliados – variando em dimensão de veios a grandes corpos (Noce *et al.*, 2007). Análises geocronológicas em amostras de rochas de alguns desses complexos revelaram que a formação destes ocorreu em intervalos entre 3380 a 2900 Ma (Teixeira *et al.*, 1996). A migmatização deu-se entre 2860 ± 14 Ma e 2772 ± 6 Ma, e o metamorfismo transamazônico ocorreu entre 2041 ± 5 Ma (Noce *et al.*, 1998, idades U-Pb em zircão, in Baltazar e Zucchetti, 2007).

O *greenstone belt* arqueano Rio das Velhas (GBRV) corresponde a uma sequência de rochas metavulcanossedimentares de idade arqueana (Dorr *et al.*, 1957, Schorscher, 1976; Almeida, 1977). Divide-se em dois grupos: Nova Lima, na base e Maquiné, no topo. O Grupo Nova Lima é formado por três principais conjuntos de rochas: uma unidade basal formada por rochas vulcânicas toleííticas-komatiíticas, associadas a rochas sedimentares químicas; uma unidade intermediária vulcanoclástica, associada a vulcanismo félsico; e uma unidade superior formada por sedimentos clásticos (Baltazar e Zucchetti (2007). Os maiores depósitos de ouro do Quadrilátero Ferrífero são hospedados em rochas da porção basal do GBRV (Lobato, 2001a e b). O Grupo Maquiné foi dividido nas formações Palmital (O'Rourke, 1957), na base, e Casa Forte (Gair, 1962), no topo, sendo que a primeira é constituída por quartzitos e quartzo filitos e a última, por quartzitos e conglomerados. Os contatos da sequência metavulcanossedimentar com terrenos granito-gnáissicos são de natureza intrusiva ou por falhas. Schorscher (1978) descreve lavas komatiíticas na base da sequência, denominando-as Grupo Quebra Osso.

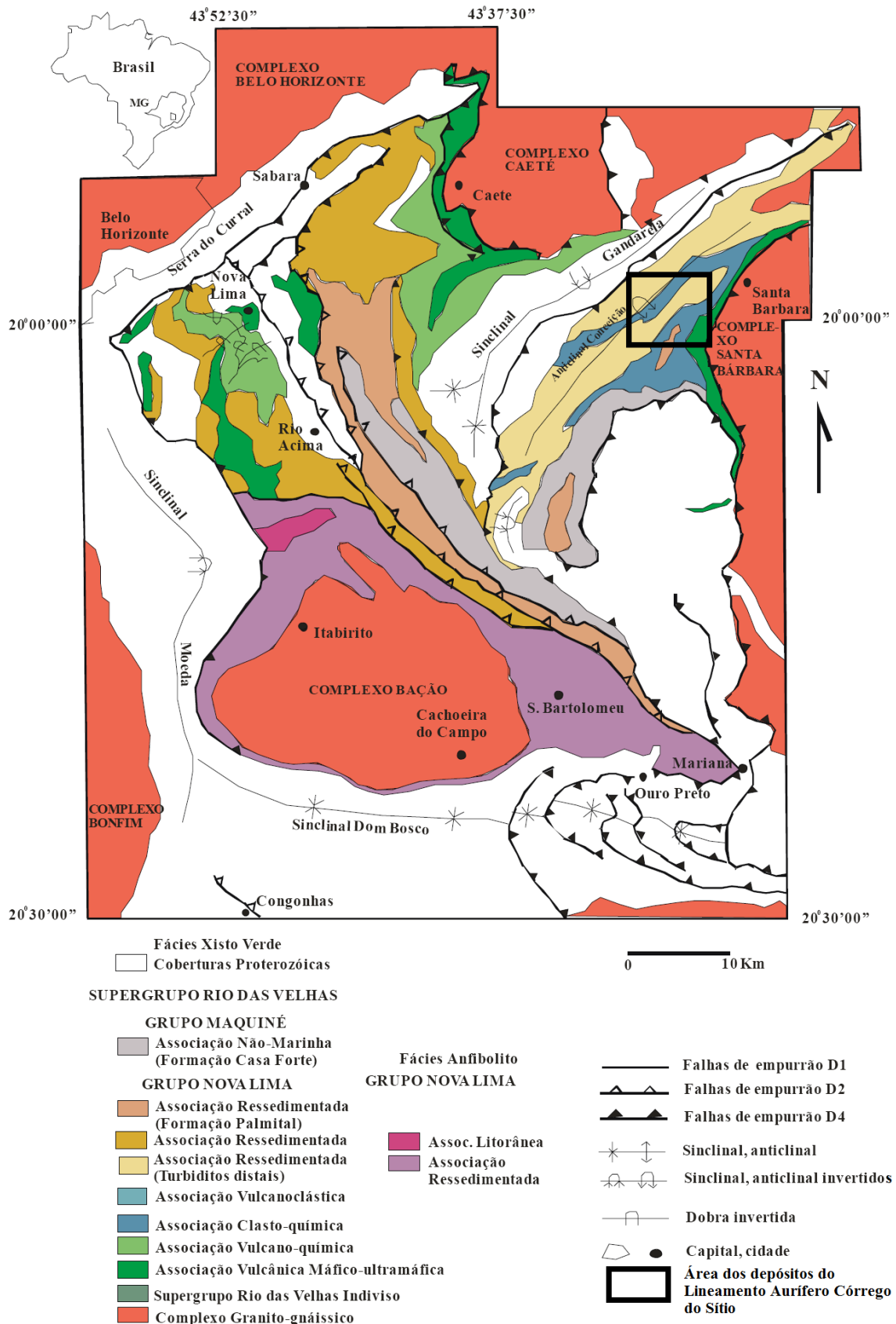


Figura 3.1 – Mapa geológico simplificado do QF com as associações de litofácies do Supergrupo Rio das Velhas (Baltazar & Zucchetti, 2005), quadrado negro destaca a área do depósito que é detalhada na figura 2.

Trabalhos mais recentes propõem uma subdivisão estratigráfica a partir do agrupamento dos litotipos que constituem os Grupos Quebra Ossos, Nova Lima e Maquiné, separando-os em associações de litofácies. As associações de litofácies da base para o topo são: vulcânica máfica-ultramáfica, vulcanossedimentar química, sedimentar clástico-química, vulcanoclástica, ressedimentada, costeira (ou litorânea) e não marinha (Baltazar e Pedreira, 1998; Baltazar e Zucchetti, 1996, 2007; Zucchetti e Baltazar, 2000; Lobato, 2005 e Baltazar e Zucchetti, 2007). Essas associações são descritas abaixo e correlacionadas às unidades já existentes.

1) Máfica-ultramáfica → Composta de lavas máficas e ultramáficas, com intrusões menores de gabro, anortosito e peridotito, além de intercalações de formação ferrífera bandada (FFB), chert ferruginoso, pelitos carbonosos, turbiditos e, raramente, rochas vulcanoclásticas félsicas. Corresponde ao grupo Quebra Osso e unidade Ouro Fino do Grupo Nova Lima.

2) Vulcanossedimentar Química → Correspondente à unidade Morro Vermelho, é formada por rochas toleíticas intercaladas com formação ferrífera bandada (FFB) e chert ferruginoso e, em menor proporção, rochas sedimentares clásticas com abundantes turbiditos e pelitos carbonosos; pelitos são intercalados com rochas sedimentares químicas.

3) Metassedimentar Clástico Química → É caracterizada por alternância de rochas sedimentares clásticas e químicas, de granulometria fina. Pelitos (xistos micáceos e cloríticos) são intercalados com finas camadas de FFB e, subordinadamente, chert e xistos carbonosos. Corresponde à unidade Santa Quitéria (ocorre na área de estudo).

4) Metavulcanoclástica → É formada por rochas vulcanoclásticas félsicas e máficas. Corresponde às unidades Ribeirão Vermelho e Mestre Caetano.

5) Ressedimentada → É amplamente distribuída no QF e inclui três diferentes sequências de grauvaça-argilito — duas metamorfisadas na fácies xisto verde e uma na fácies anfibolito. Corresponde, nos setores norte e leste, às unidades Mindá e Córrego do Sítio (ocorre na área de estudo); no setor sul, às unidades Catarina Mendes, Fazenda Velha e Córrego da Paina; e à unidade Rio de Pedras da Formação Palmital do Grupo Maquiné.

6) Costeira (ou litorânea) → Essa associação é restrita a uma pequena área ao nordeste do complexo Bação, é composta por arenitos com estratificação cruzada de médio a grande porte, com marcas de onda, com estratificação cruzada do tipo espinha de peixe e arenitos-siltitos. Corresponde às unidades Pau D'Óleo e Andaimés.

7) Não-marinha → É formada por arenitos-conglomerados e arenitos de granulometria grossa a fina. Corresponde às unidades Chica Dona, Jaguará, Córrego do Engenho e Capanema, da Formação Casa Forte do Grupo Maquiné.

As idades por U-Pb em zircão detrítico de rochas dos Supergrupos Nova Lima e Maquiné

sugerem vulcanismo félsico com idade de 2772 Ma (Noce *et al.*, 2007) e idade mínima de 2,85 Ga (Rosière *et al.*, 2008).

As unidades metassedimentares proterozóicas são compostas pelo Supergrupo Minas, Grupo Itacolomi e o Supergrupo Espinhaço. O Supergrupo Minas (SM) (Loczy e Ladeira, 1976) é uma sequência metassedimentar interpretado por Chemale *et al.* (1994) como uma bacia intracratônica. Já Marshak e Alkmim (1989) o interpreta como uma sequência supracrustal de plataforma com substrato síalico. O SM está em discordância tectônica sobre as sequências arqueanas do greenstone belt Rio das Velhas (GBRV) e é composto por sedimentos clásticos/químicos em um pacote constituído por quartzitos, metaconglomerados, metapelitos e uma espessa sequência de formações ferríferas predominantemente do tipo Lago Superior, com corpos de minério de alto teor (~64% Fe) (Rosière e Chemale, 2000). O Grupo Itacolomi é representado por sedimentos clásticos imaturos (Dorr, 1969), e contém zircão com idade mínima de 2060 Ma (LA-ICPMS Pb-Pb em zircão; Machado *et al.* 1996). O Supergrupo Espinhaço cobre uma pequena área no QF e está sobreposto ao SM em discordância angular com uma sequência de tipo *rift* incluindo brechas sedimentares, conglomerados e quartzitos. Seu desenvolvimento deu-se via processos de rifteamento no Estateriano (Brito-Neves *et al.*, 1995), que levaram à deposição de sedimentos clásticos continentais e marinhos, entre 1840 e 1714 Ma (U-Pb; Machado *et al.*, 1989).

3.2 – Geologia Estrutural

O QF tem geometria delineada por megadobras sinformes e antiformes que, na sua parte oriental, são truncadas por cinturões de falhas de empurrão de direções norte-sul (Baltazar, 2005). Os sinclinais estabelecem os limites do QF a norte, a sul, a oeste e a leste, representados, respectivamente, pelo homoclinal da serra do Curral, pelo sinclinal Dom Bosco, pelo sinclinal Moeda (Fig.3.1) e pelo sinclinal Santa Rita. Alkmim e Marshak (1998) descreve o QF como uma província do tipo domos e quilhas, onde embasamento ocorre em domos (*e.g.* Bação, Bonfim, Santa Barbará etc) envolvidos por quilhas que contém o GBRV e SM. Descreve ainda que zonas de cisalhamento ocorrem no contato entre as supracrustais e o embasamento em todos os domos.

Diversas são as interpretações e modelos de evolução tectono-estruturais do QF. No entanto, todos os autores compartilham a opinião de que ocorreu mais de um evento de deformação e metamorfismo para obtenção do padrão das estruturas regionais observado no QF. A tabela 1 apresenta um resumo de alguns dos trabalhos sobre a evolução tectono-estrutural do QF.

Tabela 3.1 – Síntese da evolução tectono-estrutural do Quadrilátero Ferrífero segundo diversos autores.

Dorr (1969)	Relata três importantes períodos de deformação. A primeira, deformação mais antiga, traduz-se em um dobramento das rochas do GBRV antes da deposição dos sedimentos da SM. A segunda deformação, que seria pós-Minas, teria provocado apenas o arqueamento e soerguimento do SM antes da sedimentação do Grupo Itacolomi. A terceira e mais tardia deformação, orogenia principal da região, mais intensa na sua porção leste, resulta num sistema de dobras-falhas de empurrão com compressão a partir de E-SE.
Corrêa Neto e Baltazar (1995)	Descreve três eventos deformacionais para o Supergrupo Rio das Velhas. O mais antigo é compressional e do Arqueano; o segundo, extensional, relacionado à ascensão de core-complexes; e o mais jovem, compressional.
Alkmim e Marshak (1998)	Sugere um evento contraccional seguido por um colapso orogênico, consistindo de empurrões com vergências para NW e o desenvolvimento posterior de estruturas em domos-e-bacias.
Projeto Rio das Velhas (DNPM/CPRM) (Zucchetti e Baltazar, 1998)	Descreve três eventos deformacionais a partir da análise dos dados estruturais levantados no GBRV: D ₁ , compressional, com transporte tectônico de norte para sul, de idade arqueana, gerando falhas de empurrão e dobras com vergências para S e SW; D ₂ , extensional, responsável pela colocação de granitos intrusivos, como o Complexo Bação; D ₃ , compressional, com transporte tectônico de E para W, responsável pelo cinturão de dobras-falhas de direção geral N-S.

3.3 – Metamorfismo

No QF pode ser observado um gradiente metamórfico e deformacional que aumenta de oeste para leste (Hoefs *et al.*, 1982). Ribeiro-Rodrigues e Lobato (1999) descrevem que o grau metamórfico varia também dentro de diferentes unidades litológicas. Os Terrenos Granito-Gnáissicos (Fig. 3.1) apresentam uma evolução metamórfica complexa com metamorfismo progressivo de fácies anfíbolito à granulito, também mostrando retrometamorfismo de fácies xisto verde (Cordani *et al.*, 1980; Herz, 1978). As sequências supracrustais (Supergrupos Rio das Velhas, Minas e Espinhaço e Grupos Sabará e Itacolomi) exibem metamorfismo variando de fácies xisto-verde a anfíbolito médio. Localmente, os tipos rochosos apresentam paragêneses indicativas de metamorfismo incipiente. Também há registro de paragêneses típicas de metamorfismo de contato próximo a corpos graníticos intrusivos (Chemale Jr. *et al.*, 1994; Herz, 1978; Hoefs *et al.*, 1982; Jordt-Evangelista, 1984; Marshak e Alkmim, 1989; Marshak *et al.* 1994).

Capítulo 4 – Características do fluido hidrotermal mineralizador com base em estudos de inclusões fluidas e isótopos em veios do depósito Carvoaria Velha

Este capítulo apresenta os dados dos estudos petrográficos, das análises de química mineral, de inclusões fluidas e de isótopos de oxigênio e enxofre realizados em veios mineralizados e estéreis do depósito Carvoaria Velha, lineamento aurífero Córrego do Sítio.

Os estudos de química mineral em sulfetos e sulfossais, combinados com estudo de inclusões fluidas (microtermometria e espectroscopia Raman) e isótopos de oxigênio e enxofre em quartzo das principais famílias de veios, permitiram caracterizar a composição dos fluidos e suas condições físico-químicas durante o evento mineralizador.

Os resultados alcançados são apresentados neste capítulo na forma de artigo a ser submetido à revista *Lithos*.

Fluid inclusion and sulphur and oxygen isotope studies on quartz-carbonate-sulphide veins at the Carvoaria Velha deposit, Córrego do Sítio gold lineament, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil

Yuri Ribeiro¹(yurigeol@gmail.com), Rosaline C. Figueiredo e Silva¹, Lydia M. Lobato¹, Luis Claudio Lima², Steffen G. Hagemann³, and John Cliff³

¹ Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Presidente Antônio Carlos, 6627, Pampulha, Belo Horizonte – MG, Brazil.

² Aurizona Mineração: Avenida dos Holandeses - Ponta do Farol - São Luís - MA

³ The University of Western Australia, 35 Stirling Highway, CRAWLEY WA 6009, Australia.

Keywords: gold mineralization, fluid inclusions, Quadrilátero Ferrífero, hydrothermal alteration, isotopes

1. Introduction

The Quadrilátero Ferrífero (QF) region represents an important Brazilian metallogenic province located at the southern border of the São Francisco Craton. This province is one of the world's largest producers of mineral resources, such as gold and iron ores, with a number of world-class gold deposits hosted by Archean rocks of Rio das Velhas greenstone belt (Lobato et al., 2001a).

The 16-km long, NE-SW-trending Córrego do Sítio regional gold lineament (Fig 3.1) is located in the northeastern part of the QF, at the Brumal district, town of Santa Bárbara, where fourteen gold excavations and two geochemical anomalies are found (Lima, 2012).

Other than gold deposits such as Pilar (Jaguar, 2012) and the historically BIF-hosted producer São Bento mine (Pereira et al., 2007) (Fig. 1), the region near Santa Bárbara is also known for its wealth in iron, with large iron ore mines such as Brucutu and Gôngo-Soco (Vale, 2012).

In 1981, while seeking the continuity of the São Bento ore bodies, the Córrego do Sítio gold lineament was discovered, through geological mapping and soil geochemical analysis (Porto, 2008). At the Córrego do Sítio lineament, schistose sediments of the Nova Lima Group, Rio das Velhas greenstone belt comprise a succession of metamorphosed, carbonaceous turbiditic, graywacke-siltstone-shale and slates that host lode-gold mineralization associated with quartz-carbonate-sulphide veins (Lima, 2012). The Cachorro Bravo, Laranjeiras and Carvoaria Velha are the main ore deposits, all under exploitation by AngloGold Ashanti Brasil Mineração (AGABM). Open-mine exploitation took place between 1990 and 1998, and restarted in 2002 with an accumulated production nearing 11 tons of gold (Lima, 2012). The probable and proved ore reserves at Córrego do Sítio currently stand at 411,000 oz of Au with an average grade of 6.42 Au g/t (sulphide and oxide ores; AGABM, 2011).

The present study focuses on the Carvoaria Velha deposit (Fig. 2), encompassing petrographic, alongside mineral chemistry studies in carbonates and sulphides, and fluid inclusions and O¹⁸ and S³⁴ isotopic studies in order to understand and characterize the hydrothermal fluid involved in the gold mineralization. These are intended to contribute to the geological knowledge of the Nova Lima Group gold deposits of QF region.

In order to do so, this article presents the following specific aims:

- i. Classify different vein types in the Carvoaria Velha orebody and host rocks;

- ii. Analyze the composition of hydrothermal fluids in quartz crystals;
- iii. Define the physical-chemical condition (P-T-composition) and probable sources of fluids (metamorphic/magmatic/meteoric water) associated with the hydrothermal and structural events.

2. Materials and Analytical Methods

The procedures for sampling and the methods of analyses were the following:

- 1) Sampling of quartz-carbonate veins from drill core FCS 926 (Fig. 3), with selection of samples was done in such a way to represent all vein types, ranging from mineralized to non-mineralized portions;
- 2) Macro- and microscopic petrographic studies focused on quartz-carbonate veins and veinlets, with definition of petrographic characteristics;
- 3) Electron microprobe analyses were performed on carbonate and sulphide crystals using the JEOL model JXA 8900RL, at the Electronic Microscopy and Microanalytical (LMA) at the Physics, Geology and Chemistry-CDTN-CNEN Consortium Laboratory, at the Universidade Federal de Minas Gerais-UFMG, Brazil;
- 4) Detailed petrographic mapping of fluid inclusions (FIs) in gold mineralized vein and breccia quartz and carbonate crystals was undertaken to discriminate inclusion types, sizes, morphologies and definition of FIAs (fluid inclusion assemblages). A Leica petrographic microscope was used, with 10x oculars and objective lenses of 2.5x, 5x, 10x, 20x, 50x and 63x;
- 5) Fluid inclusion microthermometric studies were conducted using a fully automated Linkam THMSG600 heating and freezing stage with a TMS 93 temperature controller. The stage was calibrated between -56.6°C and 374.1°C with synthetic fluid inclusion Linkam standards (pure H_2O and mixed $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$). The cyclic technique (Goldstein and Reynolds, 1994) was used to acquire better precision in measurements of transition of temperature between carbonic phases. The accuracy of the freezing measurement runs is about $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ and for heating runs $\pm 1^{\circ}\text{C}$ between $200-500^{\circ}\text{C}$. Apparent salinity has been reported in equivalent percentage weight of NaCl. Calculations of salinity and density were made using the MacFlinCor program (Brown and Hagemann, 1995);
- 6) Raman spectroscopy was used to assess gases and fluids contained within the IFs. This technique allows a correlation between the composition and phase behaviour, during the studies of cooling of FIs. Raman spectra were obtained on a Jobin Yvon/Horiba LABRAM-HR 800 spectrographer equipped with a He-Ne laser (632.8 nm). The Raman signal was collected by a BX-41 Olympus microscope using 10x, 50x and 100x objectives. The acquisition time ranges from 10 to 120s, depending on sample background fluorescence, and

the laser power from 0.06 to 6mW. Spectra were acquired 10-30 times to reduce signal/noise ratio. Collected Raman spectra were analyzed and optimized with Labspec 4.18 and Origin 8.0. Background was corrected and when necessary normalized and peak deconvoluted. Measurements were performed at the Raman Laboratory of Spectroscopy in the Department of Metallurgic and Materials Engineering at UFMG;

- 7) *In situ* oxygen isotopic studies were made in quartz, and sulphur isotope studies in chalcopyrite, pyrite and pyrrhotite. The samples consisting of rock fragments were cut from slabs and mounted with the standard UWQ-1 ($12.33 \pm 0.01\text{‰}$ VSMOW; Kelly et al., 2007) in 25.4 mm epoxy discs for oxygen isotopes or in-house standards SON-1 ($\delta^{34}\text{S} = 0.78 \pm 0.06\text{‰}$ VCDT, 1 SE, n=3 and $\delta^{34}\text{S} = 1.45 \pm 0.08$ VCDT, 1 SE n=3) for S isotopes. Oxygen isotope ratios ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) were determined using a Cameca IMS 1280 multi-collector ion microprobe located at the Centre for Microscopy, Characterisation and Analysis (CMCA), University of Western Australia. A static ~ 3 nA Cs⁺ beam with an impact energy of 20 keV was focused to a 10-15 μm spot on the sample surface. Instrument parameters included: a magnification of x130 between the sample and field aperture, 400 μm contrast aperture, 4000 μm field aperture, 110 μm entrance slit, 500 μm exit slits, and a 40 eV band pass for the energy slit with a 5 eV offset to the high-energy side. Secondary O⁻ ions were accelerated to 10 keV and analyzed with a mass resolving power of approximately 2200 (10% max peak height) using dual Faraday cup detectors. A normal incidence electron gun was used for charge compensation. Each analysis spot was pre-sputtered for 10 seconds before automated peak centering in the field and contrast apertures was performed. Analyses consisted of twenty-four second cycles, which gave an average internal precision $\sim 0.1\text{‰}$ (1 SE). Bracketing standards allowed correction for instrumental mass fractionation (IMF) which was corrected using standard UWQ-1. The average spot-to-spot reproducibility (external precision) of the standard was less than 0.15 ‰ (1SD). On some mounts NBS-28 was analysed as an unknown and returned an average value of 9.4 ± 0.3 which is in good agreement to the recommended value ($9.6 \pm 0.1\text{‰}$, 1 SD). S-isotope ratios $^{33}\text{S}/^{32}\text{S}$ and $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ were determined using triple Faraday cups and similar conditions to above with the following exceptions. The analyses used a ~ 1.5 nA focused Cs⁺ beam and presputtered a 20 $\mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ for 30 s and a 80 μm entrance slit. Following the presputter phase, the raster was reduced to 10 $\mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ with dynamic transfer employed to center field and contrast apertures prior to acquiring 16 \times 4 s cycles. The 33S detector was offset to the low mass side to avoid interference from $^{32}\text{SH}^-$. Internal precision for S-isotope analyses averaged 0.06 ‰ for $\delta^{33}\text{S}$, and 0.03 ‰ for $\delta^{34}\text{S}$. External precision averaged 0.08 ‰ for $\delta^{33}\text{S}$, 0.07 ‰ for $\delta^{34}\text{S}$, and 0.08 ‰ for $\Delta^{33}\text{S}$. We define $\Delta^{33}\text{S}$ as $\Delta^{33}\text{S} = \delta^{33}\text{S} - 1000 \times [(1 + \delta^{34}\text{S}/1000)^{0.515} - 1]$. Uncertainties were propagated closely following (JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM) based on the correction model of Kita et al., 2009. The

uncertainty budget includes terms associated with the uncertainty of the primary standard relative to VSMOW as well as external precision of the standards measurements defined by a weighted average of the individual instrumental mass fractionation factors, both cast in δ or Δ notation.

3. Regional Geology

The QF region is located at the southern part of the São Francisco Craton (Almeida, 1977; Inda et al., 1984; Teixeira and Figueiredo, 1994). The geology of the QF is commonly divided in three main rock groups, which can be defined by: 1) granite-gneiss complexes, corresponding to the crystalline basement; 2) Archean greenstone belt tracts belonging to the Rio das Velhas Supergroup; and 3) Proterozoic metasedimentary units, represented by the Minas Supergroup, the Itacolomi Group and the Espinhaço Supergroup (Fig. 1).

3.1 Stratigraphy

Granite-gneissic complexes have trondhjemite-tonalitic-granodioritic (TTG) composition, corresponding to polideformed gneissic rocks and subordinately by granites, amphibolites and mafic and ultramafic intrusions (Herz, 1970; Ladeira et al., 1983; Teixeira et al., 1996). They are represented by the Bonfim, Caeté, Belo Horizonte, Baçõ and Santa Bárbara complexes (Fig. 1; Herz, 1970). The TTG complexes are intruded by granitoids of variable compositions, comprising foliated, poorly and nonfoliated types, and ranging apophyses to large bodies (Noce et al., 2007). Geochronological data reveal these complexes formed in intervals between 3380 to 2900 (Teixeira et al., 1996), with migmatization between 2860 ± 14 Ma e 2772 ± 6 Ma. They were affected by the Transamazonian metamorphism at 2041 ± 5 Ma (Noce et al., 1998).

The Archean Rio das Velhas (GBRV) greenstone belt corresponds to a metavolcanosedimentary sequence divided into the Nova Lima and Maquiné groups at its lower and upper portions, respectively (Dorr et al., 1957; Schroscher, 1976; Almeida, 1977). The Nova Lima Group is composed of a basal unit formed by tholeiitic-komatiitic volcanic rocks, associated with chemical sedimentary rocks; a volcanoclastic intermediate unit, associated with felsic volcanism; and an upper unit, composed of clastic sediments (Baltazar and Zucchetti, 2007). Schroscher (1978) describes komatiitic lavas at the base of the sequence, naming them Quebra Osso Group. The largest gold deposits in the Quadrilátero Ferrífero are hosted in the basal sequences of GBRV (Lobato, 2001).

The Maquiné Group is divided in the basal Palmital Formation (O'Rourke, 1957), consisting of quartzite and quartz phyllite, and the upper Casa Forte (Gair, 1962) Formation, composed of sandstones and conglomerates.

The work by Baltazar and Zucchetti (2007 and references therein) proposes a stratigraphic subdivision associations of lithofacies, encompassing from the basal part to the top the mafic-ultramafic volcanic, volcano-chemical-sedimentary, clastic-chemical sedimentary, volcanoclastic,

resedimented, coastal and non-marine associations. (i) The mafic-ultramafic association has minor gabbro, anorthosite and peridotite, and intercalations of banded iron formation (BIF), ferruginous chert, carbonaceous pelite, turbidites, and rare felsic volcanoclastic rocks. (ii) The volcano-chemical-sedimentary association has tholeiites intercalated with BIF and ferruginous chert, and less fine-grained clastic sedimentary rocks, turbidites and pelites, which are intercalated with chemical rocks. (iii) The clastic-chemical sedimentary association shows alternating fine-grained pelites (micaceous and chloritic schists) with lesser BIF, and subordinate chert and carbonaceous schists. It corresponds to the Santa Quitéria unit in the study area. (iv) The volcanoclastic association is composed of volcanoclastic felsic and mafic rocks. (v) The resedimented association is widely distributed in the QF, composed mainly of graywackes, quartz graywackes, sandstones and siltstones. It corresponds, on its east and north sectors, to the Mindá and Córrego do Sítio units, both present in study area. (vi) & (vii) The coastal and non-marine associations correspond to sandstone-siltstones and sandstones-conglomerates, respectively.

The U-Pb ages of detrital zircons from rocks of the Nova Lima and Maquiné groups suggest felsic volcanism with age of 2772 ± 6 Ma (Machado et al., 1992; Noce et al., 2007), and a minimum age of 3.029 Ga (Machado et al., 1992).

The metasedimentary Proterozoic units include the Minas Supergroup, Itacolomi Group and Espinhaço Supergroup. The Minas Supergroup (Loczy and Ladeira, 1976) is a metasedimentary sequence interpreted by Chemale et al. (1994) as an intracratonic basin. On the other hand, Marshak and Alkmin (1989) interpret it as a supracrustal sequence of platform in sialic substrate. This supergroup is in tectonic unconformity over the Archean sequences of the Rio das Velhas greenstone belt (GBRV) and it is composed of chemical/clastic sediments constituted by quartzite, metaconglomerates, metapelitics and a thick sequence of iron ore formations mainly of the Lago Superior type, with high grade (~64% Fe) orebodies (Rosière and Chemale, 2000). The Itacolomi Group is represented by immature clastic sediments (Dorr 1969), and it contains zircon with a minimum age of 2060 Ma (LA-ICPMS Pb-Pb in zircon; Machado et al., 1996). The Espinhaço Supergroup covers a small area in the QF and it is set over the Minas Supergroup in angular unconformity with a rift sequence, including sedimentary breccias, conglomerates and quartzite. Its development occurred via rifting processes during the Siderian period (Brito-Neves et al., 1995), which led to the depositing of clastic sediments, both continental and marine, between 1840 and 1714 Ma (U-Pb; Machado et al., 1989).

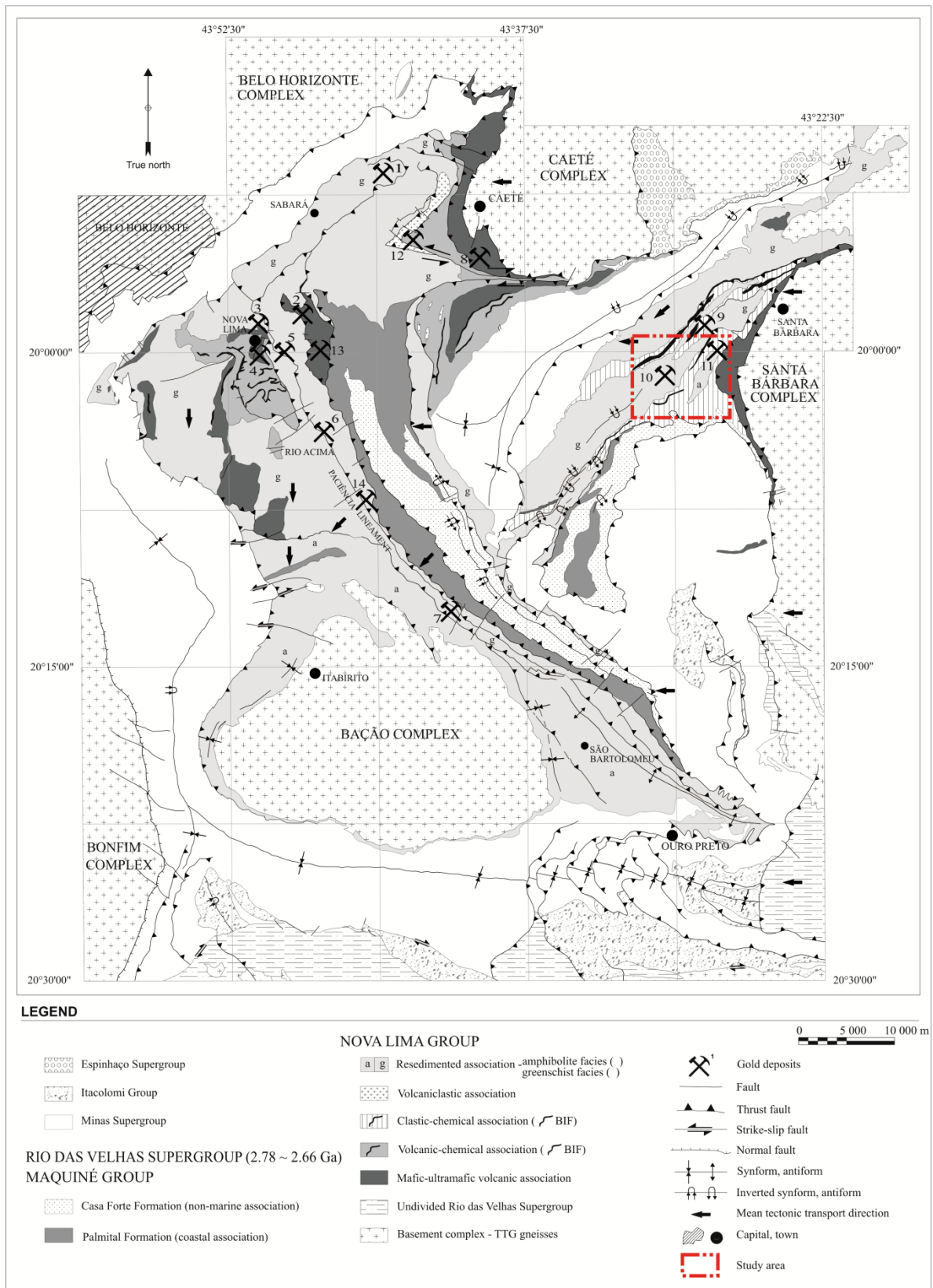


Figure 1 – Simplified geological and structural map of the Quadrilátero Ferrífero. The main lithofacies associations of the Nova Lima Group, Rio das Velhas greenstone belt, and some of the gold deposits are shown (from Lobato *et al.*, 2001). Gold deposits: 1-Cuiabá; 2-Raposos; 3-Morro Velho; 4-Bela Fama; 5-Bicalho; 6-Esperança; 7-Paciência; 8-Juca Vieira; 9-São Bento; 10-Córrego do Sítio; 11-Brumal; 12-Lamego; 13- Santana; 14-Engenho d’Água. Studied area is highlighted in a red square, and detailed in figure 2.

3.2. Structural geology

The QF has a geometry delineated by sinform and antiform mega folds which, in its eastern portion, are truncated by fault belts towards north-south direction (Lobato, 2005). Synclinals establish QF limits at north, south, west and east, represented, respectively continuous regional synclines of the Serra do Curral, Moeda, Dom Bosco, and Santa Rita (and probably the Gandarela syncline) (Fig. 1). Alkmin and Marshak (1998) describes the QF as a province of domes and keels type, where the basement occurs as domes (*e.g.* Bação, Bonfim, Santa Bárbara, etc.) that are circled by keels containing both GBRV and MS. They also state that shear zones occur through contact between supracrustals and basement in all domes.

There are various interpretations and tectonic-structural evolution models of QF. However, authors (see Table 1) share the opinion that there was more than of deformation and metamorphism event in order to the regional structures of the QF to be obtained. Table 1 presents a summary of significant studies on the tectonic-structural evolution of the QF.

Table 1 – Summary of tectonic-structural evolution of Quadrilátero Ferrífero according to the following authors.

Dorr (1969)	Reports three important periods of deformation. The first and the most ancient consists of rock folding at GBRV before deposition of sediments from the MS. Second deformation, post-Minas, would have provoked merely the arching and raising of MS before the sedimentation of the Itacolomi Group. The thirist and latest deformation, the main orogeny in the area, more intense in its east portion, results in a system of pushing folds and faults, its compression E-SE.
Corrêa Neto and Baltazar (1995)	Description of three deformation events for the Rio das Velhas Supergroup. The oldest is compressed and Archean; the second, extensional, connected to the rising of core-complexes; the youngest is compressed.
Alkmin and Marshak (1998)	Suggests a contraction effect followed by an orogenic collapse, consisting of pushes verging towards NW and a late development of structures in domes and faults.
Rio das Velhas Project (DNPM/CPRM) (Zucchetti and Baltazar 1998)	Description of three deformation events based on analysis of structural data collected at GBRV: D1, compressed, with tectonic transport from north to South, Archean period, generating pushing faults and folds verging to S and SW; D2, extensional, responsible for the intrusion of granites, such as the Bação Complex; D3, compressed, with tectonic transport from E to W, responsible for fold belt of folds and faults in the general direction of N-S.

4. Geology of Córrego do Sítio Lineament

The Córrego do Sítio lineament is located in the northeastern sector of the QF region (Fig. 2). According to Baltazar and Zucchetti (2007), the lithostratigraphic units of this sector are grouped in Clastic-chemical and Resedimented lithofacies associations, formerly referred to Santa Quitéria and Córrego do Sítio units of Zucchetti et al. (1998), respectively. These are associated with the upper Nova Lima Group, dipping to the east over rocks of the Mafic-ultramafic association (Quebra Osso unit; Zucchetti et al., 1998) (Fig. 2).

The region is structurally controlled by the Gandarela Synclinal and Conceição Anticlinal, of the Minas Supergroup, and they are truncated by the Fundão and Água Quente fault systems (Baltazar and Silva, 1996).

The Córrego do Sítio lineament is dominated by rocks of the Resedimented and clastic-chemical sedimentary lithofacies association, Córrego do Sítio and Santa Quitéria units, respectively. In the study area, these units correspond to an alternation of metapelites and metapsamites, with gradational layering and plane-parallel and cross-bedding stratified. Subordinate thin levels of carbonaceous schists and BIF are present. These units are interpreted by Zucchetti et al. (1998) as a result of deposition by turbidity currents. They are classified as quartz-carbonate-mica-chlorite schists, and represent greenschist facies metamorphism of graywackes, sandstones and pelites according to Lima, 2012 (Table 2). There is still a swarm of metamafic dykes and sills of uncertain age, possessing various orientations, with the predominance of the NE-SW direction, dipping towards SE, in general subparallel to the metasedimentary sequence (Fig. 4). These constitute tabular bodies of metric and decametric thickness, and kilometric continuity, composed of metagabbros in different phases of alteration to carbonate, chlorite and sericite (Canale, 1999; David, 2006; Porto, 2008; Lima, 2012). There are four types of dykes, locally named as DB1, DB2, DB3 and DB4: DB1) moderate alteration to chlorite and carbonate; DB2 and DB3) advanced carbonate and muscovite alteration; DB4) incipient chlorite alteration, preserving relicts of pyroxene.

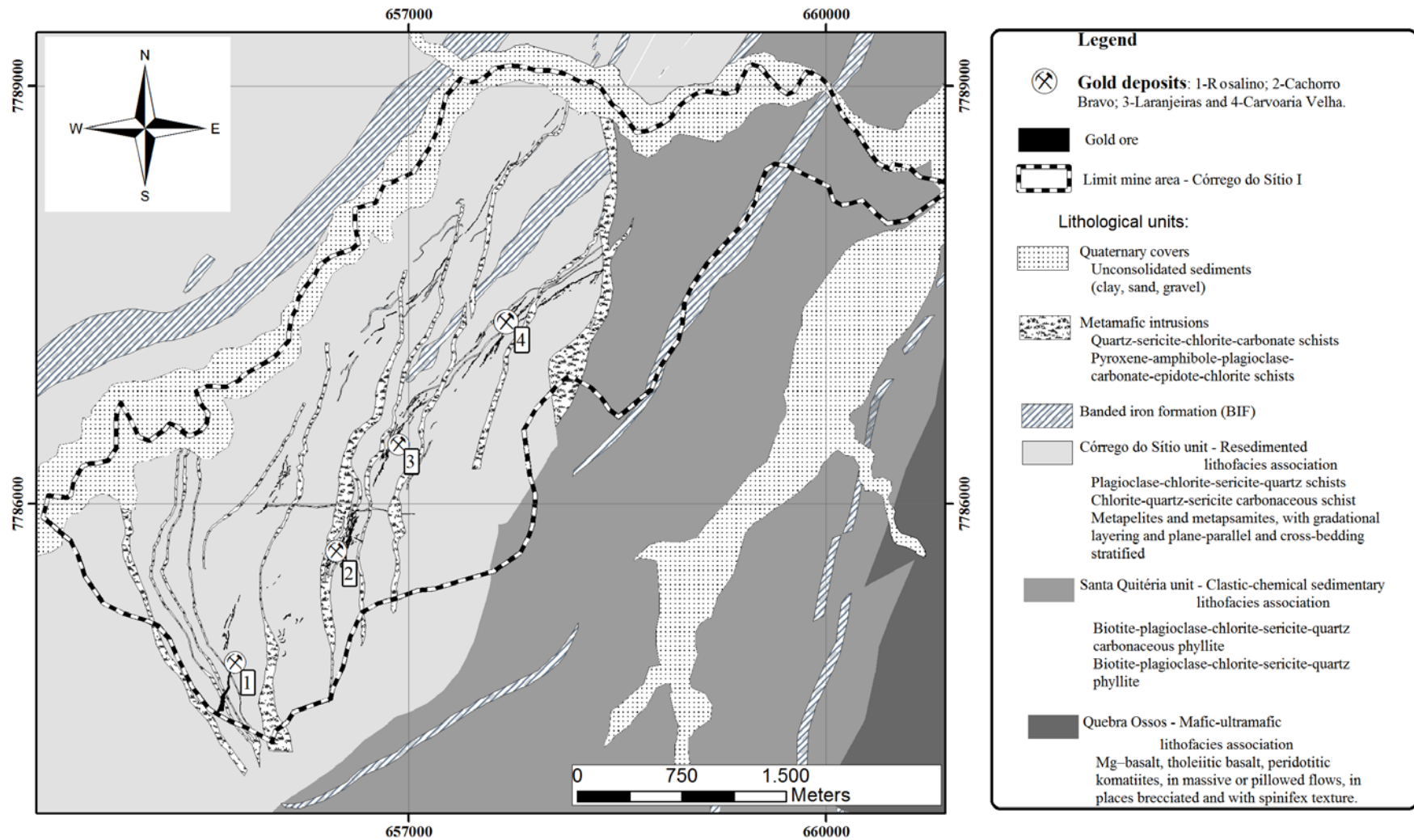


Figure 2 – Geological map of the northeastern portion of QF, showing the location of the Córrego do Sítio mining area (dashed circle), and indication of four deposits, including the Carvoaria Velha deposit (number 4). Modified after CPRM (1996), and Lima (2012).

Table 2 – Summary of lithological units in the Córrego do Sítio lineament based on Lima (2012).

Unit	Lithological description	Mineralogy	
		Essential	Accessories
METAMAFIC INTRUSIONS	The metamafic dikes and sills are green, with a fine-grained texture, and, although foliated near the contacts with wall rocks, they grade to medium-grained over short distances towards the core of the intrusion, where the foliation is not prominent.	-Hornblende -Tremolite -Actinolite -Plagioclase -Fe-Chlorite -Mg-Chlorite -Epidote -Calcite -Quartz -Muscovite -Biotite	-Magnetite -Ilmenite -Rutile -Pyrrhotite -Pyrite -Chalcopryrite -Galena -Sphalerite -Titanite
CÓRREGO DO SÍTIO Resedimented lithofacies associations	Rocks are metamorphosed graywackes, quartz graywackes, sandstones and siltstones, with cyclic layers and abrupt basal contacts between cycles. These are up to 0.5 m thick, and exhibit upward fine, with coarse sand containing granules at the base and grading to carbonaceous clay at the top. Some cycles are composed of fine sand and clay, with pelagic facies of banded iron formation (BIF).	-Carbonate -Quartz -Albite -Sericite -Chlorite -Plagioclase - Chlorite	-Zircon -Pirite -Pyrrhotite -Chalcopryrite
		BIF: -Magnetite -Quartz (chert) -Siderite -Ankerite, -Fe-calcite	-Pyrrhotite -Pyrite -Chalcopryrite -Galena -Ilmenite
SANTA QUITÉRIA Clastic-chemical sedimentary lithofacies associations	Rocks are metamorphosed pelites (micaceous and chloritic schists) intercalated with lesser banded iron formation (BIF) and subordinate chert and carbonaceous schists. The pelites are layered on a millimeter to decimeter scale and are generally intercalated with dark gray, carbonaceous phyllite layers of variable thickness.	-Quartz -Carbonate -Plagioclase -Epidote -Clorite -Biotite	-Titanite -Turmaline -Zircon -Epidote -Pyrrhotite -Pyrite -Chalcopryrite
		BIF: -Magnetite -Quartz (chert) -Carbonate	-Pyrrhotite -Pyrite -Chalcopryrite -Ilmenite

4.1. Mineralization at the Córrego do Sítio lineament

Orogenic gold mineralization at the Córrego do Sítio lineament is structurally controlled and associated with hydrothermal alteration that gave place to the development of chlorite, carbonate, sericite, sulphide-sulphosalt, and massive amounts of silica alteration. Because of the nature of the metasedimentary rocks, the contrast between pre-altered and altered sequences is very subtle, and has been dealt with in detail by Porto (2008) and Lima (2012). Table 3 shows a summary of paragenetic sequences related to hydrothermal alteration halos, from distal to proximal/mineralization.

Table 3 – Paragenetic sequence from distal to proximal/ore hydrothermal alteration zones of metasedimentary wallrocks (after Porto, 2008).

HYDROTHERMAL ALTERATION of metasedimentary rocks			
Minerals	Distal	Intermediate	Proximal/Ore
Carbonaceous matter	—————	—————	—————
Chlorite	-----	—————	-----
Ankerite	-----	—————	—————
Sericite	-----	-----	—————
Quartz	-----	-----	—————
Pyrite			—————
Pyrrhotite		-----	—————
Arsenopyrite			-----
Gold			-----
Berthierite/ stibnite			—————
Other sulphides			-----

The gold mineralization styles at the Córrego do Sítio lineament are: 1) disseminated, sulphide associated, parallel to the main foliation; 2) quartz-carbonate-sulphide±sulphosalts veins of varied distribution, with dominant free gold in quartz. In 1) disseminated ore in metasedimentary rocks, gold is present as inclusions in fine-grained sulphides (<100 µm), essentially arsenopyrite, pyrrhotite and pyrite, developed in different alteration stages, some of them during the rock deformation (David, 2006). Sulphides form anastomosing micro lenses along layers of carbonaceous quartz-sericite schists, or metagraywackes of the Córrego do Sítio unit (Lima 2012). In 2) quartz-carbonate-sulphide±sulphosalts veins, gold is present as i) inclusions in sulphides, such as pyrite and pyrrhotite, ii) inclusions in sulphosalts, and iii) free gold in quartz are present together with sulphides. Sulphosalts include berthierite, tetraedrite-tennantite, ullmannite and gersdorffite. Veins may form a dense network, considering that in mineralized lodes they are narrow and long, lenticular, boudinaged and, locally ruptured.

Based on mineralogical composition and mineral textures, Lima (2012) identified gold in five associations: 1) free and disseminated electrum in quartz-carbonate veins; 2) included in disseminated arsenopyrite, generally parallel to the main foliation (Sn), and associated with phyllosilicates (chlorite, sericite or muscovite) portions; 3) included in berthierite; 4) included in pyrite or pyrrhotite that occur disseminated parallel to the main foliation in micaceous portions; 5) included in silicates such as quartz or muscovite.

For the present work, the mineralized samples contain ore grades of up to 26 g/tons Au (Figs. 3 and 4), and correspond to ore of the quartz-carbonate-sulphide±sulphosalt vein, with the ore minerals arsenopyrite, berthierite, pyrite and pyrrhotite.

4.2. Structural geology of *Córrego do Sítio* lineament

The mineralized rocks at the *Córrego do Sítio* lineament are associated with NE-SW, dextral ductile shear zones. The structures are characterized by a complex evolutionary tectonic history developed in at least three deformational events (Canale 1999, David 2006, Porto 2008, and Lima 2012). The statistical structural analysis applied to the Bocaina, Cachorro Bravo, Carvoaria Velha, Crista, and Laranjeiras deposits led Lima (2012) define the main phases of deformation proposed in Table 4.

The first event (D_n) followed the deposition of the metasedimentary rocks and produced tight, asymmetric and disharmonic, kink folds, which gave place to an axial planar foliation (S_n) striking NNE, and moderately to steeply-dipping to ESE (Table 4). Although S_n is the main regional foliation, because it dips subparallel to bedding it is difficult to distinguish them from one another. There are rock strips that show mylonitic foliation ($S_{n \text{ mylonitic}}$) subparallel to S_n , and are interpreted to be contemporaneous and cogenetic to S_n , reflecting a strong shearing component of a single progressive event. The second event (D_{n+1}) is represented by a crenulation cleavage (S_{n+1}) striking NNE, crosscutting S_n at a high angle (70-80°) to the northwest. Lima (2012) interprets D_{n+1} as an extensional crenulation cleavage or as Riedel shear, possibly representing a late phase of D_n . The third event (D_{n+2}) created open folds that arched the bedding, the foliation S_n and the crenulation cleavage S_{n+2} , maintaining the high angle between S_n and S_{n+2} without the development of a pervasive foliation. The D_{n+2} event is better recognised near the surface than in deeper levels. The fourth event (D_{n+3}) is associated with the formation of structures in a transitional ductile-brittle environment. Parallel fractures predominate, spaced from centimetres to metres along with open folds or subordinate kink folds. The open folds have steeply-dipping axial plane and strike mainly towards NW.

Mineralized veins and veinlets are flattened in the S_n foliation, with orthogonal strike to D_n - $D_{n \text{ mylonitic}}$ fold plunge. They are boudin shaped shear veins, necking alongside strike and dip, developing a pinch-and-swell geometry, with variable spacing and size. Crenulation cleavages (S_{n+1}) and fractures (S_{n+3}) dislocate strata and mineralized veins, and are oriented according to the S_n foliation, with a millimetric offset; where locally metric it may interfere with the ore geometry. An attempt of classification of the various vein types is proposed in the next section, based on the understanding of structural aspects proposed by Lima (2012).

Table 4 – Main structural events and related features at the Córrego do Sítio lineament (Lima, 2012).

Event	Elements	Observations
Sedimentation and diagenesis - Bedding	Millimetric to metric bedding in scale; Gradational bedding and cross-bedding stratification of small range.	Bedding attitude highly variable due to folding in superimposed deformation phases
D_n – Ductile – ductile	F _n folds Asymmetric folds, tight and isoclinal.	F _n = 45/43 Az S _n =60/116 Az L _n variable
D_n mylonitic – Ductile- brittle	Transposition according to the axial plane of F _n folds Anastomosed and mylonitic foliation with planes S-C-C'- R'- P; Rotated boudins; Sigmoidal tension gashes and in echelon.	Shear zones are subparallel with the lithological contacts and the bedding attitudes and main foliation (F _n).
D_{n+1} - Ductile – brittle	Crenulation cleavage Spaced crenulation cleavage	S _{n+1} = 35/285 Az L _{n+1} ⁰ = 4/225 Az.
D_{n+2} – Ductile – brittle	Open folds along bedding and main foliation.	-Does not develop foliation or axial lineament.
D_{n+3} – Brittle - Ductile	Open folds with vertical axial plane with high angle in fan; Fracture cleavage.	S _{n+3} =89/214 Az.

5. Córrego do Sítio Vein System and Mineral Chemistry

In all lithotypes of the Carvoaria Velha deposit, millimetric to metric veins are composed mainly of quartz and carbonate, which may contain ore minerals such as sulphides and sulphosalts. The presence of ore minerals is not directly related to economic gold grade. For a better understanding of mineralization and the complex distribution of veins, different veins types have been classified for the purpose of the fluid inclusions studies, and also for understanding of the structural evolution and hydrothermal alteration (Fig. 4 and Table 5) and isotopic studies. It is clear that mineralized veins are hosted in all rock types, except metamafic dykes and sills, suggesting the absence of a lithological control. Samples were selected mainly from the 926 drill core (Fig. 3), from Carvoaria Velha deposit, as well as galleries of the Laranjeiras (level 696) and Cachorro Bravo (level 643) deposits.

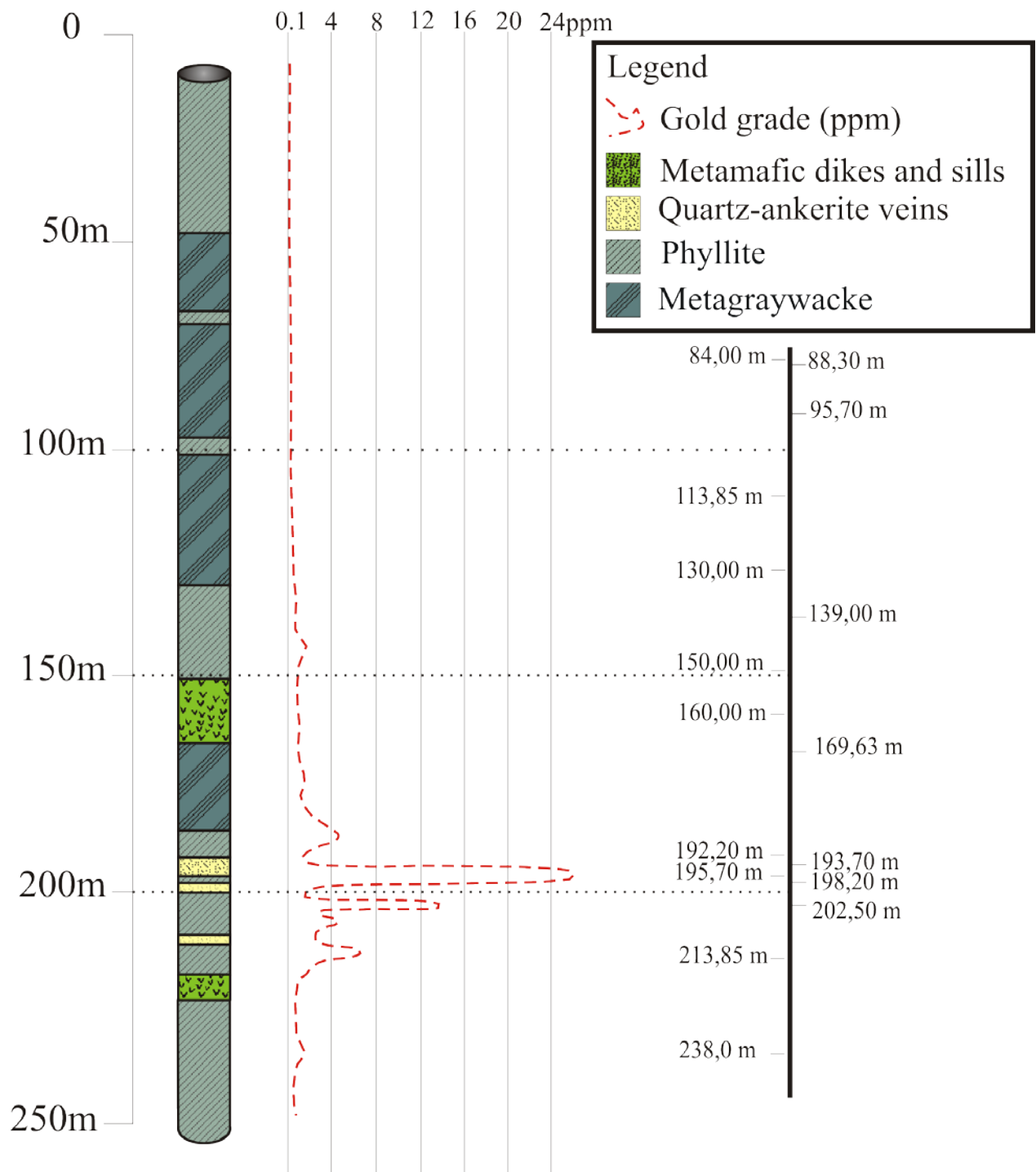


Figure 3 – logging of sampled FCS 926 drill core showing gold grades (in ppm), and depths from where veins-veinlets were collected. Source of gold grades data from AGABM.

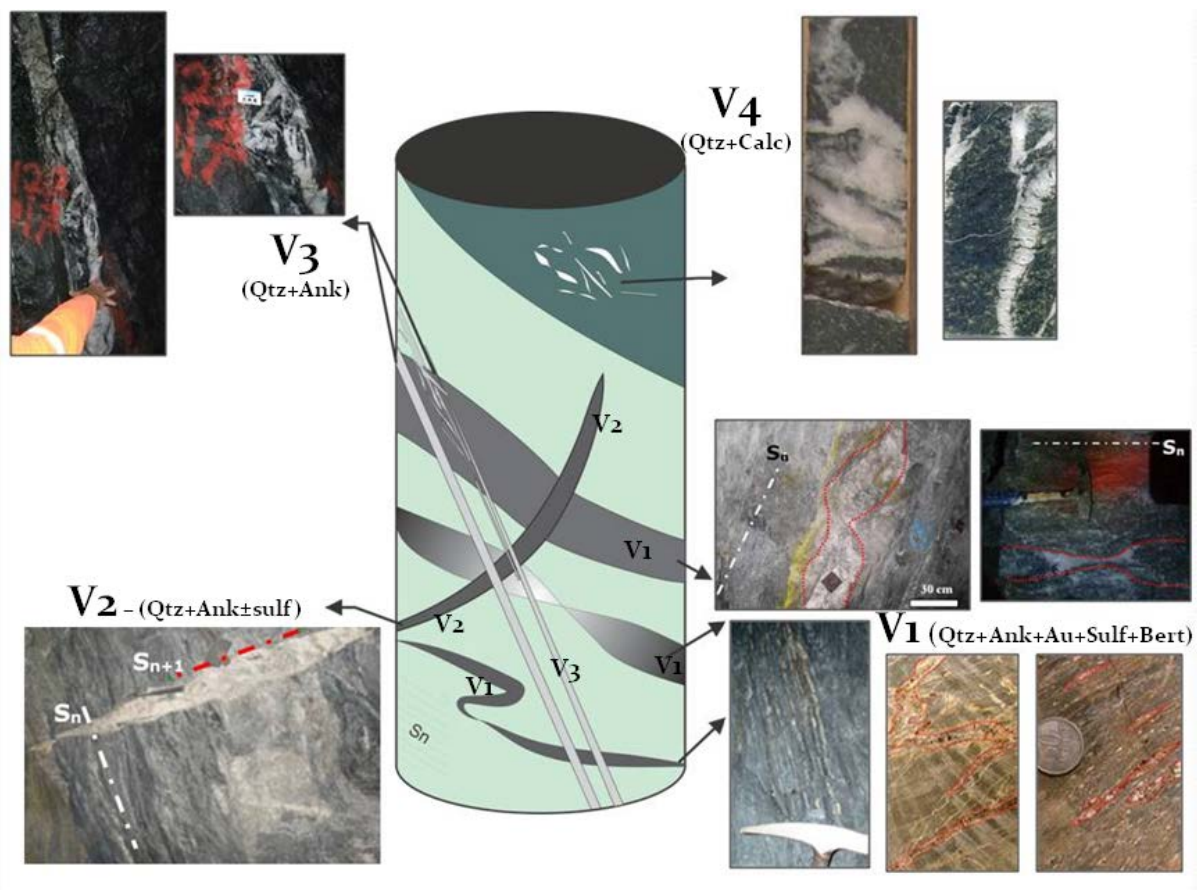


Figure 4 – Schematic diagram illustrating the different vein and breccia types at the Carvoaria Velha deposit. Also shown are photographs of examples from core and hand samples. Veins types hosted in the metasedimentary rocks are: V1 – quartz-ankerite-sulphide-sulphosalt-gold, along main foliation S_n , may be folded and boudinaged; V2 – quartz-ankerite-pyrite, develop along crenulation cleavage S_{n+1} ; V3 – quartz-ankerite, tabular lenses filling S_{n+3} fractures, locally brecciated; veins restricted to DB1 metamafic dyke V4 – quartz-calcite, brecciated and lenticular geometry.

5.1. Veins Petrography

As shown in Figure 4, studied veins are classified based on their structure and mineralogy in types V₁, V₂ and V₃, hosted in metasedimentary rocks, and V₄, hosted in metamafic dykes and sill.

V1 veins type – Quartz-ankerite-pyrite-berthierite-gold (<6 m) – exhibit varied geometry and correspond to irregular lenses, which may be folded, boudinaged, and locally as pinch-and-swell structures (Fig. 4). They are usually discontinuous, parallel to the main regional foliation S_n , sheared veins, and may be mineralized in gold.

V2 veins type – Quartz-ankerite-pyrite (<3 m) – veins that develop along crenulation cleavage of S_{n+1} , they are extensional and non-mineralized in gold.

V3 veins type – Quartz-ankerite (<20 cm) – these form continuous lenses, filling S_{n+3} fractures, locally brecciated, and present saccharoidal texture. Sulphides are very rare.

V4 veins type – Quartz-calcite (<15 cm) – veins of restricted occurrence in metamafic dykes (DB1 dykes), with breccia geometry and lenticular, with no preferable orientation.

Microscopically, quartz (65-80% of total volume) and carbonates (5-20% of total volume) are the

most abundant minerals in the veins. They form fine to medium-grained (0.2-4.0 mm) euhedral and anhedral crystals, with polygonal and irregular contacts. There are two groups of quartz crystals: (i) coarse-grained, smoky quartz (Qtz I), showing evidence of deformation such as subgrain formation and undulose extinction; and (ii) granoblastic, fine-grained quartz (Qtz II), with straight extinction, rarely undulose, product of Qtz I recrystallization (Fig. 5A). Carbonates also form two groups: stained and twinned, coarse-grained crystals (Carb I); Carb II are clearer, and occur in finer-grained aggregates (Fig. 5B).

Sulphides and sulphosalts are disseminated within all vein types, forming aggregates with fine to medium-grain size. Where abundant, they constitute up to 8% of the vein's total volume. The most abundant sulphides and sulphosalts are pyrite, chalcopyrite, arsenopyrite, pyrrhotite and berthierite. Stibnite, galena, boulangerite, ullmannite, tetraedrite, argentopentlandite and cobaltite are rare and restrict occurrence to V1 vein type, which may overgrow the most abundant sulphides and sulphosalts, and are only identified via microprobe analyses.

Among the opaque minerals in vein types V1, V2 and V3, pyrite (Py) is the most common, forming fine to coarse-grained (<4.0 mm) disseminated crystals. It occurs porous and anhedral Py(I) and polygonal subhedral Py (II).

Arsenopyrite (Apy) occurs along the border of V1 veins or in thin rock chips within these veins, subparallel to the main foliation, commonly disseminated in micaceous bands of metapelites. Fine-grained crystals (0.4 mm) are represented as: anhedral masses of Apy(I) associated with pyrrhotite; euhedral fine-grained Apy (II) crystals, with clear surface and diamond-shape, overgrowing pyrite or pyrrhotite crystals (Fig. 5D and 5F).

Berthierite (Bert) is restricted to type 1 veins, and presents as disperse through all the vein, with anhedral crystals from fine to coarse-grained (<8.0 mm). Locally, it seems to overgrow carbonate and pyrite (Fig. 5E) crystals. It may contain pyrite, pyrrhotite and chalcopyrite inclusions (Fig. 5C).

Chalcopyrite (Cpy) (<0.4 mm) occurs in aggregates through the vein. It is overgrown by other mineral phases such as cobaltite (Fig. 5G), pyrrhotite and argentopentlandite.

Pyrrhotite (Po) is rare, fine to medium-grained (<0.1 mm), long and anhedral, according to the main foliation. It also occurs as irregular inclusions in pyrite crystals, or along chalcopyrite edges, where ullmannite and tetraedrite is overgrown (Fig. 5H).

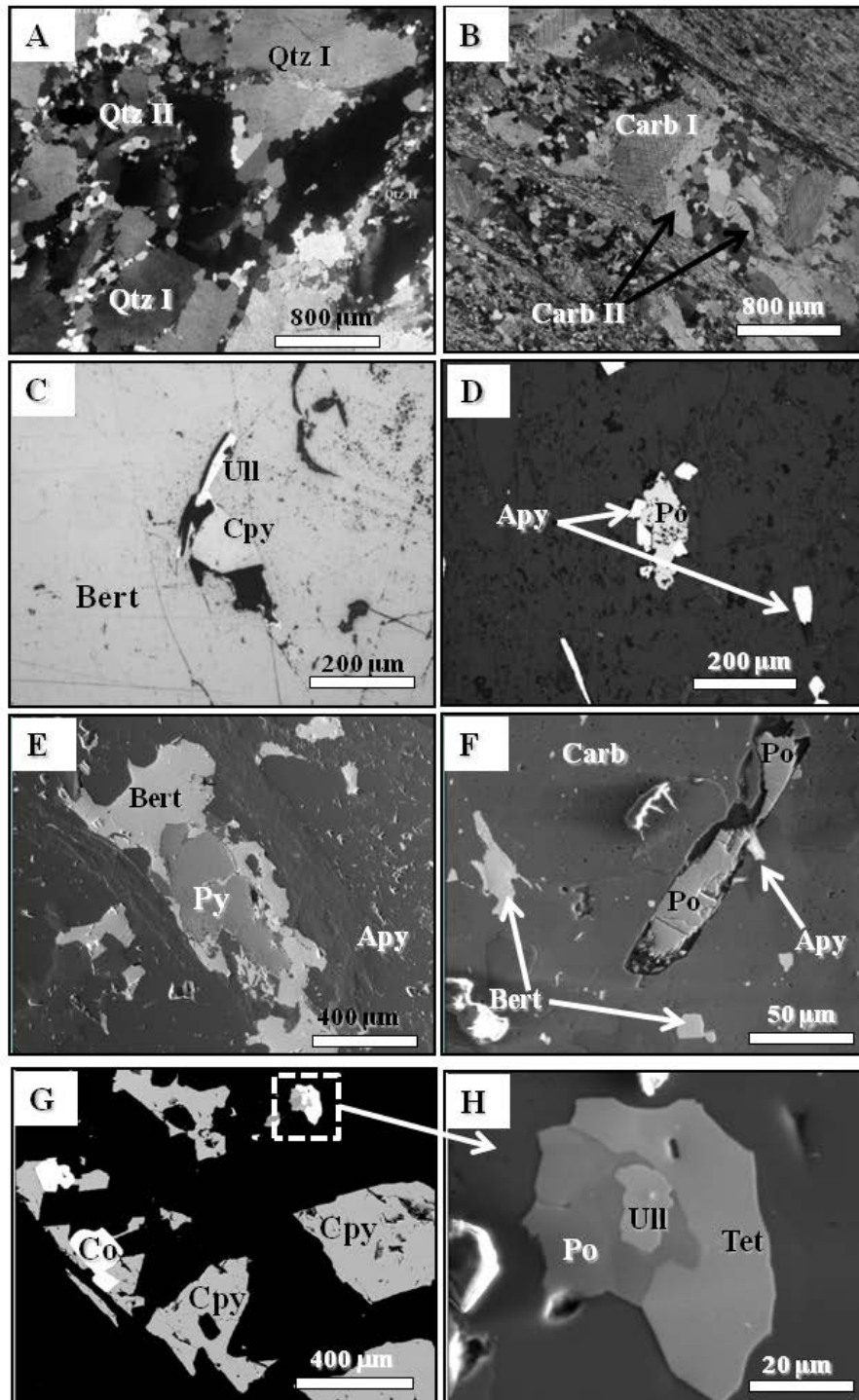


Figure 5 – Photomicrographs showing: A) Different types of quartz in V1 vein type (transmitted light, crossed nicols, 25X); B) Different types of carbonate in V1 vein type (transmitted light, crossed nicols, 25X); C) Chalcopyrite inclusion with ullmannite edge in berthierite crystals (reflected light, uncrossed nicols, 100X); D) Arsenopyrite crystals overgrowing from pyrrhotite (reflected light, uncrossed nicols, 100X). Backscattered scanning image from electron microprobe showing: E) Berthierite overgrowing porous pyrite (PyI); F) Arsenopyrite crystal overgrowing pyrrhotite, and inclusions of berthierite in carbonate; G) Cobaltite overgrowing chalcopyrite crystals; H) Detail of previous image showing pyrrhotite being replaced by tetrahedrite and ullmannite. The abbreviations correspond to: Apy – arsenopyrite; Bert – berthierite; Carb – carbonate; Co – cobaltite; Cpy – chalcopyrite; Po – pyrrhotite; Py – pyrite; Qtz – quartz; Tet – tetrahedrite and Ull – ullmannite.

Table 5 – Synthesis of vein characteristics in the Carvoaria Velha deposit.

Type		Mineralogy	Thickness	Host rock	Geometry	Orientation	Distribution and nature
Related to mineralization	V ₁	Quartz – ankerite – sulphides/ sulphosalt – gold veins	1-600 cm	Metagraywacke, schist and phyllite	<ul style="list-style-type: none"> • Lenticular in schistosity • Milimetric to centimetric folded veinlets • Pinch-and-swell 	118 / 70	<ul style="list-style-type: none"> • Parallel to schistosity to S_n * • Folded with axial plane foliation • Shear veins
Late to mineralized veins	V ₂	Quartz – ankerite-pyrite veins	2-300 cm	Metagraywacke, schist and phyllite	<ul style="list-style-type: none"> • Lenticular centimetric a metric veins 	286 / 33	<ul style="list-style-type: none"> • Parallel to schistosity S_{n+1} * • Extensional veins
	V ₃	Quartz – ankerite veins	1-20 cm	Metagraywacke, schist and phyllite	<ul style="list-style-type: none"> • Planar to fracture arrays, brecciated 	054 / 84	<ul style="list-style-type: none"> • Parallel to schistosity S_{n+3} * • Fracture veins
	V ₄	Quartz – calcite veins	1-15 cm	Metamafic dykes and sills	<ul style="list-style-type: none"> • Irregular to stockwork 		<ul style="list-style-type: none"> • Irregular • Extensional veins

*Structural events are shown in Table 4.

5.2. Mineral Chemistry

After microscopic description of the four vein types from Carvoaria Velha deposit, analyses of carbonates and main mineral phases of sulphosalts and sulphides were performed using electronic microprobe, in order to obtain their chemical composition, identifying phases that could not be defined by optical microscopy and also calculating arsenopyrite geothermometer. The following mineral phases were identified and analysed: arsenopyrite (FeAsS), berthierite (FeSb₂S₄), ullmannite (NiSbS), tetrahedrite ((Cu,Fe)₁₂Sb₄S₁₃), stibnite (Sb₂S₃), cobaltite (CoAsS), pyrite (FeS₂), pyrrhotite (FeS), chalcopyrite (CuFeS₂), argentopetlandite (Ag(Fe,Ni)₈S₈), ankerite (Ca(Fe,Mg,Mn)(CO₃)₂) e calcite (CaCO₃). Their composition are presented in tables 6 and 7.

Table 6 – Composition data obtained from electron microprobe analysis of samples from the Carvoaria Velha deposit. Values in % weight of elements. Abbreviations: Bert=berthierite, Py= pyrite, Po=pyrrhotite, Cpy=chalcopyrite, Ull=ullmannite, Tet=tetrahedrite, Stb=stibnite, Ga=galena, Co=cobaltite and Arg=argentopetlandite.

	Bert					Py				Po			Cpy		Ull	Tet		Stb	Ga	Co		Arg
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	19	20	21	22	23
S	30.07	30.13	30.07	30.30	29.01	52.80	40.21	53.60	53.64	39.11	39.83	38.92	35.42	34.89	16.34	25.33	25.51	28.22	12.92	20.35	21.13	31.78
Fe	12.89	12.42	12.89	13.60	12.27	45.54	60.72	48.91	47.81	56.18	57.91	60.84	31.14	29.56	1.33	5.94	4.61	0.31	0.18	5.22	3.44	37.14
Co	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	0.00	0.03	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.95	0.01	0.02	0.01	0.00	25.19	27.77	0.00
Ni	0.00	0.00	0.00	0.04	0.12	0.02	0.00	0.00	0.35	0.04	0.71	0.34	0.00	0.06	23.26	0.03	0.01	0.05	0.05	5.75	6.01	19.15
Cu	0.00	0.00	0.01	0.04	0.02	0.00	0.00	0.02	0.01	3.10	0.01	0.00	34.95	33.89	0.00	35.96	37.96	0.00	0.02	0.02	0.08	0.42
As	1.14	1.08	1.25	1.21	1.22	0.00	0.00	0.23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.66	0.00	0.79	1.52	0.00	43.53	42.88	0.00
Sb	56.45	56.25	56.69	56.57	55.07	2.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.27	0.00	0.00	0.00	57.04	29.87	29.11	71.40	0.00	0.11	0.00	0.00
Pb	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	84.32	0.00	0.00	0.00
Au	0.10	0.00	0.00	0.02	0.06	0.00	0.00	0.00	0.05	0.12	0.00	0.10	0.07	0.00	0.03	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Zn	0.00	0.00	0.00	0.03	0.04	0.04	0.00	0.01	0.10	0.04	0.00	0.07	0.05	0.06	0.07	2.11	2.74	0.00	0.00	0.00	0.03	0.09
Ag	0.00	0.03	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	12.42
Total	100.7	100.0	101.0	101.9	97.8	100.7	101.0	102.8	102.0	98.6	98.8	100.3	101.6	98.5	100.7	99.3	100.8	101.5	97.5	100.2	101.3	101.0

Table 7 – Composition data of arsenopyrite crystals from mineralized samples obtained from electron microprobe analysis.

%wt														
Element	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	Average
S	21.31	21.60	22.93	20.99	21.43	21.48	22.53	20.95	22.70	19.40	21.60	20.31	19.82	21.31
Fe	35.55	36.23	35.65	35.59	35.28	35.31	32.94	32.77	32.98	39.40	32.16	40.22	38.11	35.55
Co	0.00	0.00	0.00	0.54	0.63	0.00	0.30	0.15	0.29	0.16	0.09	0.10	0.10	0.18
Ni	0.00	0.00	0.03	0.10	0.13	0.02	0.35	0.38	0.23	0.15	0.07	0.14	0.21	0.14
As	42.92	41.76	41.69	43.12	43.47	43.48	43.79	46.09	43.71	39.99	45.40	39.11	41.17	42.75
Zn	0.00	0.27	0.28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.53	0.63	0.13	0.56	0.18
Total	99.78	99.86	100.62	100.38	100.94	100.29	99.91	100.34	99.91	99.63	99.95	100.01	99.97	100.12
% at														
S	0.36	0.36	0.37	0.35	0.36	0.36	0.36	0.36	0.38	0.33	0.38	0.34	0.34	0.36
Fe	0.34	0.34	0.33	0.34	0.33	0.33	0.33	0.33	0.31	0.38	0.31	0.37	0.37	0.34
Co	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ni	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
As	0.30	0.29	0.29	0.30	0.30	0.31	0.30	0.31	0.31	0.29	0.31	0.29	0.29	0.30
Zn	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
Total	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

In pyrite and pyrrhotite crystals, main detected impurities are Ni (<0.35% weight) and Zn (<0.10% weight). Spectrum in Figure 6A shows standard composition of chalcopyrite crystal, with Fe and Cu depleted edges, which results in an increase of Ni and Co (Fig 8B and C). Arsenopyrite crystals may be zoned, locally with lighter As-rich nuclei, and also showing darker nuclei, depleted in As (Fig. 8). Antimony sulphosalts (ullmannite and tetrahedrite), in addition of cobaltite, stibinite and galena, usually form from pyrrhotite and chalcopyrite alteration (Fig. 5C, 5G and 5H).

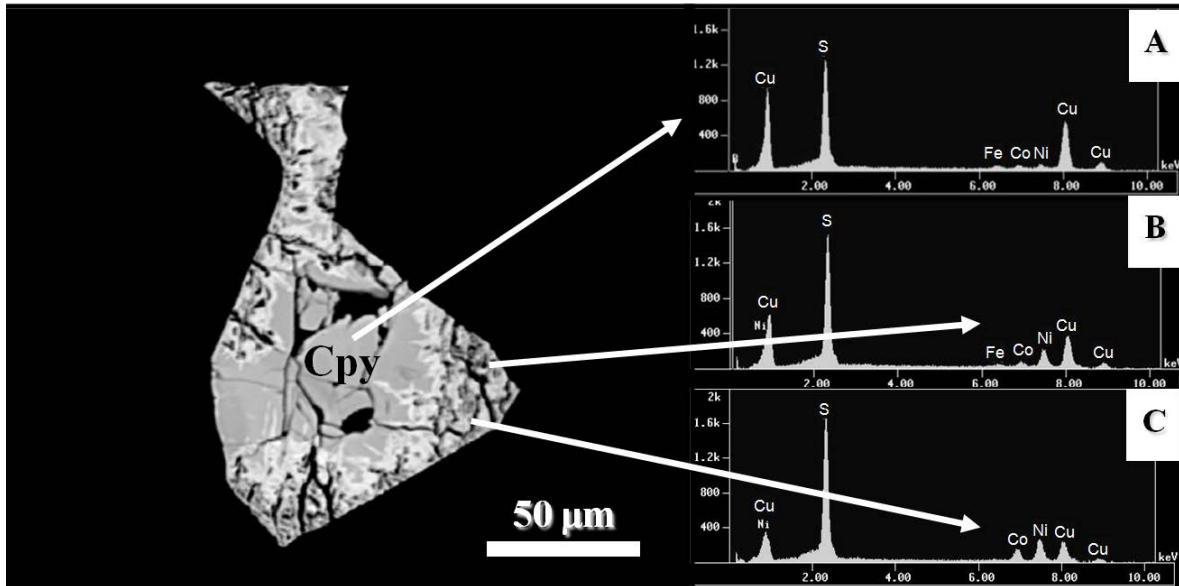


Figure 6 – Backscattered electron image showing variable composition of chalcopyrite crystal, and EDS spectra of: A) standard composition of chalcopyrite nuclei; B) and C) nickel and cobalt rich border, and Cu and Fe depletion.

Carbonate crystals were identified in all veins types. Crystal compositions in V1, V2 and V3 veins are similar, characterized as ankerite, with variations in oxide concentrations of Mn, Fe and Mg (Table 8). Analysis performed in the two carbonate groups (CarbI and CarbII) show similar compositions, presenting differences only in the crystal surface, which are slightly more porous and stained (CarbI), and the other clearer (CarbII) (Fig. 7). In the V4 veins hosted in DB1 metamafic dyke, carbonate shows calcitic composition (Table 8).

Table 8 – Main microscopic characteristics, form of occurrence and average composition of analysed carbonates using electronic microprobe.

Vein	Carbonate Type	Micro characteristic	Occurrence	Average Composition (%)			
				MgO	FeO	MnO	CaO
V1	ankerite	Anhedral to euhedral, fine to coarse- grained (<5.0mm). with pyrrhotite, pyrite and berthierite inclusions.	Shear veins	15.8	13.2	0.8	24.0
V2	ankerite	Anhedral, fine to coarse- grained (<4 mm)	Extensional veins	14.1	11.3	1.1	27.3
V3	ankerite	Anhedral, fine to coarse- grained (<4 mm), clearer and with diamond-shape and irregular contacts.	Fracture veins	13.1	11.3	1.3	27.3
V4	calcite	Anhedral to euhedral, fine to coarse- grained (4.5 mm). Clearer with diamond-shape contacts.	Extensional veins	0.0	0.8	0.8	54.6

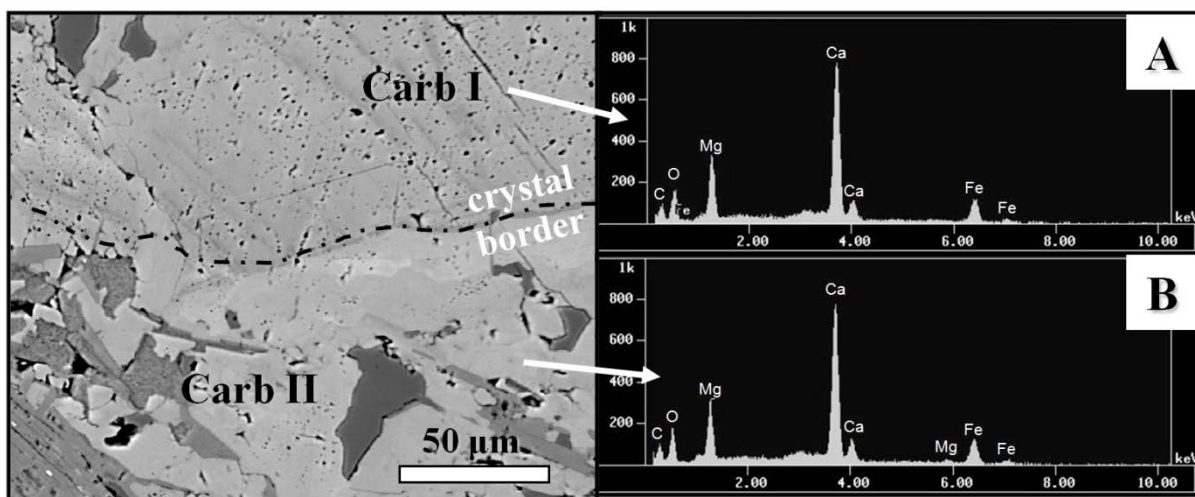


Figure 7 – Backscattered scanning image of electron microprobe, showing two textural types of carbonate, both ankerite in composition. A) EDS spectrum in stained carbonate phase; B) EDS spectrum in clear carbonate.

Geothermometer of arsenopyrite: Kretschmar and Scott (1976) proposed a “Temperature x atomic concentration of arsenic” diagram as a geothermometer to obtain the temperature of formation for arsenopyrite, considering the following premises: a) arsenopyrite must be in equilibrium with other sulphide associations (*e.g.* Py+Apy); and b) concentration of elements such as Co, Sb and Ni, in arsenopyrite, must be lower than 1 wt%.

The atomic percentages (% at.) of arsenic in arsenopyrite crystals (Fig. 8A) from mineralized portions, in equilibrium with gold particle (Fig. 8B), range from 29.2 to 31.3% at. of As (Table 7). Based on the Kretschmar and Scott (1976) diagram (Fig. 8C), these values indicate temperature of arsenopyrite formation varying from 300 to 375 °C, using the Apy+Py+Po line (Fig. 8C).

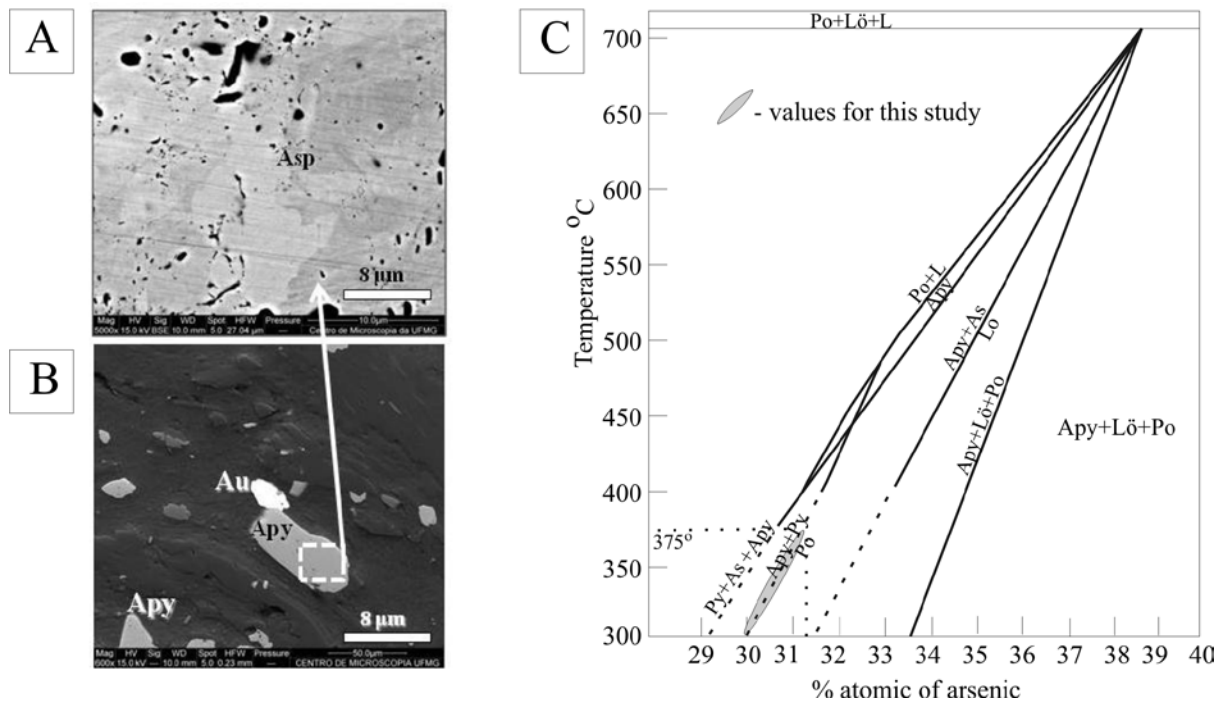


Figure 8 – A) Backscattered scanning image of arsenopyrite crystal showing compositional zoning. B) Diagram of Kretschmar and Scott (1976) showing arsenic % atomic concentration versus temperature applied for arsenopyrite geothermometer. The abbreviations correspond to: Apy – arsenopyrite; Po – pyrrhotite; Py – pyrite; Lö – loellingite.

6. Fluid Inclusions

6.1. Fluid inclusions petrography

A total of nine double polished sections from samples representing the different vein types V1, V2 and V4 which characterize the Carvoaria Velha gold deposit, where fluid inclusions (FIs) associated with the hydrothermal system were petrographically studied for microthermometry and Raman spectroscopy. Fluid inclusions are trapped in quartz crystals, which show two generations: I) QtzI: anhedral crystals, with irregular and lobate contacts, presenting strong undulose extinction with development of subgrains (Fig. 5A), crystals are coarse-grained (up to 4.0 mm), milky, as a result of high number of fluid inclusions (Fig. 9A), and of probable contribution of carbonaceous matter; and ii) QtzII: fine-grained crystals (up to 1.0 mm) with polygonal and irregular contacts, straight extinction (Fig. 5A). They occur in interstitial aggregates to QtzI quartz, and are almost fluid inclusions free (Fig. 9A).

Petrographic studies show that most inclusions are aqueous two-phase, liquid-rich with a constant proportion of liquid to vapour (L/V) ratios of 9:1. They have polygonal shapes (rectangular, squared and hexagonal), appearing locally as rounded shapes (oval, long and irregular). The average size of inclusions is from 5 to 12 μm in the longest dimension; however, some inclusions may reach up to 30 μm . Fluid inclusions are genetic classified according to their origin in relation to crystal boundaries, showing the occurrence of both, pseudosecondary and secondary fluid inclusions (Figs. 9A and B). Pseudosecondary inclusions are displayed isolated or in clusters, in random distribution in a single crystal and, locally, in discontinuous trails, without crossing crystal boundaries. These are classified as pseudosecondary, since they do not follow the crystal growth zones.

Secondary fluid inclusions are presented in continuous trails that crosscut crystals. They are two-phase aqueous inclusions, showing a variable L/V ratio between 9:1 and 8:2, having oval and irregular shapes. Locally, they are larger than pseudosecondary inclusions, with sizes up to 40 μm .

Types of fluid inclusions

Two main types of fluid inclusions (FIs) are identified based on distribution, shape, size, chemistry, and phases present at room temperature, based on microthermometric and Raman spectroscopy data: (i) type 1 – pseudosecondary and secondary aqueous-carbonic $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2\pm\text{CH}_4-\text{NaCl}$ inclusions; and (ii) type 2 – pseudosecondary aqueous $\text{H}_2\text{O}+\text{NaCl}$ inclusions. The definition of different salinity systems is based on temperatures of corresponding eutectic points, according to Goldstein and Reynolds (1994). Type 1 FIs occur in barren or mineralized quartz veins, hosted in metasedimentary rocks. Type 2 FIs are restricted to veins hosted in DB1 metamafic dykes.

A Fluid Inclusion Assemblage (FIA) is defined as the most finely discriminated fluid trapping event that can be identified based on petrography (Goldstein & Reynolds, 1994). This definition implies that all inclusions trapped in specific assemblage represent a fluid of the same composition “at the same time” and, by extension, at the same temperature and pressure (Bodnar, 2003). Based on this statement, three FIAs are identified, type 1 (aqueous-carbonic) with two subdivisions, 1a and 1b (Figs. 9C-E), and type 2 (aqueous) (Fig. 9F), as described below.

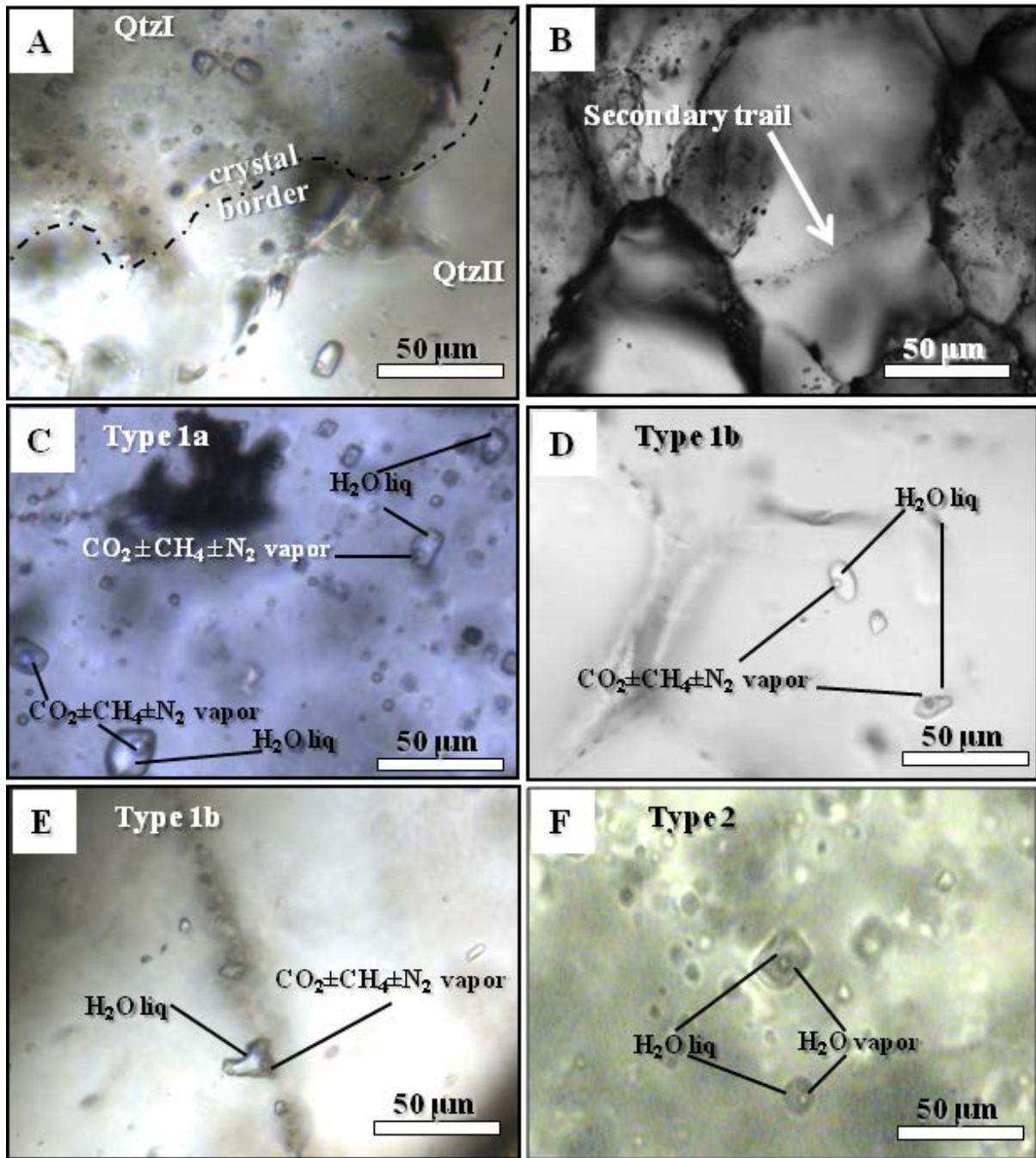


Figure 9 – Photomicrographs showing: A) Smoky (QtzI) and recrystallized quartz (QtzII) showing random orientation of pseudosecondary FIs; B) Secondary trails of fluid inclusions cross-cutting quartz grain boundary; C) Pseudosecondary type 1a inclusions (square, rectangular or oval in shape) restricted to smoky quartz QtzI; D) Pseudosecondary liquid-rich type 1b inclusions restricted to recrystallized quartz (QtzII); E) Detail showing secondary type 1b inclusions in QtzII; F) Pseudosecondary aqueous type 2 inclusions trapped in quartz from V4 vein type. Double polished sections, transmitted light, uncrossed nicols (500 X).

Type 1 – Pseudosecondary two-phase aqueous-carbonic inclusions are dominant, occurring as random clusters, and, subordinately, in discontinuous trails; secondary inclusions are subordinate. Both are trapped in quartz crystals from V1 and V2 vein types. Raman spectroscopy revealed that

carbonic phase in inclusions type 1 is composed of CO₂, CH₄ and traces of N₂ (Fig. 9); HS⁻, H₂S and others hydrocarbons are not detected.

Type 1a – Pseudosecondary inclusions and restricted to smoky quartz QtzI (Fig. 9C). They are prismatic in shape (square, rectangular and hexagonal), and locally rounded and oval, ranging in size from 5 to 20 μm, with constant liquid/gas ratio of approximately 9:1. It is possible to observe some three-phase inclusions with minute irregular and anisotropic crystals. However, no dissolution of the crystals was observed, therefore these were not considered as daughter minerals.

Type 1b – Mainly pseudosecondary inclusions restricted to recrystallized quartz QtzII (Fig. 9D), and, locally, forming continuous trails throughout crystals edge, being therefore secondary (Fig. 9E). They correspond to rounded and irregular shaped inclusions, varying in size from 5 to 40 μm, two-phase inclusions at room temperature with liquid/gas ratios of 9:1, and less variable liquid/gas ratio between 7:3. They are less abundant than type 1a. It is possible to observe necking down due to typical deformation of recrystallized quartz.

Type 2 – Pseudosecondary two-phase aqueous inclusions at room temperature, with proportion of liquid/vapour volume of 9:1. They occur in clusters nearing the centre of quartz crystals, with sizes up to 20 μm (Fig. 9F). Raman spectroscopy revealed that vapour phase is composed only by H₂O.

6.2. Microthermometry results

Figure 10 displays microthermometry data, including temperature measurements of initial ice melting (T_e), initial melting of CO₂ phase (T_{mCO₂}), final melting of ice (T_{mice}), final melting of clathrate (T_{mC}), homogenization within CO₂ phase (Th_{CO₂ L-V}) and total homogenization or decrepitation of inclusion contents (Th_{TOT}). The main phase transitions obtained for types 1 and 2 inclusions during microthermometry procedure and the information provided by them are summarized in table 9.

Table 9 – Main phase transitions observed for each type of fluid inclusion and their corresponding information.

FI Type	Type of phase transition	Information
1	CO ₂ melting	Carbonic phase composition
1	CO ₂ homogenization	Density of carbonic phase
1	(T _{mC}) Clatrate melting	Salinity of aqueous phase
1* e 2	Homogenization temperature (Th _{TOT}) or decrepitation (T _d)*	Minimum temperature of formation
2	Final ice melting (T _{m ice})	Salinity of aqueous phase

*=Most part of Type 1 inclusions decrepitate before total homogenization.

Freezing – Type 1 inclusions show low temperatures of initial melting (T_e), between -48.0 to -36.0 °C (Fig. 10), with an average of -43.0 °C, indicating the presence of other cation complexes, such as Fe^{2+} , Mg^{2+} and Ca^{2+} ; additional to Na^+ (Borisenko, 1977 in Goldstein & Reynolds, 1994). Clatrate melting temperatures range from 2 to 9 °C, with an average of 4.6 °C for type 1a FIA and average of 6.3 °C for type 1b FIA. Values of CO₂ melting temperature range from -65.3 °C to -57.0 °C, suggesting presence of other volatile species besides CO₂, as also indicated by the Raman microscopy. Type 2 inclusions have initial melting temperature (T_e) from -55.0 to -45.0 °C (Fig. 10), indicating presence of other cation complexes additional to Na^+ , such as Fe^{2+} , Mg^{2+} and Ca^{2+} . Final ice melting temperatures ($T_{m ice}$) are lower to those of type 1, ranging from -17.0 to -7.8 °C.

Heating – All type 1 inclusions show an increase of size in the carbonic phase at temperatures over 250 °C, indicating homogenization into vapor. However, their majority decrepitate before total homogenization, with decrepitation temperatures (T_d) between 260 and 340 °C, and averages of $T_d = 283$ °C and 315 °C for types 1a and 1b FIAs, respectively (Figs. 11A-C). Only a few type 1b FIA ($n=6$) present total homogenization temperature to vapour ($Th_{tot L-V}$), with a range of 420 to 460 °C. Inclusions type 2 show homogenization into the liquid ($L + V \rightarrow L$) with temperatures between 174 to 215 °C (Fig. 11D).

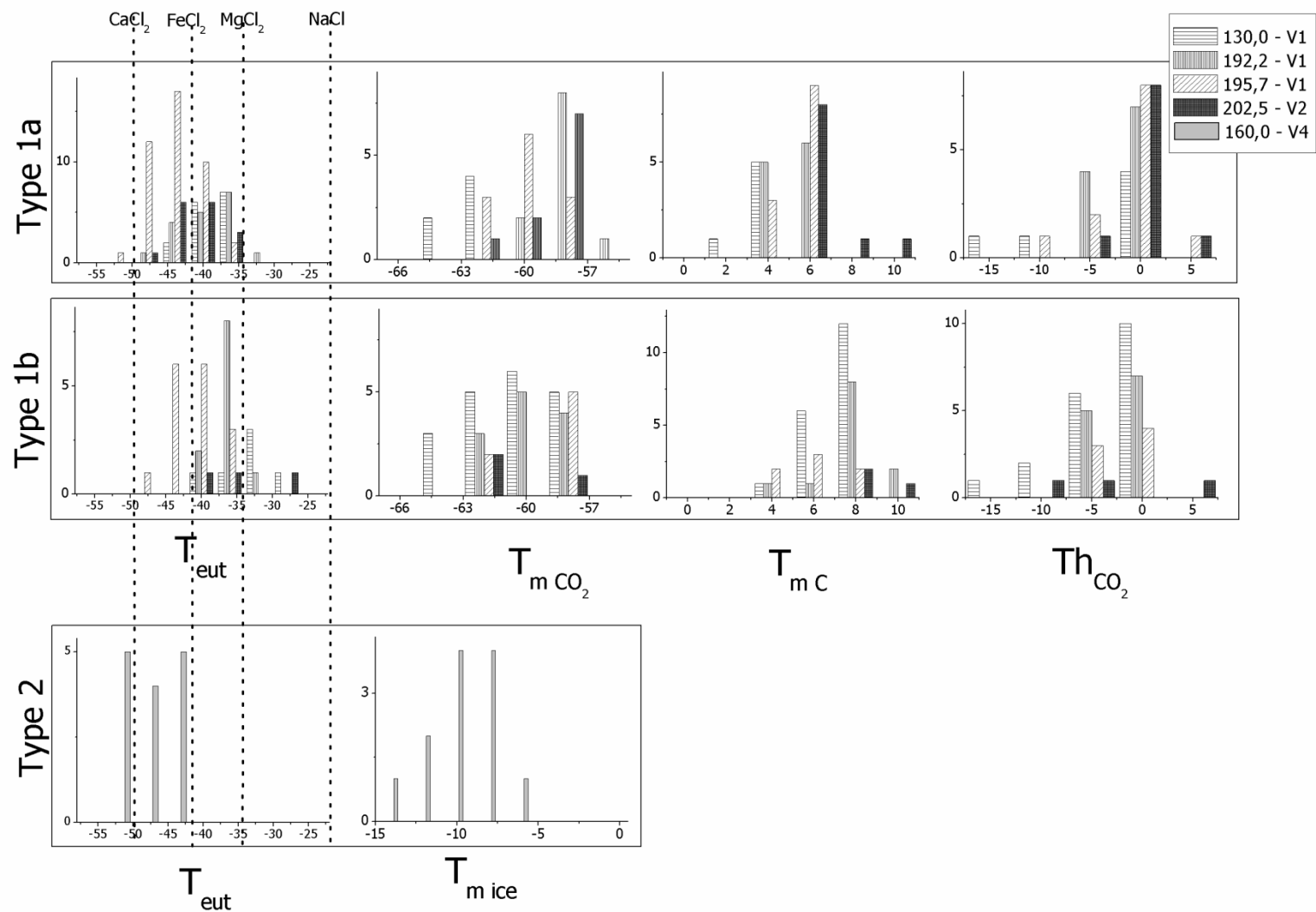


Figure 10 – Histograms showing microthermometric characteristics of fluid inclusions trapped in quartz veins from Carvoaria Velha deposit. Microthermometry data includes initial and final ice temperature (T_e and $T_{m ice}$, respectively), CO_2 melting temperature ($T_{m CO_2}$), clatrate melting ($T_{m Cl}$), CO_2 homogenization temperature (Th_{CO_2}).

Table 10 – Microthermometry data for V1, V2 and V4 veins of the Carvoaria Velha deposit. Mean and standard deviation (1σ) values are shown for $N > 3$ in the second line of each sample/area.

Sample/Area	Vein type	FIA	N	Eq. Wt% NaCl	T_{mCO_2}	T_e	$Th_{tot\ L-V}$	Th_{CO_2}	$T_{m\ ice}$	T_{mC}
130,00 – area A	V1	1b	5	7.1 to 11.7 9.2±1.9	-63.0 to -57.0 -60.3±3.1	-29.5 to -44.0	300 to 380 356±32	-1.0 to 2.0 -0.3±1.5	-3.0 to -0.3 -1.2±1.0	3.0 to 6.0 4.7±1.5
130,00 – area A	V1	1b	3	1.3 to 9.4 6.4±2.8	-61.0 to -59.0 -60.0±1.0	-43.0 to -38.0	350 to 460 386±63	-7.0 to -3.0 -5.0±2.0	-3.2 to -7.0 -6.1±2.5	4.0 to 5.5 4.5±0.7
130 – Area B	V1	1b	10	2.2 to 7.6 4.8±1.8	-59.0 to -63.0 -61.0±1.8	-44.0 to 33.0	259 to 355 307±34	-6.0 to -1.0 -3.7±2.5	-7.0 to -2.5 -4.52±1.5	5.0 to 8.5 6.6±1.0
130,00 – area B5	V1	1b	4	0.4 to 3.4 1.6±1.6	-59.0 to -61.5 -60.0±1.3	-46.5 to -40.0	350 to 355 351±2	-6.0 to -3.0 -4.3±1.5	-6.0 to -3.0 -4.7±1.3	7.0 to 8.0 7.5±0.5
130,00 – area C1	V1	1a	8	6.7 to 13.2 10.5±2.2	-68.0 to -63.5 -64.6±2.1	-43.0 to -38.5	261 to 341 290±27	-11.5 to 0.5 6.7±7.8	-7.0 to -0.1 -1.6±2.43	2.0 to 4.0 3.08±1.08
130,00 – area C1	V1	1b	4	8.3 to 12.1 10.6±1.7	-65.0 to -63.0 -64.0±1.0	-42.0 to -33.0	220 to 297 276±37	-1.0 to 2.0 0.0±1.7	-8.0 to -3.0 -5.9±2.1	3.0 to 4.0 3.3±0.6
130,00 – area C2	V1	1b	8	0.1 to 3.4 1.0±1.2	-65.3 to -64.9.0 -65.1±0.28	-47.5 to -41.0	285 to 300 291±5	-15.0 to -3.0 -9.3±6.0	-7.0 to -3.5 -4.94±1.09	6.5 to 8.5 7.3±0.7
192,20 – area A	V1	1b	4	1.3 to 9.4 6.4±2.8	-62.0 to -58.0 -60.0±2.8	-48.0 to -34.0	300 to 458 391±78	-3.9 to -8.0 -5.9±2.9	-8.0 to -3.0 -4.9±2.1	4.0 to 10.0 7.3±3.1
192,20 – area B1	V1	1a	6	7.7 to 9.6 8.6±0.8	-59.0 to -57.0 -58.2±0.9	-38.0 to -34.0	261 to 274 265±11	-6.0 to -0.5 3.4±2.6	-2.8 to -1.0 -2.1±0.7	3.8 to 5.0 4.4±0.5
192,20 – area B1	V1	1b	6	0.8 to 6.0 2.4±2.1	-60.0 to -57.0 -58.7±1.5	-50.0 to -34.0	252 to 287 270±11	-10.0 to -6.0 8.0±2.8	-4.0 to 0.0 -2.4±1.7	5.0 to 8.7 7.0±1.4
192,20 – area C1	V1	1b	6	0.1 to 0.2 0.1±0.1	-61.0 to -58.0 -59.5±2.1	-44.0 to -33.0	290 to 327 305±17	-10.0 to -4.0 -7.6±2.6	-2.5 to 0.0 -1.0±1.0	7.9 to 9.0 8.5±0.8
192,20 – area C1	V1	1b	5	0.1 to 1.3 0.7±0.7	-62.0 to -58 -60.0±2.0	-46.0 to -33.0	290 to 350 312±26	-5.0 to -3.0 -4.3±1.1	-2.0 to -0.4 -1.2±0.7	7.5 to 8.5 8.0±0.4

Abbreviations: $T_{m\ CO_2}$ – melting temperature of CO_2 , $T_{m\ Cl}$ – clatrate melting temperature, $Th_{CO_2\ L-V}$ – CO_2 homogenization temperature with transition from liquid to gas, $Th_{TOT\ V-L}$ – total homogenization temperature from vapour to liquid phase, $T_{m\ ice}$ – ice final melting temperature, T_e – eutectic temperature, N – measurement value.

Table 10 (Continued)

Sample/Area	Vein type	FI type	N	Eq. Wt% NaCl	T _{mCO2}	T _e	Th _{tot L-V}	Th _{CO2}	T _{m ice}	T _{mC}
192.20 – area C2	V1	1b	5	1.0 to 4.2 2.7±1.4	-62.0 to -59.0 -60.0±1.2	-47.7 to -38.5	283 to 459 330±73	-5.7 to -2.5 -4.02±1.2	-2.8 to -0.3 -1.4±1.1	6.5 to 8.5 7.5±0.9
192.20 – area D	V1	1a	10	6.1 to 10.7 8.7±1.4	-60.0 to -58.5 -59.1±0.5	-46.0 to -38.0	268 to 298 284±10	-6.0 to -2.0 -4.3±1.7	-6.0 to -2.0 -4.3±1.7	3.5 to 6.0 4.5±0.9
195.70 – area A	V1	1a	8	7.9 to 10.0 8.9±0.9	-62.0 to -58 -60.0±1.4	-52 to -44	277 to 310 283±12	-3.0 to -2.0 -2.5±0.5	-3.0 to -0.5 -1.6±0.8	3.5 to 5.0 4.3±0.6
195.70 – area A	V1	1b	7	0.8 to 9.6 5.3±3.6	-59.0 to -58.0 -58.5±0.7	-48.0 to -35.5	260 to 352 299±38	-3.0 to -2.0 -2.5±0.5	-5.0 to -0.8 -1.7±1.6	5.0 to 8.0 6.5±2.1
195.70 – area B	V1	1a	12	5.0 to 9.7 7.9±1.9	-62.0 to -59.0 -60.5±2.1	-49.5 to -41.0	268 to 320 287±17	-10.0 to 1.0 -4.0±5.6	-2.0 to -0.2 -0.9±0.7	3.0 to 5.0 4.0±0.8
195.70 – area B	V1	1b	6	4.3 to 7.9 6.6±2.0	-63.5 to -59.0 -61.8±2.5	-52.8 to -44.0	355 to 280 323±32	-9.0 to -6.5 -7.5±1.3	-3.0 to -0.8 -1.8±0.8	5.0 to 10.0 7.5±2.7
195.70 – area B	V1	1b	14	0.4 to 6.2 2.8±2.4	-64.0 to -59.0 -61.4±1.6	-53.0 to -37.5	220 to 300 252±28	-13.0 to -5.0 -9.4±3.5	-7.6 to -1.5 -5.03±1.8	5.0 to 8.0 6.65±0.9
202.50 – area A	V2	1a	4	0.1 to 9.3 3.3±5.3	-62.0 to -58.0 -59.3±1.9	-49.0 to -43.0	278 to 325 300±21	-3.8 to 2.0 -0.8±2.91	-2.8 to -1.0 -2.08±0.8	4.5 to 9.0 7.1±1.9
202.50 – area B	V2	1a	8	5.7 to 8.6 7.3±1.2	-59.0 to -58.0 -58.3±0.6	-47.0 to -36.0	277 to 288 281±4	-4.8 to -1.0 -3.2±2.0	-2.8 to -1.0 -2.08±0.8	2.0 to 6.0 4.5±1.7
202.50 – area C	V2	1a	3	4.7 to 8.1 6.9±2.0	-60.5 to -58.0 -59.2±1.3	-43.5 to -36.0	278 to 310 291±16	-4.8 to -1.0 -3.2±2.0	-10 to -2.0 -4.7±4.6	5.0 to 6.0 5.3±0.6
202.50 – area C	V2	1b	3	1.3 to 3.5 2.3±1.1	-62.0 to -59.0 -61.0±1.7	-40.0 to -29.5	298 to 380 349±44	—	-2.5 to -0.8 -1.4±0.9	7.0 to 8.5 7.8±0.7
160.00 – area A	V4	2	6	11.5 to 17.8 14.4±2.4	—	-55.0 to -44.0	174 to 211* 193±17	—	-14.0 to -7.8 -10.4±2.65	
160.00 – area B	V4	2	5	11.7 to 20.9 16.1±4.6	—	-54.5 to -45.0	180 to 212* 200±15	—	-17.0 to -8.0 -12.1±4.4	
160.00 – area C	V4	2	3	12.9 to 16.0 14.4±1.6	—	-55.5 to -45.5	180 to 215* 201±19	—	-12.0 to -9.0 -10.5±1.5	

*Type 2 FIAs homogenize into liquid

Table 11 – Microthermometric data of aqueous-carbonic inclusions (types 1a and 1b FIAs) and aqueous inclusions (type 2).

Sample/Area	Vein type	FIA	N	Bulk Density	X H ₂ O	X CO ₂	X CH ₄	X NaCl
130.00 – area A	V1	1b	5	1.00 to 1.05 1.03±0.03	0.90 a 0.94	0.03 a 0.06	<0.01	0.02 a 0.04
130.00 – area A	V1	1b	3	1.03 to 1.06 1.04±0.01	0.94 a 0.95	0.02 a 0.04	<0.01	0.02 a 0.03
130 - Area B	V1	1b	10	0.97 to 1.02 1.00±0.02	0.93 a 0.95	0.02 a 0.06	<0.02	0.01 a 0.02
130.00 – area B5	V1	1b	4	0.98 to 0.99 0.99±0.01	0.91 a 0.96	0.03 a 0.07	0.01 a 0.03	0.00 a 0.01
130.00 – area C1	V1	1a	8	0.98 to 1.07 1.02±0.03	0.91 a 0.95	0.31 a 0.50	0.01 a 0.02	0.02 a 0.04
130.00 – area C1	V1	1b	4	0.95 to 1.06 1.02±0.05	0.90 a 0.94	0.01 a 0.05	0.01 a 0.02	0.03 a 0.04
130.00 – area C2	V1	1b	8	0.92 to 0.98 0.96±0.03	0.91 a 0.97	0.02 a 0.06	0.01 a 0.03	0.00 a 0.01
192.20 – area A	V1	1b	4	0.99 to 1.06 0.99±0.03	0.92 a 0.98	0.01a 0.06	<0.01	0.00 a 0.03
192.20 – area B1	V1	1a	6	1.05 to 1.07 1.06±0.01	0.93 a 0.96	0.01 a 0.04	<0.01	0.00 a 0.03
192.20 – area B1	V1	1b	6	0.97 to 1.03 1.01±0.02	0.94 a 0.98	0.02 a 0.04	<0.01	0.00 a 0.02
192.20 – area C1	V1	1b	6	0.97 to 1.03 0.99±0.01	0.94 a 0.98	0.02 a 0.98	<0.01	0.00 a 0.00
192.20 – area C1	V1	1b	5	0.98 to 1.00 0.99±0.01	0.98 a 0.98	0.01 a 0.02	<0.01	0.00 a 0.00
192.20 – area C2	V1	1b	5	0.97 to 1.02 1.00±0.03	0.93 a 0.97	0.02 a 0.06	<0.01	0.00 a 0.01
192.20 – area D	V1	1a	10	1.04 to 1.08 1.06±0.01	0.93 a 0.96	0.02 a 0.04	<0.01	0.02 a 0.04
195.70 – area A	V1	1a	8	1.02 to 1.06 1.05±0.01	0.89 a 0.96	0.01 a 0.97	< 0.01	0.02 a 0.03
195.70 – area A	V1	1b	7	0.99 to 1.05 1.02±0.02	0.91 a 0.94	0.04 a 0.06	<0.01	0.00 a 0.03
195.70 – area B	V1	1a	12	1.03 to 1.06 1.05±0.02	0.93 a 0.97	0.01 a 0.97	<0.01	0.02 a 0.03
195.70 – area B	V1	1b	6	1.02 to 1.05 1.03±0.02	0.94 a 0.96	0.01 a 0.04	<0.01	0.01 a 0.03
195.70 – area B	V1	1b	14	0.95 to 1.03 1.00±0.03	0.92 a 0.98	0.01 a 0.06	<0.02	0.00 a 0.02
202.50 – area A	V2	1a	4	0.94 to 1.05 0.99±0.06	0.93 a 0.96	0.03 a 0.06	<0.01	0.00 a 0.03
202.50 – area B	V2	1a	8	1.03 to 1.05 1.04±0.02	0.93 a 0.96	0.02 a 0.04	<0.01	0.02 a 0.03
202.50 – area C	V2	1a	3	1.02 to 1.05 1.04±0.02	0.94 a 0.96	0.02 a 0.04	<0.01	0.01 a 0.03
202.50 – area C	V2	1b	3	0.99 to 1.00 0.99±0.01	0.96 a 0.96	0.02 a 0.04	<0.01	0.00 a 0.01
160.00 – area A	V4	2	6	0.96 to 1.00 0.98±0.02	–	–	–	–

160.00 – area B	V4	2	5	0.97 to 1.00 0.99±0.02	–	–	–	–
160.00 – area C	V4	2	3	0.97 to 0.98 0.97±0.01	–	–	–	–

6.3. Quantitative estimation of fluid inclusions composition

Salinity, composition and density estimates of aqueous and carbonic phases were calculated using MacFlinCor software (Brown and Hageman, 1995). Equations of state by Jacobs and Kerrick (1981) were applied to type 1 FIAs ($H_2O-CO_2\pm CH_4-NaCl$), and equations by Bodnar and Vityk (1994) for type 2 FIAs ($H_2O-NaCl-KCl$). A summary of data is presented in table 10. The relative proportions of CH_4 and CO_2 were estimated using the graphic method by Thiéry et al. (1994).

Type 1 inclusions present variable salinity values, with average of 8.2 eq. wt% NaCl for type 1a FIA and 4.1 eq. wt% NaCl for type 1b FIA (Figs. 11A-C). Type 2 FIA is the most saline, with average values of 14.9 eq. wt% NaCl (Fig. 11D and Table10). Type 1 inclusions are H_2O -rich containing between 89 to 98 mol% of H_2O (Table 11). Types 1a and 1b show variable proportions of carbonic phase, considering that CO_2 is the predominant phase, having similar average values (3.1 mol%) for the two FI types, reaching maximum values of 6.0 and 7.4 mol%, respectively. Concentrations of CH_4 are more variable, showing relative higher enrichment when compared to CO_2 in type 1b FIA (<3.2 mol%) than in type 1a FIA (<1.8 mol%).

Total density range from 0.95 to 1.07 g/cm^3 , and 0.96 to 1.01 g/cm^3 , for types 1 and 2, respectively. Type 1a inclusions are slightly denser, average of 1.04 g/cm^3 , than type 1b (1.01 g/cm^3 ; Table 11).

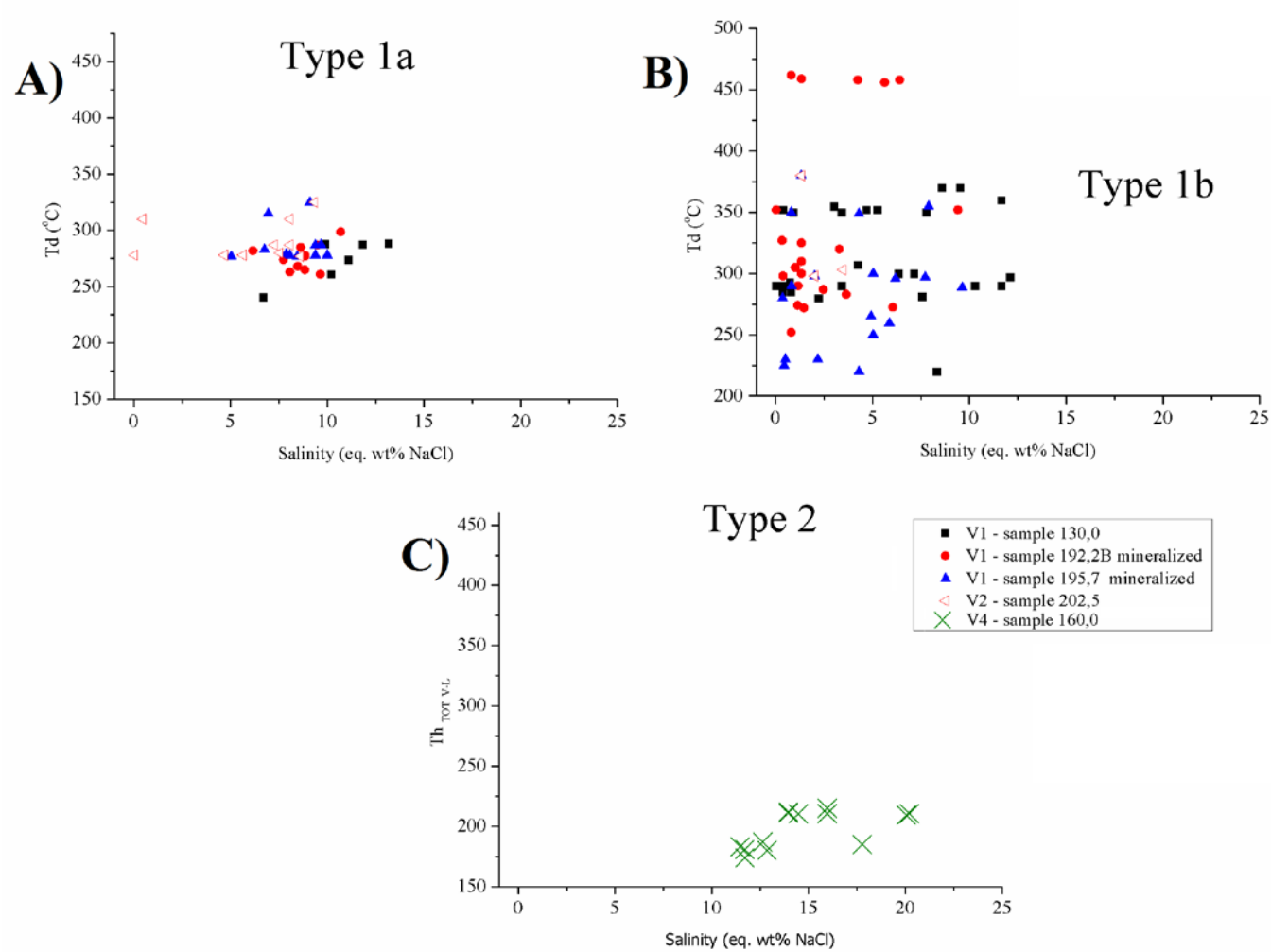


Figure 11 – Diagram showing salinity versus decrepitation temperature (Td) for inclusions: A) type 1a; B) type 1b; and salinity x temperature of total homogenization $Th_{tot\ L-V}$ of C) type 2 inclusions.

7. Stable Isotopes

7.1. Oxygen stable isotopes

Samples for oxygen stable isotopes analyses were selected from the four veins types V1, V2, V3 and V4. A total of 105 in situ measurements were performed in QtzI and QtzII crystals, in order to identify possible isotopic variations among them. Values of $\delta^{18}\text{O}$ measured from V1, V2, and V3 veins hosted in metasedimentary rocks vary from +18.0 to +14.5‰, and V4 veins (n=14) hosted in DB1 metamafic dykes, vary from +15.9 to +14.5‰ (Fig. 12A and Table 12). The temperature of equilibrium for the calculation of fluid isotopic composition ($\delta^{18}\text{O}_{\text{fluid}}$) was estimated using homogenization and/or decrepitation temperatures (T_{TOT} and T_{d} , respectively), in the equation of state by Matsuhisa et al. (1979). These calculated values are similar for V1, V2 and V3 vein types, and they comprise an interval of +7.9 and +13.0‰, with an average of +9.7, +8.9 and +9.4‰, respectively (Fig. 12A and Table 12). In the case of V4 vein type, values are lower, from +2.6 to +4.1‰, with an average of +3.2‰ (Table 12).

Table 12- Oxygen isotope composition of quartz from different vein types at Carvoaria Velha deposit, obtained using ionprobe SIMS 1280.

Sample	Vein type	N	$\delta^{18}\text{O}$ (‰ SMOW)				Thtot or Td	$\delta^{18}\text{O}_{\text{fluid}}$			
			max	min	average	standard deviation		max	min	average	standard deviation
84,40	V1	7	+18,0	+15,9	+16,9	0,9	307,5	+11,4	+9,3	+10,3	0,8
95,00		14	+16,2	+15,6	+15,9	0,2	307,5	+9,6	+9,0	+9,3	0,2
130,80		16	+16,1	+15,5	+15,8	0,2	324,9	+10,1	+9,5	+9,8	0,2
192,20B		6	+16,2	+15,7	+16,0	0,2	317,6	+9,9	+9,4	+9,7	0,2
195,70		10	+17,3	+16,6	+17,0	0,3	280,0	+9,6	+9,0	+9,4	0,3
202,50	V2	12	+16,9	+15,6	+16,2	0,4	304,4	+10,2	+8,9	+9,5	0,4
169,63	V3	12	+19,6	+14,5	+15,8	1,8	307,5	+13,0	+7,9	+9,2	1,8
139,50		14	+16,4	+14,5	+15,7	0,3	307,5	+9,8	+8,4	+9,1	0,3
150,00	V4	14	+15,9	+14,5	+15,1	0,5	196,4	+4,1	+2,6	+3,2	0,5

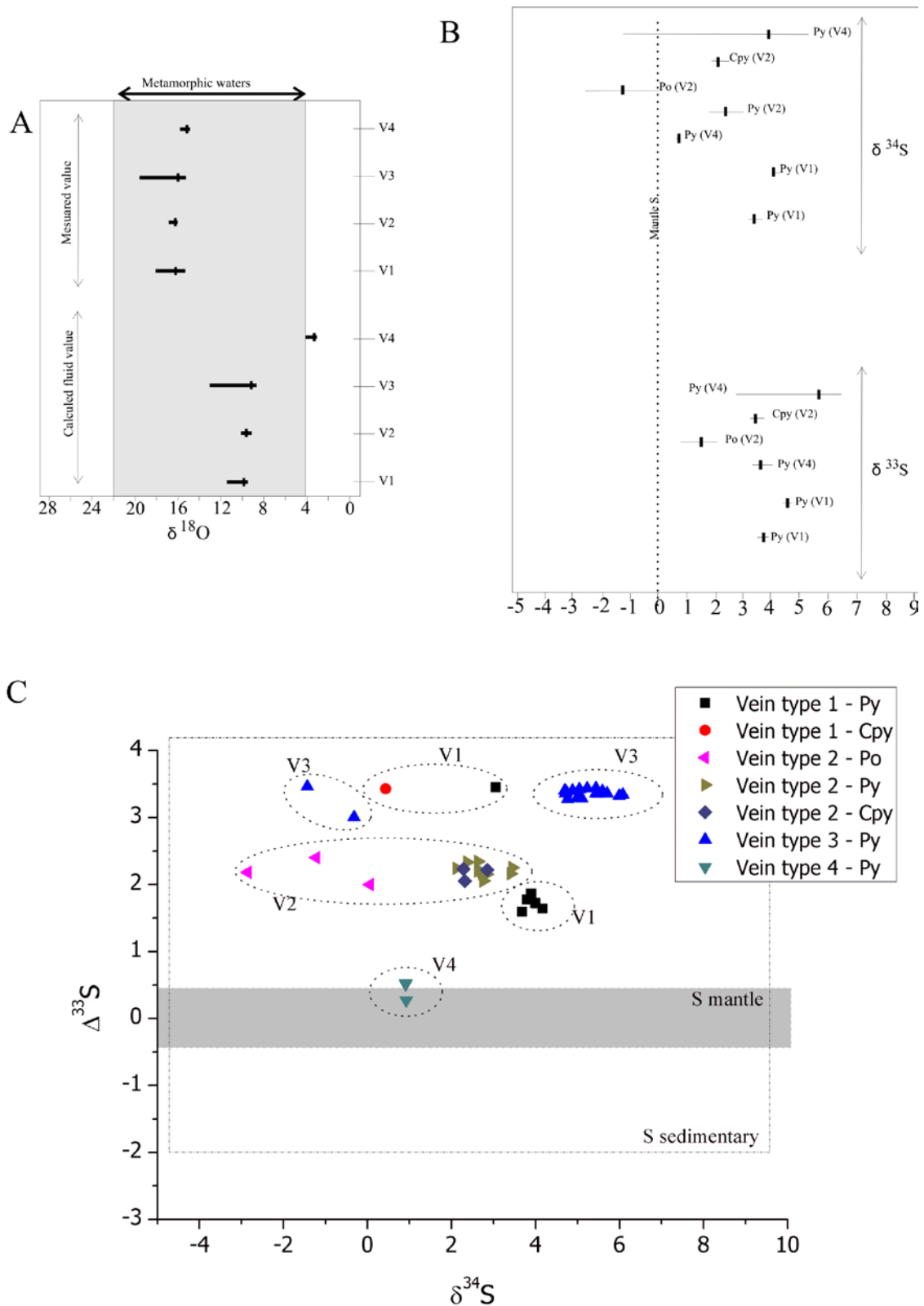


Figure 12 – A) Diagram showing oxygen isotope values ($\delta^{18}O$ and $\delta^{18}O_{\text{fluid}}$) of quartz crystals from V1, V2, V3 and V4 vein types; $\delta^{18}O_{\text{fluid}}$ according to equations of Matsuhisa et al. (1979) for quartz (T from 196 to 318 °C). B) Diagram showing sulphur isotopes values ($\delta^{33}S$ and $\delta^{34}S$) of sulphides. C) Plot of $\delta^{34}S$ vs. $\Delta^{33}S$ data for the studied samples. $\Delta^{33}S$ values are calculated used $\Delta^{33}S = \delta^{33}S - 1000 \times [(1 + \delta^{34}S/1000)^{0.515} - 1]$ (Faquhar 2002).

7.2. Sulphur stable isotopes

In situ analyses of sulphur isotopic composition ($\delta^{34}\text{S}$) were performed in eight samples representative of V1 and V4 veins, and in sulphides along the contact of V2 and V3 veins. A total of 71 measurements were made in crystals of arsenopyrite, pyrite, berthierite, chalcopyrite, and pyrrhotite (Table 13). Sulphides and sulphosalts in V1 mineralized veins show average values of $\delta^{34}\text{S} = +4.3\text{‰}$ for pyrite, and $+0.4\text{‰}$ for chalcopyrite (Fig. 12B). Sulphides from carbonaceous schist, growth along the contact with V2 veins have values of $\delta^{34}\text{S} = +2.8\text{‰}$ for pyrite, -1.3‰ for pyrrhotite, and $+2.5\text{‰}$ for chalcopyrite. Pyrite crystals from carbonaceous schists, formed along the contact with V3 vein presents average value of $\delta^{34}\text{S} = +4.6\text{‰}$. In V4 veins hosted in DB1 metamafic dyke, pyrite crystals show values of $\delta^{34}\text{S}$ around $+0.9\text{‰}$ (Fig. 12B).

Sulphides and sulphosalt in V1 mineralized veins have average values of $\delta^{33}\text{S} = +4.2\text{‰}$ for pyrite, and $\delta^{33}\text{S} = +3.6$ for chalcopyrite (Fig. 12 and Table 13). Sulphides that were formed in the carbonaceous schist along the contact with V2 veins have values of $\delta^{33}\text{S} = +3.6\text{‰}$ for pyrite, $+1.5\text{‰}$ for pyrrhotite, and $+3.4\text{‰}$ for chalcopyrite. Pyrite crystals formed in carbonaceous schist along the contact with V3 veins show average value of $+5.7\text{‰}$. In the V4 veins hosted in DB1 metamafic dyke, pyrite presents values of $\delta^{33}\text{S} = +1.0\text{‰}$ (Fig. 12 and Table 13). Results of mass independent $\Delta^{33}\text{S}$ for sulphides of the V1 veins hosted in metasedimentary rocks vary from $+0.27$ to $+3.46\text{‰}$ (Fig. 12B-C).

Table 13 – Composition of sulphur isotopes of chalcopyrite, pyrite and pyrrhotite from Carvorria deposit veins, obtained using ionprobe SIMS 1280.

Vein type	Sample	Mineral	N	mass independent: $^{33}\text{S}/^{32}\text{S}$				$^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$			
				max	min	average	standard deviation	max	min	average	standard deviation
V1	84.40	Py	6	+3.9	+3.5	+3.7	+0.1	+4.2	+3.7	+3.9	+0.2
	95.00	Py	1	+5.1	–	–	–	+3.1	–	–	–
		Cpy	1	+3.6	–	–	–	+0.4	–	–	–
	195.70	Py	6	+4.7	+4.4	+4.6	+0.1	+4.8	+4.5	+4.7	+0.1
V4	150.00	Py	3	+1,0	+0,7	+0,9	+0,1	+0.9	+0.7	+0.9	0.0
Xisto V2	202.50	Py	10	+4.0	+3.3	+3.6	+0.2	+3.4	+2.1	+2.8	+0.4
	202.50	Po	3	+2.0	+0.7	+1.5	+0.7	+0.1	-2.9	-1.3	+1.5
	202.50	Cpy	3	+3.7	+3.2	+3.4	+0.2	+2.9	+2.3	+2.5	+0.3
Xisto V3	139.50	Py	18	+6.5	+2.7	+5.7	+1.1	+6.1	-1.4	+4.6	+2.0

8. Discussions and conclusions

Data interpretation based on detailed petrography, FI and stable isotope analyses on four major types of quartz \pm carbonate \pm sulphides \pm sulphosalts veins located at the Carvoaria Velha gold deposit, Córrego do Sítio lineament, revealed a complex fluid evolution, presented as

following.

8.1. Petrography of veins

Veins represent a complex structural arrangement. They are classified in four main types, V1, V2, V3 and V4 (Fig. 5), based on structural and mineralogical observations: V1 veins – quartz-ankerite-sulphides-sulphosalts-gold – parallel to the main regional foliation S_n , and usually mineralized in gold; V2 veins – quartz-ankerite-sulphides – developed at the crenulation cleavage S_{n+1} , extensional and rarely gold mineralized; V3 veins – quartz-ankerite – filling S_{n+3} fractures, usually free of sulphides and sulphosalts; V4 veins – quartz-calcite – of restricted occurrence in DB1 metamafic dykes and sills; they crosscut the metasedimentary sequence, are extensional and display no preferential orientation. The V1 vein type corresponds to the earliest vein family and is related to the mineralization event, containing gold ore that can both occur as free gold and as subordinate gold inclusions in sulphides. Based on crosscutting field observations, in chronological order V1 is followed by V2 and V3 veins, both of which are sulphosalt free.

The V1, V2 and V3 veins contain smoky (QtzI) and recrystallized quartz (QtzII), both analysed for FI studies. Textural features in QtzI, such as lobate edges, coarse-grained crystals, subgrain formation and presence of undulose extinction are suggestive of dynamic recrystallization according to Passchier and Trouw (2005). The QtzI crystals contain numerous FIs (Fig. 9A) and they usually recrystallize forming QtzII, where FIs are rare. In QtzI the number of FIs approximate hundreds, whereas in QtzII they reach perhaps a few dozens. This has been interpreted to reflect the elimination of pre-existing QtzI FIs by migration that took place during QtzI recrystallization, leaving behind fine-grained QtzII crystals with rare isolated FIs.

As pointed out by Roedder (1981), the usual criteria for distinguishing primary and secondary inclusions cannot be applied as readily in metamorphic rocks, since grain growth and grain deformation are commonly concurrent processes, which for some minerals, including quartz, continue well beyond the peak of metamorphism. Grains may dissolve on one side whereas growing on another side, or they may deform and recrystallize into new grains while retaining some of the features of the former phase. Considering this behavior by quartz, it is inferred that FIs in this mineral inherited the mineralizing fluid throughout all the stages of fluid evolution. This may have been the case in the present study.

The V4 veins are restricted to the DB1 metamafic dyke, presenting diverse texture and mineralogy from V1, V2, and V3 veins. These differences consist of the presence of a single type of quartz with polygonal contacts and incipient deformation, absence of sulphosalts, rare sulphides, and carbonate with a calcitic composition, whereas it is ankeritic in all others (Table 8). According to Porto (2008) and Lima (2012), chlorite-dominated, hydrothermally DB1

metamafic dykes seem to demarcate orebodies at Carvoaria Velha deposit, having served as probable barriers for the hydrothermal fluid. However, since the non-deformed, non-mineralized V4 veins are restricted to DB1, and are probably late in relation to V1, V2 and V3 veins, their fluid composition is probably evolved in relation to the fluid responsible for the mineralizing hydrothermal event.

8.2. Mineral chemistry of ore minerals

The most common sulphides in all vein types are arsenopyrite, pyrite, chalcopyrite and pyrrhotite, presenting diverse textures, and more than one generation (ex. PyI and PyII, ApyI and ApyII), as indicated in section 5.2 of this paper. Microprobe studies show the presence of metallic phases (sulfides and sulphosalts), such as stibnite, berthierite, ullmanite, tetrahedrite, galena, cobaltite and argentopetlandite, commonly overgrowing sulphides (arsenopyrite, pyrite, chalcopyrite and pyrrhotite) (Fig. 5).

Arsenopyrite crystals may be zoned, with clear irregular portions in both, nuclei or rims (Fig.8), with portions enriched in As, and depleted in Fe and S. Chalcopyrite may have Fe and Cu depleted rims, and presence of Ni and Co (Fig. 6). Arsenic composition of arsenopyrite crystals in equilibrium with gold and pyrite-pyrrhotite was used as geothermometer, revealing a range of arsenopyrite temperature of formation from 300-375°C. This range is interpreted as temperature for gold mineralization in the Carvoaria Velha deposit.

The presence of berthierite associated with gold mineralization in V1 vein type at Carvoaria Velha deposit makes this deposit different from the great majority of orogenic gold deposits worldwide (e.g. Hemlo Canada, Harris, 1989; Tomkins et al; 2004). This mineral is mainly associated with pyrite and chalcopyrite (Figs. 5C, E), overgrowing carbonate (Lima, 2012). Gold particles may occur as inclusions. The vein types V2 and V3 are both sulphosalt free, and based on crosscutting field observations, these veins do cut mineralized V1 veins, suggesting a close relationship between the presence of sulphosalt and gold precipitation.

Based on growth and replacement relationships between sulphides and sulphosalts minerals, it is possible to propose an evolution for the mineralizing hydrothermal fluid. Arsenic and Sb-rich phases suggest that these elements may have been incorporated during the interaction of the hydrothermal fluids with the Córrego do Sítio and Santa Quitéria clastic metasedimentary units. In the case of Ni and Co enrichment, it may reflect the contribution of metasedimentary rocks of mafic affinity. Based on rare earth elements, Baltazar and Zucchetti (2007) interpret metaturbidites of the resedimented units in the eastern portion of the Nova Lima Group, where the Carvoaria Velha gold deposit is located, as derived from a mixed, mafic and K-rich volcanic source. The presence of these elements also suggests that interaction of fluids in the basal sequences of Nova Lima Group, such as the mafic-ultramafic Quebra Ossos unit, which has its largest expression in the study area when compared to the entire QF.

8.3. Fluid inclusions

Composition, density and salinity data of fluids trapped in quartz from V1, V2 and V4 mineralized and non-mineralized veins were determined based on FI and Raman spectroscopy studies.

Two main types of inclusions were established (types 1 and 2) as described in section 6.1. Type 1 FIs trapped in both QtzI and QtzII, from V1 and V2 veins hosted in metasedimentary rocks, are all similar. These are two-phase FIs, with a $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2\pm\text{CH}_4-\text{NaCl}$ composition, and traces of N_2 , possibly containing other cations than Na^+ in solution, such as Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+ and Fe^{2+} . The FIs are predominantly aqueous and contain a vapour bubble that generally occupies 5 up to 15 % volume of the inclusion cavity, indicating that fluids were homogeneous (not immiscible) at the time of trapping. There is no clear evidence of boiling or phase immiscibility, indicating that fluids are either unmixed at a deeper level, with gas phases disappearing to the surface, or fluid did not unmix, i.e., are homogeneous. Based on the microthermometric data (Tables 10 and 11), the hydrothermal fluid is interpreted to reflect at least two evolved stages:

i) an early fluid stage, represented by pseudosecondary type 1a FIAs trapped in smoky quartz QtzI, of moderate ~ 8.5 eq. wt% NaCl salinity, with an average 5.4 $\text{CO}_2:\text{CH}_4$ ratio, and minimal homogenization temperature of $280\pm 17^\circ\text{C}$ (Fig. 11);

ii) a late-stage fluid, represented by pseudosecondary and secondary type 1b FIAs trapped in recrystallized quartz QtzII (Fig. 9), with lower ~ 4.6 eq. wt% NaCl salinity, a slightly decrease in the average $\text{CO}_2:\text{CH}_4$ ratio to 4.9, and a minimal homogenization temperature of $315\pm 33^\circ\text{C}$, and containing some 1b type FIs ($n=5$) reaching $\sim 450^\circ\text{C}$ (Fig. 11B).

Taking into consideration pressure values of about 2 kbars obtained for similar orogenic gold deposits (Groves *et al.*, 2003; Ridley e Diamond, 2000), a pressure (temperature) correction of $T_{\text{hot}}/T_{\text{d}}$ would increase these values in $\sim 50^\circ\text{C}$, giving a minimum trapping temperature of $330\pm 17^\circ\text{C}$ for type 1a inclusions, and $365\pm 33^\circ\text{C}$ for type 1b inclusions. These values are compatible with the range obtained from arsenopyrite geothermometer analyses.

It is suggested that type 1 FIs represent the mineralizing fluid recorded in quartz of V1 veins, which are related to the first deformational event (D_n event) that was characterized by the S_n foliation. The presence of CH_4 in type 1 FIs from V1 and V2 veins may reflect fluid interaction with Córrego do Sítio and Santa Quitéria carbonaceous matasedimentary wall rocks (cf. Ho *et al.*, 1985). Fluid-rock reactions could contribute CH_4 , or other hydrocarbons, and/or N_2 (cf. Cox *et al.*, 1995). The hydrolysis of the carbonaceous matter ($2\text{C}+2\text{H}_2\text{O}=\text{CO}_2+\text{CH}_4$ or $\text{C}+2\text{H}_2\text{O}=\text{CH}_4+\text{O}_2$) may have provided CO_2 for enhanced carbonate alteration and/or enriched the ore fluid in $\text{CH}_4\pm\text{N}_2$, as pointed out by Lobato *et al.* (2001) for other gold deposits hosted in the Nova Lima Group of the QF region.

The addition of CH_4 during fluid-rock carbon interaction may have caused some decrease

in fO_2 of the fluid which, as a consequence, destabilized gold-bearing sulfur complexes, liberating S^{-2} for the formation of Fe sulphides (Apy, Py, Po etc.), and favour gold deposition (Phillips et al. 1996).

8.4. Oxygen and sulphur isotopes

Results of calculated $\delta^{18}O_{\text{fluid}}$ values for quartz crystals from V1, V2 and V3 vein types are all similar between +7.9 and +13.0‰ (Fig. 12A and Table 10). Calculated oxygen isotope values for V4 veins are lighter, between +2.6 and +4.1‰ (Table 12). Isotopic $\delta^{18}O_{\text{fluid}}$ values of V1, V2 and V3 vein quartz crystals coincide with those typically found in orogenic gold deposits worldwide, in the +4 to +15‰ range (Ridley and Diamond, 2000), indicating a mineralizing fluid of metamorphic origin (Taylor, 1974). The V4 vein quartz exhibits the lightest values of $\sim +2$ ‰ (Fig. 12A and Table 12), and these are slightly lighter values than the range for magmatic fluid contribution (4.0-8.0 per mil; Taylor, 1974), suggesting a possible interaction of meteoric waters with the initial fluid restricted to mafic DB1 dykes and sills. These dykes may have worked as path for the percolation of surface waters, and therefore diluted magmatic values to slightly lighter isotopic signatures, and also intermediate salinity values (Fig. 11C). The lowest T_{tot} (Fig. 11C) values ($\sim 198^\circ\text{C}$) obtained for these inclusions also attest this hypothesis.

Determinations of $\delta^{34}\text{S}$ for sulphides (pyrite, chalcopyrite and pyrrhothite) have a range between -2.9 to $+6.1$ ‰ (Table 13), and this large range of values overlap common sulphur reservoirs, including mantle-derived magmatic rocks (Sakai et al., 1984), making it difficult to constrain the original composition of the sulphur source. According to Farquar et al. (2002), this relatively wide range of $\delta^{34}\text{S}$ may be related to recycling of sedimentary materials. In the case of pyrite from V4 veins hosted in DB1 metamafic dykes and sills, isotopic values display lighter numbers around $+0.9$ ‰, indicating a magmatic contribution (Fig. 12B-C and Table 13).

Results of mass independent $\Delta^{33}\text{S}$ for sulphides of the V1 veins hosted in metasedimentary rocks vary from $+0.3$ to $+3.5$ ‰ (Fig. 12B-C). The presence of positive $\Delta^{33}\text{S}$ values suggest their sedimentary affinities for sulphur, probably incorporated from the crust (Farquhar et al., 2002). On the other hand, sulphides of V4 veins, with $\Delta^{33}\text{S}$ in the range of 0.3 to 0.5 ‰, indicate its mantle derivation (Fig. 12C) (Farquar et al., 2002), as previously interpreted by $\delta^{34}\text{S}$. However, as pointed out for $\delta^{18}O_{\text{fluid}}$ data, an interaction of meteoric waters can not be discarded.

The incorporation of $\Delta^{33}\text{S}$ in sulphides from mineralized V1 veins further suggest that hydrothermal fluid responsible for the gold mineralization at Carvoaria Velha deposit have interacted with metasedimentary sequences during its ascending path.

8.5. Proposed hydrothermal fluid model

Based on detailed mineralogy, geothermometry, fluid inclusion, and oxygen and sulphur stable isotopes data reported here a paleohydrothermal fluid model for the gold mineralization at Carvoaria Velha deposit is proposed (Fig. 13).

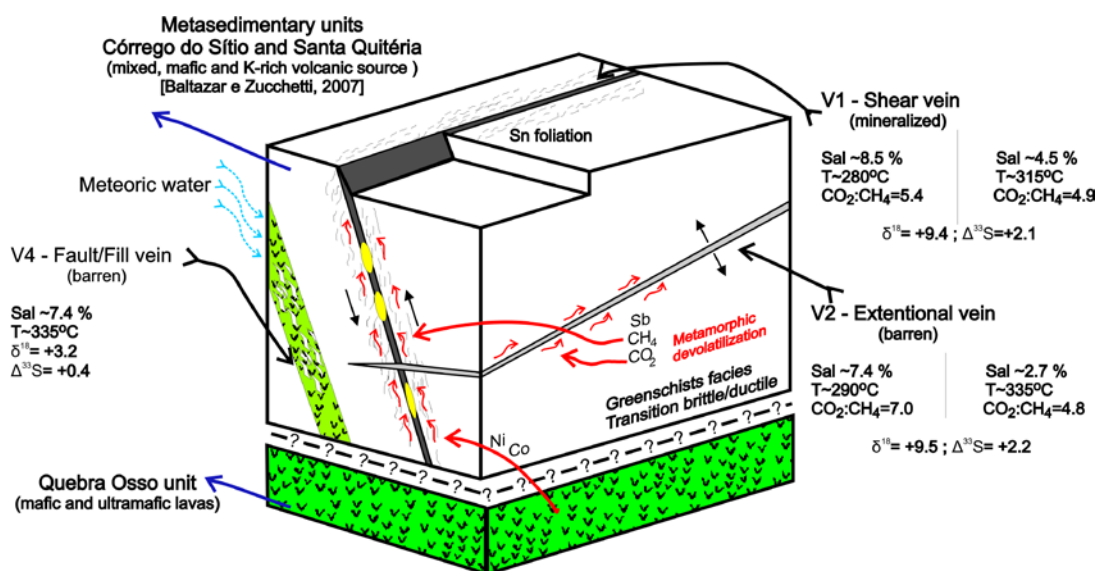


Figure 13 – Schematic hydrothermal fluid model for the gold mineralization at the Carvoaria Velha deposit. Metamorphic fluid (red arrows) and meteoric waters (blue arrows). Modified from Robert (1990) in Dube and Gosselin (2007).

Fluid inclusion data suggest that the Carvoaria Velha gold deposit resulted from aqueous-carbonic, low- to medium-salinity (<8.5 eq. wt% NaCl) mineralizing fluids, at minimum homogenization temperature of $280 \pm 17^\circ\text{C}$ for gold precipitation, and variable pressure. These results together with fluid isotopic ratios indicate metamorphic fluids characteristic of worldwide Archean orogenic gold deposits (e.g., Groves *et al.*, 1998), and this have interacted with metasedimentary rocks, resulting in some sulphur crustal assimilation. On the other hand, the presence of Ni and Co reflects a mafic component contribution to the metasedimentary sequence. The fluid-rock interaction yield also the addition of CH₄, causing $f\text{O}_2$ decreasing (Ridley & Diamond, 2000). Consequently, $f\text{O}_2$ variation and pressure fluctuation would have destabilized gold-sulphur complexes liberating S⁻² to form Fe sulphides (Apy, Py and Po, etc.), resulting in gold precipitation (Phillips *et al.*, 1996).

Despite that Au-Sb association in orogenic gold deposits usually point in the literature a relation to epizonal crustal levels (Groves, 1993, Groves *et al.*, 1998, 2003; Goldfarb *et al.*, 2001), fluid inclusion data (P and T) from the present studies, place the Carvoaria Velha deposit as had been formed at mesozonal crustal level.

Orogenic and intrusion-related gold deposits commonly show evidence of fluid immiscibility that lead to precipitation of gold (Groves, 2003). In the case of the Carvoaria Velha deposit, evidences for this process has not been found, suggesting that pressure fluctuation and/or fluid-rock interaction would have destabilized gold-transporting complexes, as pointed out by Loucks and Mavrogenes (1999) in Groves et al. (2003). Furthermore, none of the three basic criteria of fluid immiscibility evidence by Ramboz et al. (1982) are observed. We suggest the conduction of detailed studies in order to better understand the mechanism that may have influenced gold mineralization at the Carvoaria Velha deposit.

Capítulo 5 – Considerações finais

O lineamento aurífero Córrego do Sítio corresponde a uma zona de cisalhamento dúctil com um *trend* NE-SW, controlando 16 depósitos de ouro de pequeno a médio portes, ao longo do qual se inclui o depósito Carvoaria Velha. A mineralização de ouro se hospeda em rochas metavulcanossedimentares arqueanas do *greenstone belt* Rio das Velhas, nas porções de topo do Supergrupo Nova Lima, as rochas correspondem a filitos e xistos finos hidrotermalmente alterados a quartzo, carbonato e sericita, além de sulfetos e sulfossais subordinados. A mineralização aurífera se apresenta disseminada em metapelitos e principalmente em veios de quartzo+carbonato+ sulfetos±sulfossais de distribuição variada.

O presente estudo busca caracterizar os fluidos mineralizadores do depósito Carvoaria Velha, através de estudos de inclusões fluidas, espectroscopia Ramam e isótopos de oxigênio e enxofre em veios-brechas, sendo os principais resultados itemizados a seguir.

Os estudos de inclusões fluidas focaram os cristais de quartzo, que ocorrem em dois tipos principais: (i) quartzo fumê QtzI, com granulação média a grossa, bordas lobadas, e extinção ondulante e; (ii) quartzo recristalizado de menor granulação e contatos poligonizados.

1. Classificação dos Veios

A partir de estudos petrográficos de detalhe e de inclusões fluidas, são classificadas quatro famílias principais de veios em Carvoaria Velha (Fig. 5; Cap. 4, item 5). Veios V1 – quartzo-ankerita-sulfetos-sulfossais-ouro – paralelos à foliação principal regional S_n , comumente mineralizados em ouro. Veios V2 – quartzo-ankerita-sulfetos – desenvolvidos no plano de clivagem de crenulação S_{n+1} , extensionais e não mineralizados em ouro. Veios V3 – quartzo-ankerita – preenchem fraturas S_{n+3} , geralmente sem sulfetos e sulfossais. Veios V4 – quartzo-calcita – de ocorrência restrita aos diques e *sills* metamáficos DB1 que cortam a sequência metassedimentar, sendo extensionais e sem orientação preferencial.

Essa classificação é cronológica, com base na relação encontrada em campo, sendo que o tipo V1 corresponde à família de veios mais antigos, relacionados ao evento de mineralização, e que contêm o minério. Os veios V4 são restritos ao dique máfico DB1, que não registra deformação, sendo provavelmente veios tardios em relação a V1, V2 e V3, e evoluídos em relação ao fluido responsável pelo evento hidrotermal mineralizador.

2. Composição Química dos Sulfetos/Sulfossais & Evolução do Fluido Mineralizador

Com base na relação de intercrescimento, sobrecrescimento e substituição, descrita no Cap. 4, item 5.2, entre os sulfetos (arsenopirita, pirita, calcopirita e pirrotita) e sulfossais (estibinita, ullmanita, tetraedrita, galena, cobaltita e argentopetlandita) é possível propor uma evolução para o fluido hidrotermal mineralizador. Fases ricas em As e Sb sugerem incorporação desses elementos a partir da interação do fluido hidrotermal com as unidades metassedimentares

clásticas Córrego do Sítio e Santa Quitéria. Já a presença de elementos como Ni e Co podem ter sido incorporadas nos sedimentos a partir de rochas de afinidade máfica. Baseado em elementos terras raras, Baltazar e Zucchetti (2007) interpretam que as rochas metassedimentares da associação Ressedimentada, nesta porção leste do QF, são derivadas de uma fonte mista entre rochas máficas e félsicas potássicas. A presença de Co e Ni sugere ainda a passagem do fluido hidrotermal em sequências basais do Grupo Nova Lima, como a unidade máfica-ultramáfica Quebra Ossos, que tem sua maior expressão em área na região de estudo, quando comparado ao QF como um todo.

3. Geotermômetro da Arsenopirita

Cristais de arsenopirita podem estar zonados, com porções irregulares, no núcleo e/ou borda do cristal, sendo as porções mais claras enriquecidas em As e empobrecidas em Fe e S (Fig. 8). Segundo Kretschmar & Scott (1976), este padrão de zoneamento evidencia um ambiente submetido a variações na fugacidade de S, durante o crescimento do mineral. A variação composicional do As em cristais de arsenopirita, em equilíbrio com piritita, pirrotita e ouro foi utilizada como geotermômetro (Kretschmar & Scott, 1976), revelando um intervalo de temperatura de formação entre 300 e 375°C. Este intervalo é interpretado como a temperatura aproximada para a formação da mineralização no depósito Carvoaria Velha.

4. Tipos de Inclusões Fluidas & Evolução Hidrotermal

Dois tipos principais de inclusões fluidas (IFs) puderam ser estabelecidos (tipos 1 e 2), como descrito no Cap. 4, item 6 do presente trabalho. O Tipo 1 corresponde a IFs bifásicas aquocarbônicas e com composição $H_2O-CO_2 \pm CH_4-NaCl$, com traços de N_2 , podendo conter KCl , $MgCl_2$ e $FeCl_2$. São predominantemente aquosas e contêm porção gasosa que ocupa 5 a 15% do volume da cavidade da IF, indicando que o fluido foi homogêneo (não imiscível) no momento do aprisionamento. O Tipo 2 são IFs bifásicas aquosas, presentes apenas nos veios V4 do dique metamáfico DB1. Sugere-se que as IFs tipo 1 representem o fluido mineralizador e são registradas em quartzo do veio V1 relacionados com o primeiro evento deformacional (evento D_n), uma vez que estes são veios controlados pelo plano da foliação S_n .

Com base em dados de microtermometria (Tabelas 10 e 11 no Cap. 4 item 6), sugere-se pelo menos dois estágios de evolução do fluido: **i)** cedo-hidrotermal, com IFs tipo 1a pseudossecundárias, aprisionadas em quartzo fumê QtzI, com salinidade moderada (~8.5% em peso de NaCl eq.); razão média $CO_2:CH_4$ de 5,4; média da temperatura mínima de homogeneização $280 \pm 17^\circ C$; e pressão variável entre 0,5 a 5,5 kbars; e **ii)** tardi-hidrotermal, representado por IFs pseudossecundárias e secundárias tipo 1b, aprisionado em quartzo recristalizado QtzII (Fig. 9), menos salino (~4.6% em peso de NaCl eq.); com pequena diminuição na razão média $CO_2:CH_4$ para 4,9; com média da temperatura mínima de homogeneização de $315 \pm 33^\circ C$; e pressão variável entre 1,0 a 5,5 kbars, apresentando algumas IFs tipo 1b (n=5) atingindo ~450°C. Vale ressaltar que considerando valores aproximados de

pressão de cerca de 2 kbars para depósitos semelhantes de Ouro Orogênico (Grooves *et al.* 2003; Ridley e Diamond 2000), uma correção nas temperaturas de Th/Td elevaria esses valores em cerca de 50°C, resultando em uma temperatura mínima de formação de 330±17°C para tipo 1a e 365±33°C para 1b. Esses valores são compatíveis com intervalo obtido através do geotermômetro da arsenopirita.

Apesar da associação de Au-Sb em depósitos de ouro orogênico estar relacionada na literatura a níveis crustais epizonais (Groves 1993, Groves *et al.* 1998,2003 e Goldfard *et al.* 2001), os dados de inclusões fluidas apresentados neste estudo (P e T) posicionam o depósito Carvoaria em um ambiente crustal mesozonal.

Os depósitos de ouro orogênicos e *intrusion-related* comumente apresentam processos de imiscibilidade ou mistura de fluido como processos que influenciam na precipitação do ouro (Groves *et al.* 2003). No depósito Carvoaria Velha não foram encontradas evidências destes processos, podendo sugerir que flutuação da pressão e/ou interação fluido rocha teriam levado à desestabilização dos complexos de ouro-enxofre, conforme sugerido por Loucks and Mavrogenes (1999) in Groves *et al.* (2003). Além disso, nenhum dos três critérios básicos de evidência de imiscibilidade de fluido de Ramboz *et al.* (1982) foram observados. No entanto, mais estudos de detalhe devem ser conduzidos para melhor entendimento dos processos que teriam influenciado a mineralização no depósito Carvoaria Velha.

Outros estudos de inclusões fluidas (IFs) foram obtidos em veios de quartzo que hospedam minério em FFBs dos depósitos de ouro do QF (Tab. 5.1), Raposos (Godoy, 1994), São Bento (Alves, 1995), e Cuiabá (Toledo, et al., 1998). Godoy (1994) estudou veios de quartzo no minério em FFB do depósito Raposos, e identificou três tipos de inclusões fluidas com base em microtermometria e microscopia Raman: Tipo I inclusões com H₂O, CH₄, N₂, CO₂ e sais; Tipo II em veios extensionais, com IFs de baixa salinidade, contendo H₂O-CO₂ com menor conteúdo de CH₄; Tipo III fluido aquoso e salino. O tipo I está relacionado ao fluido mineralizador, responsável pelo transporte de ouro em complexos (Au (HS)⁻²) em condições redutoras; representam ainda um processo de separação de fases durante a precipitação do ouro. Baseado na microtermometria das inclusões do tipo I e geotermometria da arsenopirita, os valores de temperatura e pressão estimados para a mineralização aurífera nesse depósito são 3,5 kb e 400 °C; com salinidades de 14% em peso de NaCl eq. Alves (1995) realizou estudo de microtermometria e espectroscopia Raman em veios de quartzo mineralizados e estéreis do depósito São Bento (hoje Córrego do Sítio II). Foram determinados três tipo de IFs: tipo I são inclusões bifásicas e compõe-se de H₂O, CO₂ e CH₄, com proporções subordinadas de N₂ e HS⁻; tipo II monofásicas compostas por CH₄ e subordinadamente de N₂ e HS⁻; tipo III monofásicas aquosas com alta salinidade e contém Na⁺, Fe²⁺ e Mg²⁺. Segundo o autor, as inclusões do tipo I devem ter sido contemporâneas à mineralização aurífera e mostram ambiente de precipitação do ouro com temperaturas entre 200-300 °C e pressões de 1-3,2 kb, salinidade varia entre 3,4 e

5,0% em peso de NaCl eq. Toledo *et al.* (1998) estudou veios de quartzo ao longo de contatos de FFBs mineralizadas em ouro com xistos carbonosos da Mina de Cuiabá. Inclusões fluidas primárias neste depósito são predominantemente aquosas, com fases gasosas ocupando 10-15% do volume das inclusões, e concentração variável de CO₂ e CH₄, N₂ subordinado e traço de H₂S e HS⁻. Salinidade tem valores entre 3,0 e 6,0% em peso de NaCl eq. A temperatura de mineralização estimada ficou próximo de 270 °C, consistente com a geotermometria da arsenopirita (Kretshmar e Scott 1976) aplicado a este depósito.

Uma característica que difere os depósitos de ouro arqueano do Quadrilátero Ferrífero dos demais depósitos do mundo é a presença de inclusões ricas em CH₄, que podem ou não conter CO₂, identificadas em veios de FFB mineralizadas ricas em matéria carbonosa. Em alguns depósitos, o conteúdo de metano em inclusões pode chegar a 95 % mol (Lobato *et al.*, 2001). Estes dados apresentam fluidos compostos por H₂O-CO₂±CH₄-NaCl (± N₂ ± HS⁻) de baixa salinidade, análogo aos dados produzidos neste volume.

5. CH₄ nas Inclusões Fluidas

A presença de CH₄ nas IFs dos veios V1 e V2 refletem a interação de fluido com rochas encaixantes metapelíticas ricas em matéria carbonosas, como já sugerido por Ho *et al.* (1985), sendo no caso do presente estudo as unidades Córrego do Sítio e Santa Quitéria. A interação fluido-rocha pode contribuir com CH₄, ou outro hidrocarboneto, e/ou N₂ (Cox 1985). A hidrólise da matéria carbonosa (2C+2H₂O=CO₂+CH₄ ou C+2H₂O=CH₄+O₂) pode ter fornecido carbonato para a alteração hidrotermal e/ou enriquecendo o fluido mineralizador em CH₄±N₂, similar ao que ocorre com outros depósitos hospedados no Grupo Nova Lima na região do QF como discutido por Lobato *et al.* (2001).

6. Isótopos de Oxigênio

Os valores de δ¹⁸O_{fluido} calculados para cristais de quartzo das famílias de veios V1, V2 e V3 são semelhantes e se encontram no intervalo entre +7,9 e +13,0‰ (Fig. 12A e Tabela 10, Cap. 4 item 7.1 e Anexo 2). Estes são similares aos valores típicos encontrados em depósitos de ouro orogênico mundiais de idade arqueana, compreendendo intervalo de +4 a +15‰ (Ridley e Diamond, 2000), e indicam fluido mineralizador de origem metamórfica (Taylor, 1974). Para o veio V4, os valores δ¹⁸O_{fluido} são mais leves, entre 2,6 e 4,1‰ (Tabela 10, cap.4 item 7), indicando fluido com provável contribuição magmática. Esse intervalo de razões isotópicas relativamente mais leves que valores magmáticos (4,0-8,0 per mil; referencias), sugere ainda uma provável interação de água meteórica com fluido inicial restrito ao dique DB1. Os diques podem ter servido de canal para percolação dessas águas superficiais, e diluído valores magmáticos para valores isotópicos mais leves e de salinidade intermediária. Os mais baixos valores de temperatura de Th obtidos para essas inclusões (~198°C) também atestam essa hipótese.

7. Isótopos de Enxofre

Valores de $\delta^{34}\text{S}$ para os sulfetos pirita, calcopirita e pirrotita têm intervalo entre $-4,8$ a $+6,1\%$ (Tabela 13, Cap. 5 item 7.2). Este amplo intervalo de valores sobrepõem-se a vários reservatórios de enxofre, incluindo rochas magmáticas derivadas do manto (Hoefs, 2007), tornando difícil a definição da fonte de enxofre. Resultados de $\Delta^{33}\text{S}$ para sulfetos no veio V1 e em sulfetos na borda de V2 e V3 apresentam valores $+1,6$ a $+3,4\%$ (Anexo 3), diferentes de zero, sugerindo que o enxofre tem afinidade sedimentar, provavelmente incorporado da crosta continental (Farquhar *et al.*, 2002). Já no veio V4, as razões de $\Delta^{33}\text{S}$ têm valores entre $0,27$ a $0,53\%$ (Anexo 3), indicando derivação mantélica para o enxofre (Fig. 12C) (Farquhar *et al.*, 2002). As razões de $\Delta^{33}\text{S}$ em sulfetos do veio V1 mineralizado sugerem que o fluido hidrotermal responsável pela mineralização de ouro no depósito Carvoaria Velha tenha interagido com as sequências metassedimentares durante sua ascensão.

8. Proposta de Modelo Hidrotermal

A partir dos resultados obtidos no presente trabalho, mineralogia, geotermometria, inclusões fluidas e isótopos estáveis de oxigênio e enxofre, foi possível propor um modelo hidrotermal para a mineralização aurífera no depósito Carvoaria Velha, conforme figura 5.1 abaixo.

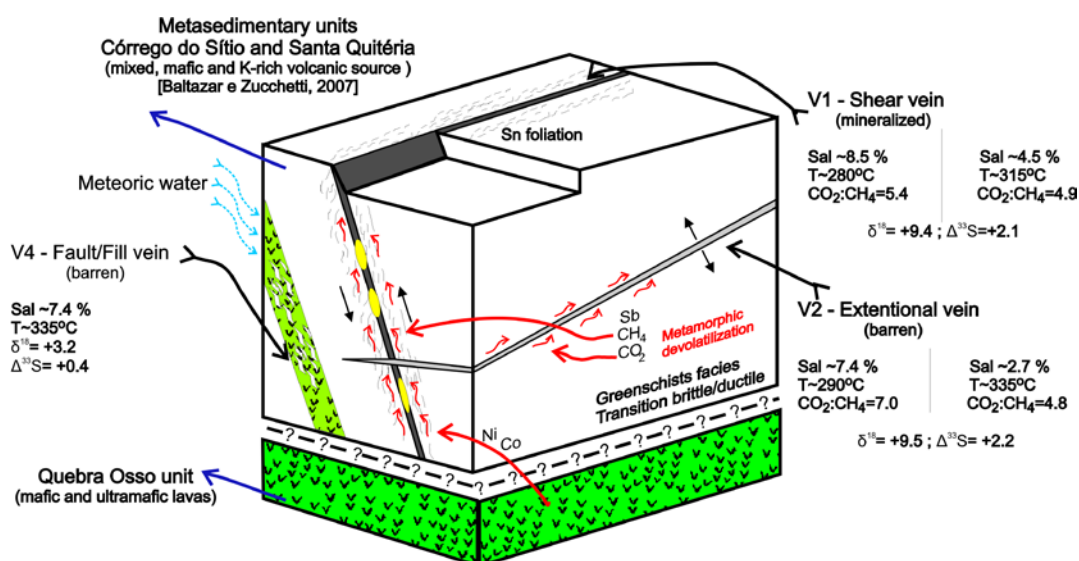


Figura 5.1 – Desenho esquemático mostrando o modelo hidrotermal para o depósito de ouro Carvoaria Velha, modificado de Robert (1990) in Dube and Gosselin (2007). Sugere-se fluido produzido pela devolatilização metamórfica das sequências metassedimentares e máfica/ultramáfica, com assimilação de Sb, Ni e Co, aprisionado em veios de cisalhamento (segundo S_n) e extensionais (segundo S_{n+1}). Fluido metamórfico ilustrado pelas setas vermelhas, e fluido meteórico pelas setas azuis.

Os dados obtidos sugerem que o depósito Carvoaria Velha formou-se a partir de um fluido mineralizador aquocarbônico, de baixa a média salinidade ($<8,5\%$ eq. peso de NaCl), a uma

temperatura mínima de deposição para o ouro de $330\pm 17^{\circ}\text{C}$, com pressão variável entre 1,0 a 5,5 kbars. Este fluido tem razões isotópicas que indicam origem metamórfica característica dos depósitos do tipo orogênicos arqueanos (*e.g.*, Groves *et al.*, 1998), e que interagiu com as rochas metassedimentares, resultando em alguma assimilação de enxofre crustal e elementos como Ni, Co e Sb. A interação fluido-rocha propiciou ainda a adição de CH_4 , causando decréscimo na $f\text{O}_2$ (Ridley & Diamond, 2000). Como consequência, a variação da $f\text{O}_2$ e flutuação da pressão teriam desestabilizado complexos de ouro-enxofre liberando S^{-2} para a formação sulfetos de Fe (Apy, Py e Po etc.), resultando na precipitação de ouro (Phillips *et al.*, 1996).

Tabela 5.1 – Dados de inclusões fluidas em rochas metassedimentares arqueanas do Quadrilátero Ferrífero. Modificado de Lobato *et al.*(2001).

Depósito	Dados de inclusões fluidas			Referências
	Aprisionamento		Salinidade (% em peso de NaCl eq.)	
	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Pressão (kb)		
São Bento	200 a 300	1,0 a 3,2	3,4 a 5	Alves (1995)
Cuiabá	~ 270	-	3 a 6	Xavier et al. (2000)
Raposos	400	3,5	8,5 a 14,3	Godoy (1994)
Córrego do Sítio	330 a 365	~2,0	< 8,5	Ribeiro (2013) Este volume

Referências Bibliográficas

- AGABM, AngloGold Ashanti Brasil Mineração. Annual Integrated Report 2011. Disponível em: <http://www.aga-reports.com/11/> acessado em 20/12/2012
- Alkmim, F.F., Marshak, S., 1998. Transamazonian orogeny in the Southern São Francisco Craton region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, 90, 29-58.
- Almeida, F.F.M., 1977. O cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências* 7, 349-364.
- Baltazar, O.F, Silva, S.L., 1996. Projeto Rio das Velhas: Mapa Geológico Integrado do Supergrupo Rio das Velhas, escala 1:100.000. Departamento Nacional de Produção Mineral/CPRM–Serviço Geológico do Brasil, Belo Horizonte.
- Baltazar, O.F., Pedreira, A.J., 1998. Associações litofaciológicas. In: M. Zucchetti and O.F. Baltazar (Eds.), Projeto Rio das Velhas– Texto Explicativo do Mapa Geológico Integrado, escala 1:100.000. 2ª edição, Departamento Nacional de Produção Mineral/CPRM–Serviço Geológico do Brasil, Belo Horizonte, p. 43–47.
- Baltazar, O.F., Zucchetti, M., 2000. Rio das Velhas greenstone belt structural evolution, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. 31th International Geological Congress. Rio de Janeiro, Brazil, CD-ROM.
- Baltazar, O.F., Baars, F.J., Lobato, L.M., Reis, L.B., Achtschin, A.B., Berni, G.V., Silveira, V.D., 2005. Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero na Escala 1: 50.000 com Nota Explicativa. In: Projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero - Integração e Correção Cartográfica em SIG com Nota Explicativa. CODEMIG, 65 p.
- Baltazar, O.F., Zucchetti, M., 2007. Lithofacies associations and structural evolution of the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: A review of the setting of gold deposits. *Ore Geology Reviews* 32, 471-499.
- Baltazar, O.F., Zucchetti, M., 2007. Lithofacies associations and structural evolution of the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: A review of the setting of gold deposits. *Ore Geology Reviews* 32, 471-499.
- Bodnar, R.J., Vityk, M.O., 1994. Interpretation of microthermometric data for H₂O–NaCl inclusions. In: De Vivo, B., Frezzotti, M.L. Eds., *Fluid Inclusions in Minerals: Methods and Applications*. Virginia Polytechnic Institute Press, pp. 117–130.
- Bodnar, R. J., 2003. Introduction to fluid inclusions, in Samson, I., Anderson, A. and Marshall, D., eds., *Fluid Inclusions: Analysis and Interpretation: Short Course 32*, v. 32, Mineralogical Association of Canada, p. 81-99.
- Brito-Neves, B.B., Sá, J.M., Nilson, A.A., Botelho, N.F., 1995. A tafrogênese estateriana nos blocos paleoproterozóicos da América do Sul e processos subsequentes. *Geonomos* 3 (2), Belo Horizonte, p.1-21.
- Brown, P.E., Hagemann, S.G., 1995. MacFlinCor and its application to fluids in Archean lode-gold deposits: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59, 3943–3952.
- Cox, S.F., Sun, S.S., Etheridge, M.A., Wall, V.J., Potter, T.F., 1995. Structural and Geochemical Controls on the Development of Turbidite-Hosted Gold Quartz Vein Deposits, Wattle Gully Mine, Central Victoria, Australia. *Economic Geology*, vol. 90, p. 1722-1746.
- Canale, A.L., 1999. Geologia do Depósito Córrego do Sitio, Quadrilátero Ferrífero (MG), e Caracterização Mineralógica do Minério Sulfetado. Universidade Federal de Rio Grande do Sul. Dissertação de Mestrado, 142 p.
- Chemale, Jr., F., Rosière, C. A., Endo, I., 1994. The tectonic evolution of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Precambrian Research*, 25-54.
- Cordani, U.G., Kawashita, K., Myller, G., Quade, H., Reimer, V., Roeser, H., 1980. Interpretação tectônica e petrológica de dados geocronológicos do embasamento na borda sudeste do Quadrilátero Ferrífero – Minas Gerais. *Acad. Bras. Cienc.*, 52 (4): 785-799.
- Corrêa Neto, A.V., Baltazar, O.F., 1995. Compartimentação estrutural do Greenstone Belt Rio das Velhas no interior do Quadrilátero Ferrífero (MG). V Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos, SBG, Gramado, p. 15-17.
- David, M.E.V., 2006. Composição Isotópica de Pb – Sr e Nd da Mineralização de Ouro do Depósito Córrego do Sítio, Quadrilátero Ferrífero (M.G.): implicações na modelagem conceitual. IGc-USP. Dissertação de Mestrado. 76 p.

- Dorr II, J.V., Gair, J.E., Pomerene, J.B., Rynearson, G.A., 1957. Revisão da estratigrafia pré-cambriana do Quadrilátero Ferrífero, Brasil. Departamento Nacional da Produção Mineral, Divisão de Fomento da Produção Mineral, Avulso vol. 81. 31 pp.
- Dorr II, J.V., 1969. Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. United States Geological Survey Professional Paper 614-A. 110 pp.
- Dubé, B., and Gosselin, P., 2007, Greenstone-hosted quartz-carbonate vein deposits, in Goodfellow, W.D., (ed.), Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit-Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication No. 5, pp. 49-73.
- Farquhar, J., Wing, B.A., McKeegan, K.D., Harris, J.W., Cartigny, P., and Thiemens, M.H., 2002, Mass-independent sulfur of inclusions in diamond and sulfur recycling on early Earth: *Science*, v. 298, p. 2369–2372.
- Gair, J.E., 1962. Geology and ore deposit of the Nova Lima and Rio Acima quadrangles, Minas Gerais, Brazil. United States Geological Survey Professional Paper 341-A. 67 pp.
- Goldstein, R.H., Reynolds, T.J., 1994. Systematics of fluid inclusions in diagenetic minerals. SEPM Short Course 31, Tulsa, 199 pp.
- Goldstein, R. H., 2003. Petrographic analysis of fluid inclusions. In Samson, I., Anderson, A. and Marshall, D. Eds., *Fluid Inclusions: Analysis and Interpretation*, Mineralogical Association of Canada Short Course, 32, p. 9-53.
- Groves, D.I., Goldfarb, R.J., Gebre-Mariam, M., Hagemann, S.G., Robert, F., 1998. Orogenic gold deposits: a proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. *Ore Geol. Rev.* 13, 7–27.
- Harris, D.C., 1989, The mineralogy and geochemistry of the Hemlo gold deposit, Ontario: Geological Survey of Canada, Economic Geology Report 38, 88 p.
- Herz, N., 1970. Gneissic and igneous rocks of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. United States Geological Survey Professional Paper 648-B. 58pp.
- Herz, N., 1978. Metamorphic rocks of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. USGS Prof. Paper 641-C, 78 p.
- Hoefs, J., Muller, G., Schuster, A. K., 1982 . Polymetamorphic relations in iron ores from the Iron Quadrangle, Brazil: the correlation of oxygen isotope variations with deformation history. *Contr. Miner. Petrol.* 79, 241-251.
- Ho, S.E., Groves, D.I., Phillips, G.N., 1985. Fluid inclusions as indicators of the nature and source of ore fluids and ore depositional conditions for Archaean gold deposits of the Yilgarn block, Western Australia: *Geological Society of South Africa Transactions*, v. 88, p. 149-158.
- Inda, H. V., Schorscher, H. D., Dardenne, M. A., Shobbenhaus, C., Haraly, N. L. E., Branco, C.A., Ramalho, R., 1984. O cráton do São Francisco e a Faixa de Dobramento Araçuaí. In: Schobbenhaus, C., Campos, D. A., Derze, G. R. & Asmus, H. E., (Reditors). *Geologia do Brasil – Texto explicativo do mapa geológico do Brasil e área oceânica adjacente*, MME/DNPM, Brasília, Brasil 193-248 pp.
- Jacobs, G.K., Kerrick, D.M., 1981. Methane: an equation of state with application to the ternary system H₂O–CO₂–CH₄. *Geochim. Cosmochim. Acta* 45, 607–614.
- Jaguar Mining INC. 2012. Disponível em: <http://www.jaguarmining.com/s/home.asp>, acessado em 20/12/2012
- Kelly, J.L., Fu, B., Kita, N.T., Valley, J.W., 2007. Optically continuous silcrete quartz cements of the St. Peter Sandstone: high precision oxygen isotope analysis by ion microprobe. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 71 (15), 3812–3822.
- Kretschmar, U., Scott, S.D., 1976. Phase relations involving arsenopyrite in the system Fe–As–S and their application. *Canadian Mineralogist* 14, 364–386.
- Ladeira, E.A., Roeser, H.M.P., Tobschal, H.J., 1983. Evolução petrogenética do Cinturão de Rochas Verdes, Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. 2th Simpósio de Geologia de Minas Gerais. Sociedade Brasileira de Geologia, Belo Horizonte, pp. 149–165.
- Lima, L.C., 2012. Depósito lode Au-As-Sb Laranjeiras, em metaturbitos do Grupo Nova Lima, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. MSc thesis, Instituto Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, Brasil, 306 p.

- Lobato, L.M., Vieira, F.W.V., Rodrigues, L.C.R., Pereira, L.M.M., Menezes, M., Junqueira, P.P., Martins S., 1998. Styles of hydrothermal alteration and gold mineralization associated with the Nova Lima Group of the Quadrilátero Ferrífero: Part I, description of selected gold deposits. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v. 28, n.3, p. 339-354.
- Lobato, L.M.; Ribeiro-Rodrigues L.C.; Zucchetti M.; Noce, C.M.; Baltazar, O.F.; Silva, L.C., Pinto C.P. 2001a. Brazil's premier gold province. Part I: The tectonic, magmatic, and structural setting of the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero. *Mineralium Deposita*: 36, p. 228-248.
- Lobato, L.M., Ribeiro-Rodrigues, L.C., Vieira, F.W.R., 2001b. Brazil's premier gold province: Part II. Geology and genesis of gold deposits in the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero. *Mineralium Deposita* 36, 249–277.
- Lobato, L.M., Baltazar, O.F., Reis, L.B., Achtschin, A.B., Baars, F.J., Timbó, M.A., Berni, G.V., Mendonça, B.R.V., Ferreira, D.V., 2005. Projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero - Integração e Correção Cartográfica em SIG com Nota Explicativa. Belo Horizonte: CODEMIG. 1 CD-ROM
- Lobato, L.M., Santos, J.O.S, McNaughton, N.J., Fletcher, I.R., Noce, C.M., 2007. U-Pb SHRIMP monazite ages of the giant Morro Velho and Cuiabá gold deposits, Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Ore Geology Reviews*, v. 32, p. 674-680.
- Loczy, L., Ladeira, E.A., 1976. *Geologia Estrutural e Introdução à Geotectônica*. Edgar Blücher, São Paulo. 528 pp.
- Machado, N., Schrank, A., Abreu, F.R., Knauer, L.G., Almeida-Abreu, P.A., 1989. Resultados preliminares da geocronologia U–Pb na Serra do Espinhaço Meridional. 15th Simpósio de Geologia de Minas Gerais. Sociedade Brasileira de Geologia, Belo Horizonte, pp. 171–174.
- Machado, N., Schrank, A., Noce, C.M., Gauthier, G., 1996. Ages of detrital zircon from Archean–Paleoproterozoic sequences: implications for greenstone belt setting and evolution of a Transamazonian foreland basin in Quadrilátero Ferrífero, southeast Brazil. *Earth and Planetary Science Letters* 141, 259–276.
- Marshak, S., Alkmim, F.F., 1989. Proterozoic contraction/extension tectonics of the southern São Francisco region, Minas Gerais, Brazil. *Tectonics* 8, 555–571.
- Marshak, S., Alkmim, F.F., Jordt- Evangelista, H., 1994. Proterozoic crustal extension and generation of dome-and-keel structure in the Archean granite-greenstone terrane. *Nature*, 357:491-493.
- Matsuhisa, Y., Goldsmith, J.R., and Clayton, R.N., 1979, Oxygen isotopic fractionation in the system quartz-albite-anorthite-water: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 43(7), p. 1131-1140.
- Noce, C.M., Machado, N., Teixeira, W., 1998. U–Pb geochronology of gneisses and granitoids in the Quadrilátero Ferrífero (southern São Francisco craton): age constraints for Archean and Paleoproterozoic magmatism and metamorphism. *Revista Brasileira de Geociências* 28, 95–102.
- Noce, C.M., Tassinari, C.G., Lobato, L.M., 2007. Geochronological framework of the Quadrilátero Ferrífero, with emphasis on the age of gold mineralization hosted in Archean greenstone belts. *Ore Geology Reviews* 32, 500–510.
- O'Rourke, J.E., 1957. The stratigraphy of metamorphic rocks of the Rio de Pedras and Gandarela quadrangles, Minas Gerais, Brazil. PhD thesis, University of Wiscosin. Wiscosin, 106 pp.
- Passchier C.W. R. A. J. Trouw, 2005. *Microtectonics*. 2nd edition. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany.
- Pereira, S.M., Lobato, L.M., Ferreira, J.E., Jardim, E.C., 2007. The BIF-hosted São Bento gold deposit, Quadrilátero Ferrífero, Brazil. *Ore Geology Reviews*, v. 32, p. 571-595.
- Phillips G.N., Groves D.I., Kerrich R., 1996. Factors in the formation of giant Kalgoorlie gold deposits. *Ore Geology Reviews* 10:295-317.
- Porto, G.N., 2008. A mineralização aurífera do depósito Córrego do Sítio e sua relação com o enxame de diques metamórficos no corpo Cachorro Bravo, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. MSc thesis, Instituto Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, Brasil, 117 p.
- Rodrigues, L.C.R., LOBATO, L.M., 1999. Classificação dos depósitos de ouro do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. *Revista de Ciências*, Caratinga, v. 1, n.2, p. 35-50.
- Ribeiro-Rodrigues L.C., Oliveira C.G, Friedrich G., 2007. The Archean BIF-hosted Cuiabá Gold deposit, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Ore Geology Reviews*, v. 32, p. 543-570.
- Ridley, J.R., Diamond, L.W., 2000. Chapter 4 - Fluid Chemistry of Orogenic Lode Gold Deposits and Implications for Genetic Models, *SEG Reviews*, vol. 13, p. 141-162

- Roedder, E., 1981. Origin of Fluid Inclusions and Changes that occur after trapping, in: Hollister, L.S., Crawford, M.L. (Eds), *Fluid Inclusions: Applications to petrology-short course handbook 6*, Canada, pp 101-137.
- Rosière C.A., Chemale Jr., 2000. Itabiritos e minérios de ferro de alto teor do Quadrilátero Ferrífero - uma visão geral e discussão. *Geonomos*, Belo Horizonte, v. 8, n. 2, p. 27-42.
- Rosière C.A., Spier C.A., Rios F.J., Suckau V.E, 2008. The Itabirites of the Quadrilátero Ferrífero and Related High-Grade Iron Ore Deposits: An Overview. *Society of Economic Geologists* 15, 223-254.
- Sakai, H., Des Marais, D.J., Ueda, A., and Moore, J.G., 1984, Concentrations and isotope ratios of carbon, nitrogen and sulfur in ocean-floor basalts: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 48, p. 2433–2441.
- Schorscher, H.D., 1976. Polimetamorfismo do Pré-Cambriano na região de Itabira, Minas Gerais. 29º Congresso Brasileiro de Geologia. Sociedade Brasileira de Geologia, Ouro Preto, pp. 194–195.
- Schorscher, H.D., 1978. Komatiítos na estrutura “Greenstone Belt” Série Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. 30º Congresso Brasileiro de Geologia. Sociedade Brasileira de Geologia, Recife, pp. 292–293.
- Taylor, H.P., Jr., 1974, The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydrothermal alteration and ore deposition: *Economic Geology*, v. 69, p. R43-8R3
- Teixeira, W., Figueiredo, M.C.H, 1994. An outline of Early Proterozoic crustal evolution in the São Francisco craton, Brazil: a review. *Precambrian Research* 53, 1-22.
- Teixeira, W., Carneiro, M.A., Noce, C.M., Machado, N., Sato, K., Taylor, P.N., 1996. Pb, Sr and Nd isotope constraints on the Archean evolution of gneissic–granitoid complexes in the southern São Francisco craton, Brazil. *Precambrian Research* 78, 151–164.
- Thiery, R., van der Kerkhof, A.F., Dubessy, F., 1994. vX properties of CH₄ –CO₂ and CO₂ –N₂ fluid inclusions: modeling for T-318C and P-400 bar. *Eur. J. Mineral.* 6, 753–771.
- Tomkins, A.G, Pattinson, D.R.M and Zaleski, E 2004. The Hemlo gold deposit, Ontario: An example of melting and mobilization of a precious metal sulfosalt assemblage during amphibolite facies metamorphism and deformation. *Econ Geol*, v 99. pp 1063-1084.
- Vale 2012. Relatório de produção. Disponível em: http://www.vale.com/PT/investors/Quarterly-results-reports/Quarterly-results/ResultadosTrimestrais/PREPORTIT12_p.pdf , acessado em 20/12/2012.
- Vial, D., Dewitt, Lobato, L. M. Thormann, C. H, 2007 . The geology of the Morro Velho gold deposit in the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil. *Ore Geology Reviews*, v. 32, p. 511-542.
- Zucchetti, M., 1998. Geoquímica dos metabasaltos do Grupo Nova Lima, Supergrupo Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. MSc thesis, Instituto Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, Brasil, 124 pp.
- Zucchetti, M., Baltazar, O. F., 2000. Rio das Velhas Greenstone Belt lithofacies associations, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. 31th International Geological Congress, Rio de Janeiro, Brazil, CD-ROM.

ANEXO I

Petrografia microscópica

As amostras correspondem aos diversos tipos de veios e vênulas compostos principalmente por quartzo e carbonato, que podem ocorrer em todos os litotipos do depósito Córrego do Sítio. A denominação mineralógica destes litotipos é apresentada em ordem decrescente, ou seja, em sericita-quartzo xisto, sericita é o mineral dominante, seguido por quartzo. O nome da amostra corresponde ao nome do testemunho de sondagem e sua profundidade. As proporções dos minerais foram determinadas por estimativa visual nas lâminas delgadas polidas, e considerando características gerais dos veios, excluindo porções de rocha encaixante.

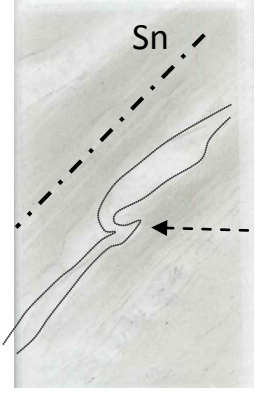
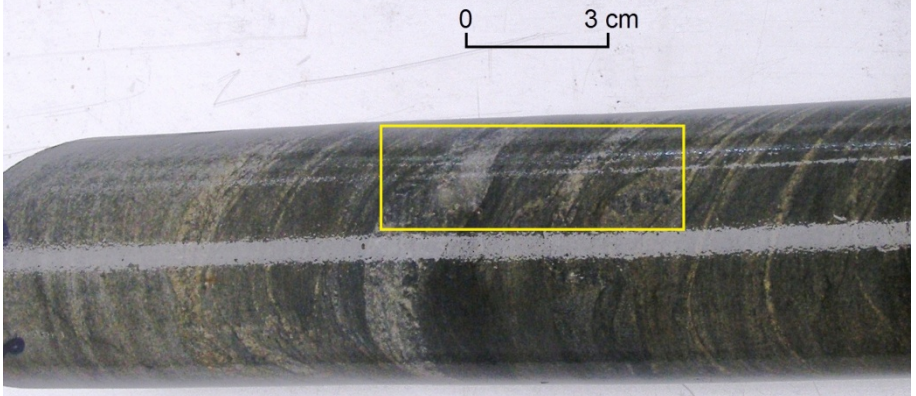
Composição de carbonatos foi confirmada por análises em microsonda eletrônica JEOL, modelo JXA 8900RL, e presença de sulfossais detectadas por imagens de elétrons retroespalhados e análises qualitativas EDS (*energy dispersive spectroscopy*) e quantitativas WDS (*wavelength dispersive spectroscopy*).

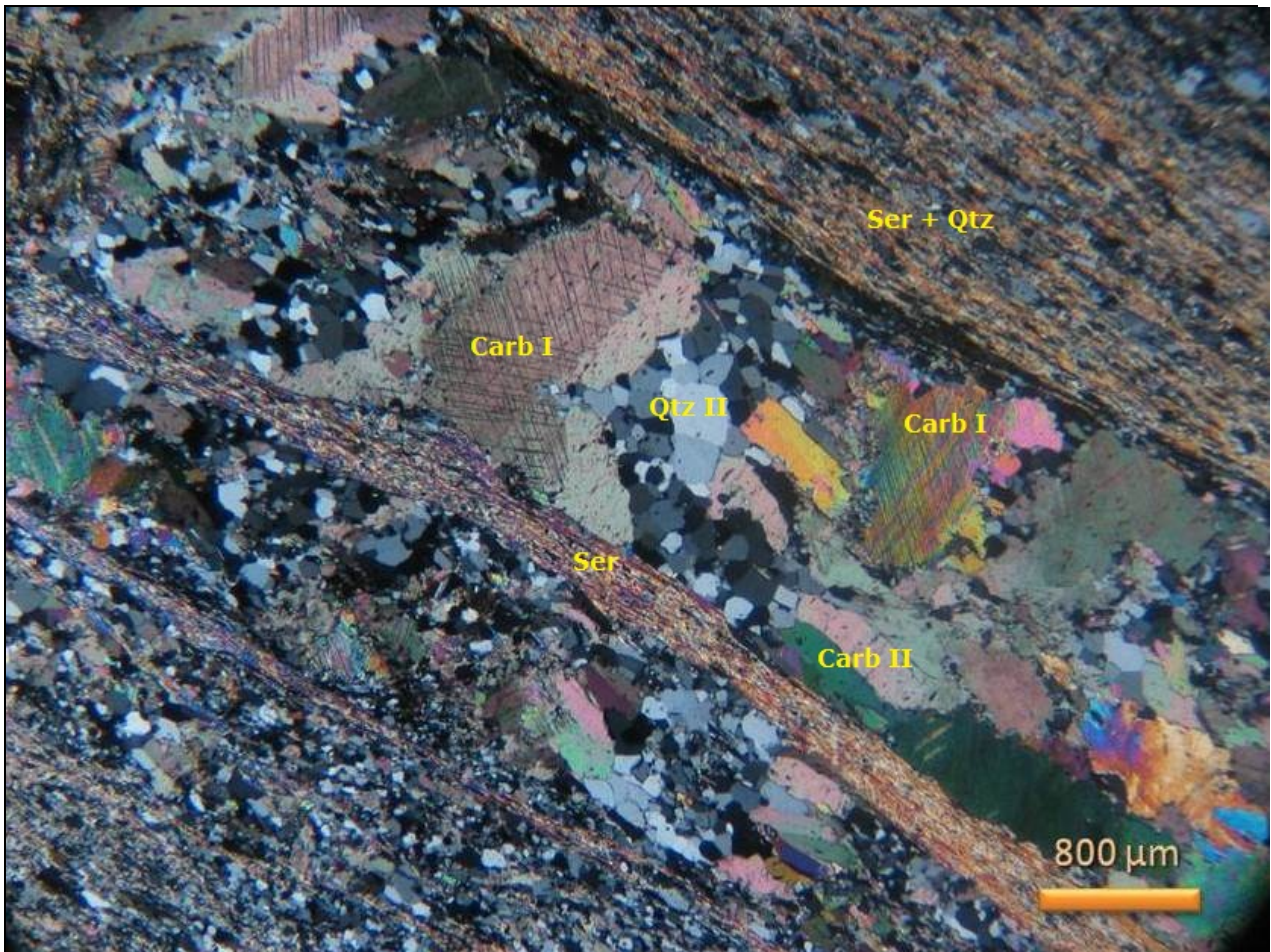
As siglas utilizadas correspondem a: Ank – ankerita; Apy – arsenopirita; Bert – berthierita; Bou – boulangierita; Ca – calcita; Clo – clorita; Co – cobaltita; Cpy – calcopirita; Esf – esfalerita; Epi – epidoto; Ga – galena; Ilm – ilmenita; Mag – magnetita; Mus – muscovita; Po – pirrotita; Py – pirrita; Qtz – quartzo; Ser – sericita; Stb – estibinita; Tet – tetraedrita; Tit – titanita e Ull – ullmanita; BSE – backscattered electron.

A tabela abaixo apresenta as amostras estudadas com respectivos tipos de veios-vênulas e rocha hospedeira.

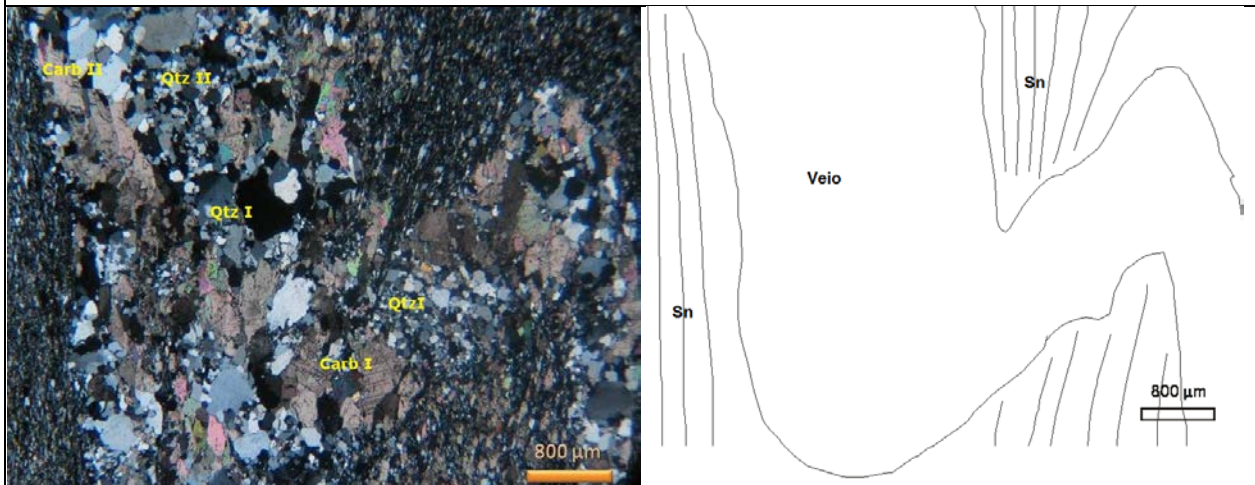
Encaixante	Furo	Profundidade (m)	Tipo de veio	Página
MG	FCS926	84,40	V1	
MG	FCS926	113,85	V1	
RPP	FCS926	130,80	V1	
DB1	FCS926	160,00	V4	
MG	FCS926	169,63	V3	
VQZS	FCS926	192,20 B	V1	
VQZS	FCS926	195,70	V1	
RRP	FCS926	202,50	V2	
VQZS	FCS926	213,85	V1	

Abreciações: Nomeclatura da mina: DB – dique metamáfico; HIDS – minério sulfetado; MG - metagrauvaca ; RRP – ritmito pelítico-psamítico; VQZS – veio de quartzo ankerita sulfetado. Tipos de veios: V1 – quartzo+ankerita+sulfetos±sulfossais, V2 – quartzo+ankerita+sulfetos, V3 – quartzo+ankerita±sulfetos e V4 – veios quartzo+calcita.

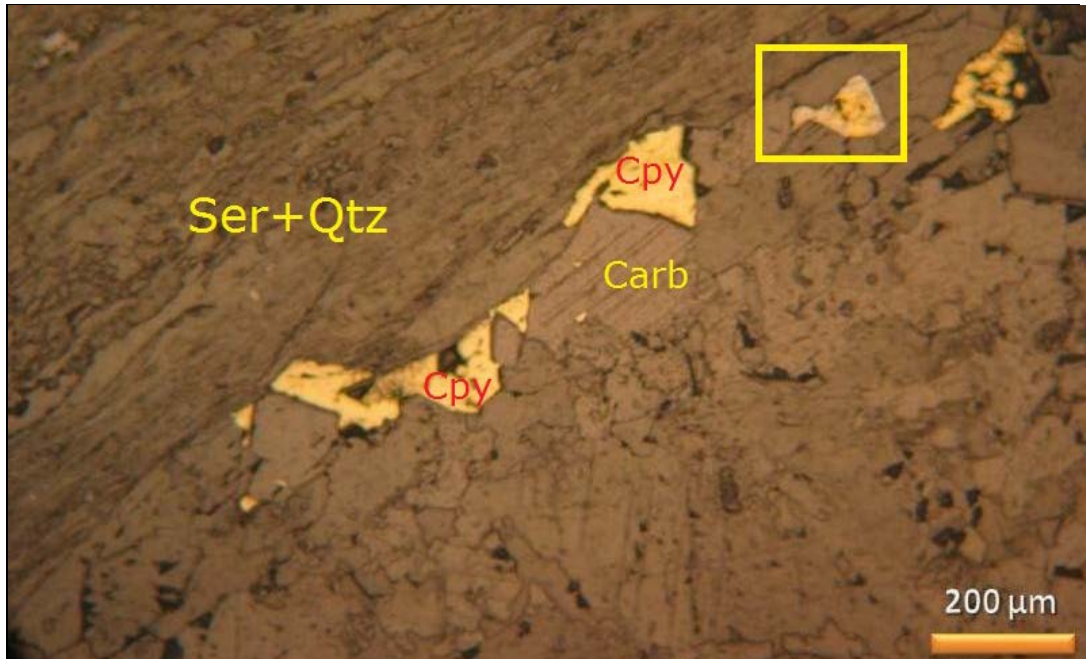
Amostra FCS926-84,40	
Lâmina	Ponto amostrado no testemunho de sondagem
	
Mineralogia do Veio	
Transparentes (%)	Opacos (%)
Quartzo ±60	Pirita rara
Ankerita ±37	Calcopirita rara
Mica branca ±2	Galena rara
Clorita ±1	Pirrotita rara
	Boulangerita rara
Rocha encaixante: Quartzo-sericita xisto (Metagrauvaca)	
Descrição	
<p>Veios milimétrico (<1 cm) de quartzo e ankerita concordantes com a foliação regional principal (S_n). Na borda do veio ocorre sericita e clorita de granulação fina (Fotomicrografias 1 e 2).</p> <p>Ankerita – são encontrados dois tipos de ankerita: (i) granulação grossa (<2,0 mm), manchados, maclado e tem contatos irregulares a lobados; (ii) cristais são mais límpidos que ocorrem em agregados de cristais de granulação fina (<0,08 mm), em contato irregular a poligonizado, anédricos e localmente alongados. Em análise realizada em microsonda verificou-se que a composição é a mesma, portanto diferem apenas na textura (Imagem BSE e espectros 3).</p> <p>Quartzo - ocorre com granulação de média a muito fina, os cristais (I) médios (>1 mm) tem contatos lobados, são deformados e tem extinção ondulante. Os cristais de quartzo (II) mais finos tem contatos poligonais a irregulares e extinção reta.</p> <p>Mica branca – as palhetas formam faixas, que podem concentram-se na borda do veio, formando agregados de tamanho fino a muito fino (<0,02 mm) orientados segundo a foliação principal da rocha (S_n).</p> <p>Pirita e Pirrotita – raros cristais finos (<0,06 mm) que ocorrem de forma disseminada em meio ao quartzo e ankerita do veio. Ullmanita e boulangerita sobrecrescem em cristais de pirrotita, ainda é possível observar associados a esses finos cristais de galena (Imagens BSE 2).</p> <p>Calcopirita – raros cristais de granulação fina a média (<0,1 mm) disseminados em meio ao veio ou na borda da pirita. Ocorre também outra fase mineral nas bordas da calcopirita com enriquecimento de cobalto e níquel (Fotomicrografia 3 e Imagem BSE 1).</p>	



Fotomicrografia 1 – Amostra FCS926-84,40 – Venulação V1 de textura granoblástica com bordas contornadas por sericita (Luz transmitida e nicóis cruzados, aumento de 25x).



Fotomicrografia 2 – Amostra FCS926- 84,40 m – Porção de veio concordante a S_n e dobrada, ao lado desenho esquemático com detalhe da foliação (Luz transmitida e nicóis cruzados, aumento de 2,5x).



Fotomicrografia 3 – Amostra FCS926- 84,40 m – Calcopirita na borda do veio, no quadrado amarelo (Imagem BSE 1, abaixo) cristal de calcopirita contendo uma fase rica em Co e Ni nas bordas, tal variação foi identificada a através da análise em microsonda (Luz refletida, aumento de 100x).

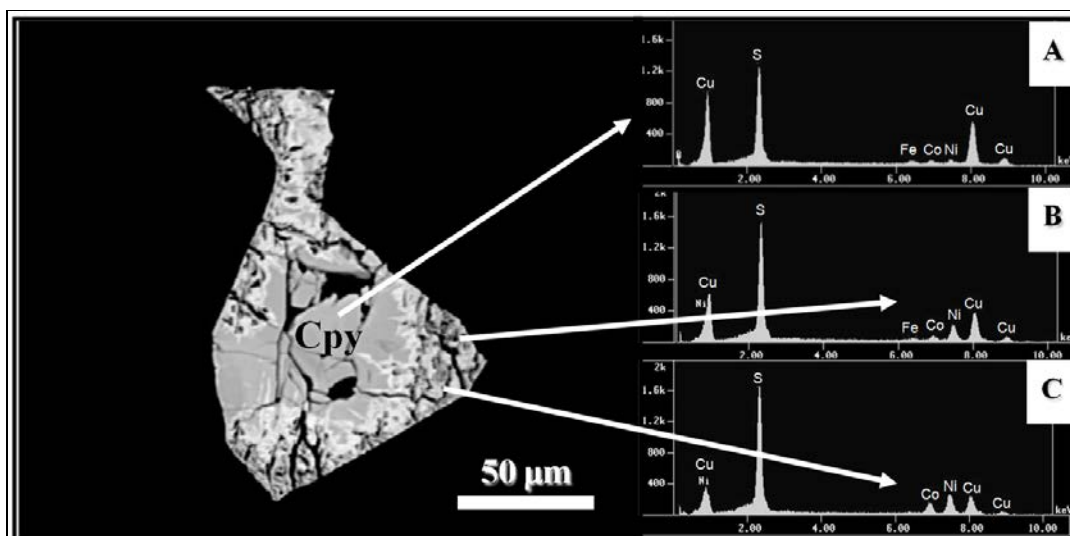


Imagem BSE e espectros 1 – Amostra FCS926- 84,40 m – Cristal de calcopirita com bordas claras, enriquecidas em Co e Ni. A) composição padrão. B) e C) mostram a evolução da perda de Fe e Cu e enriquecimento de Ni e Co.

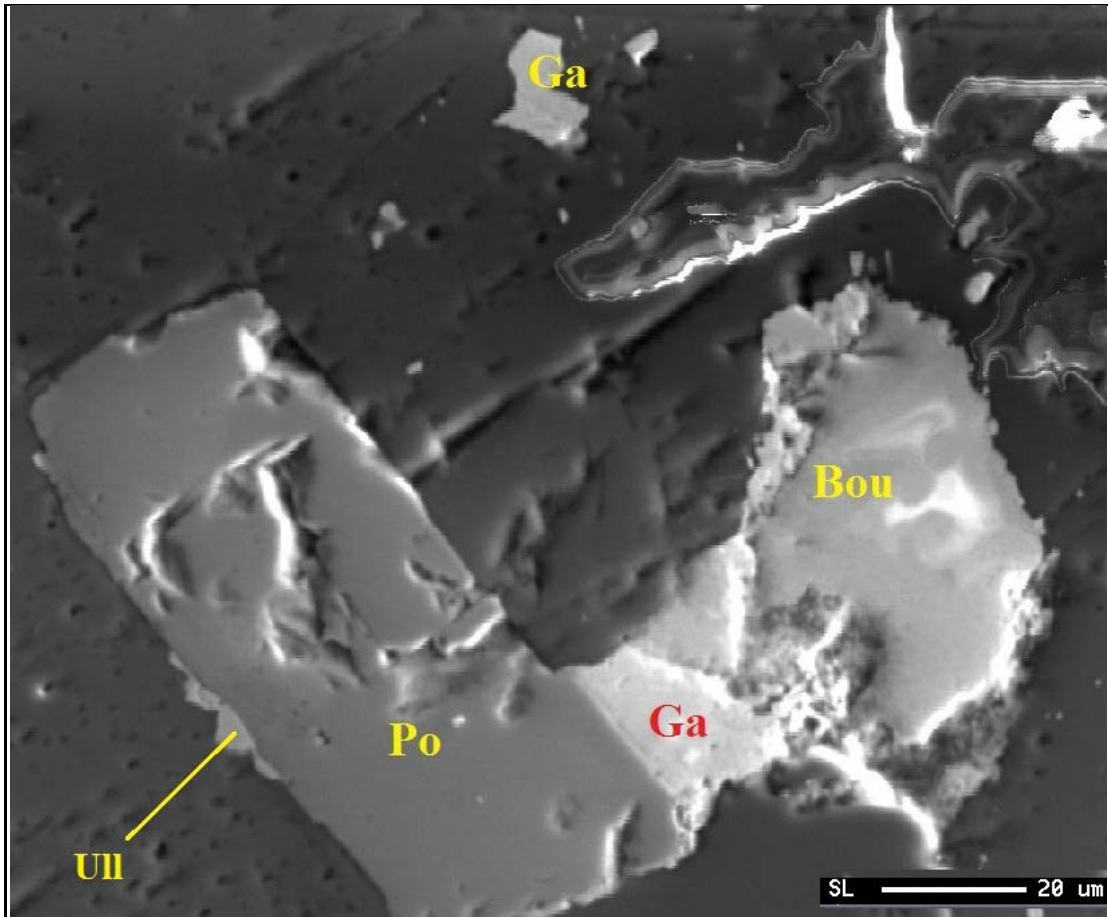


Imagem BSE 2 - Amostra FCS926- 84,40 m – Imagem mostrando quatro fases minerais: cristal retangular de pirrotita, em que na sua borda há formação de ullmanita, galena e sulfossal de antimônio e chumbo (provável boulangerita) .

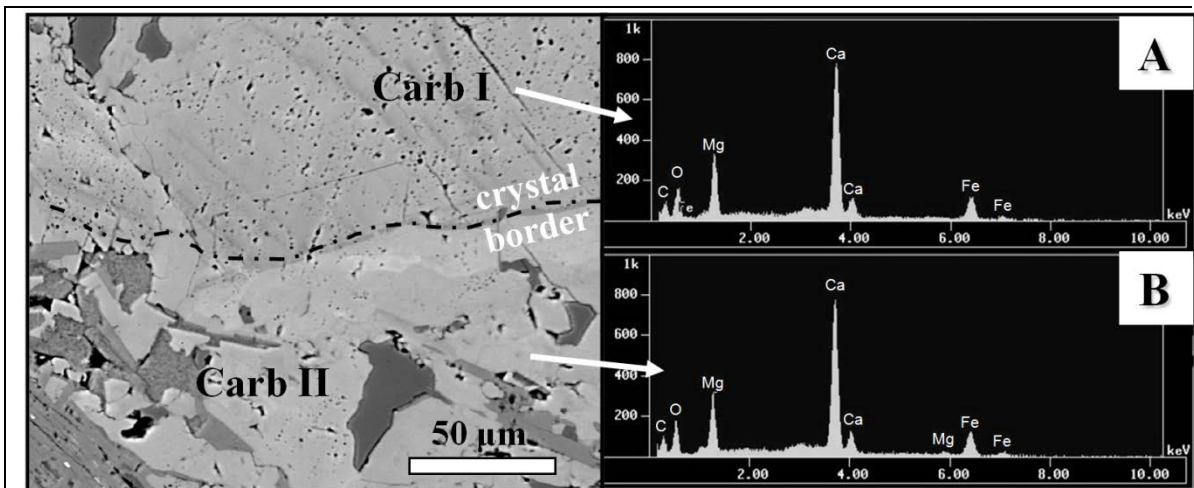

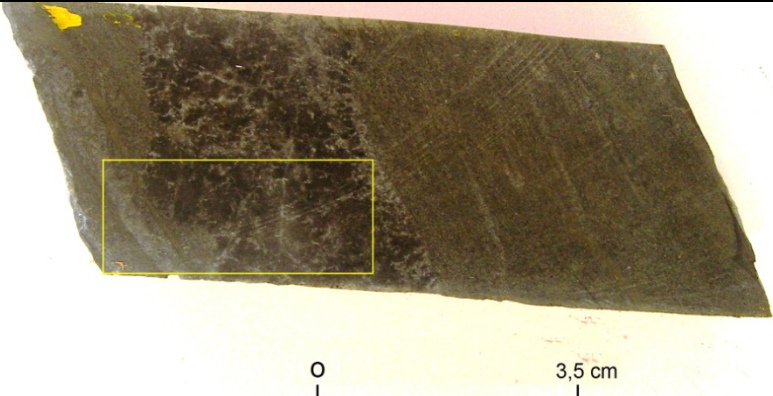
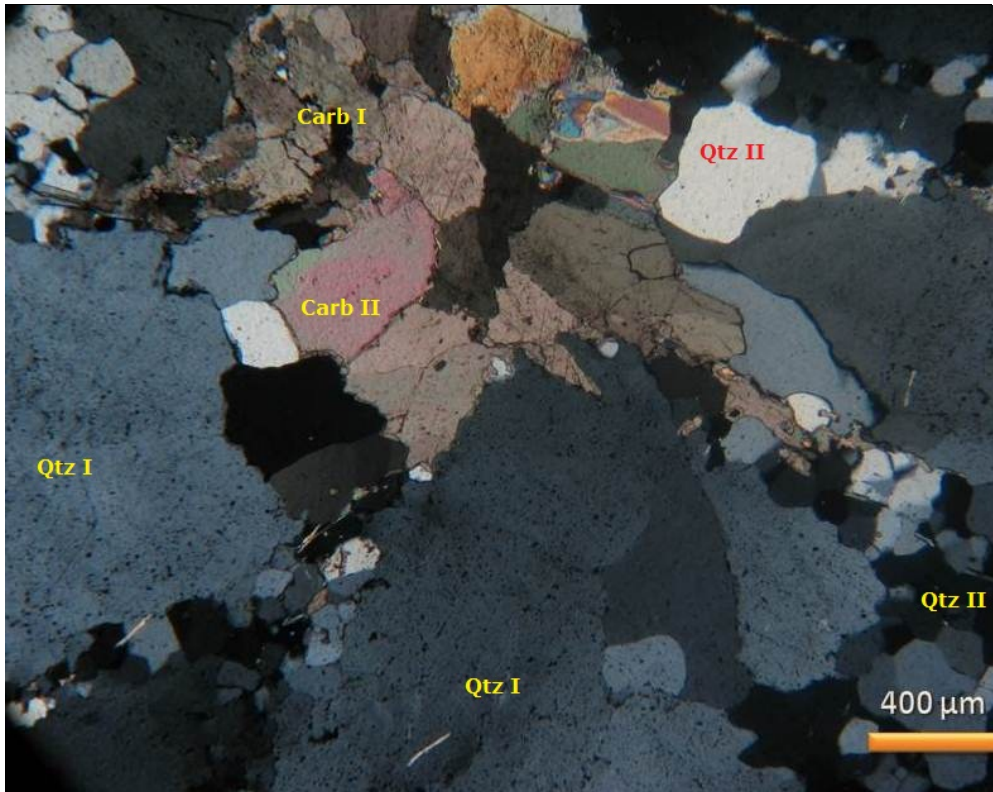
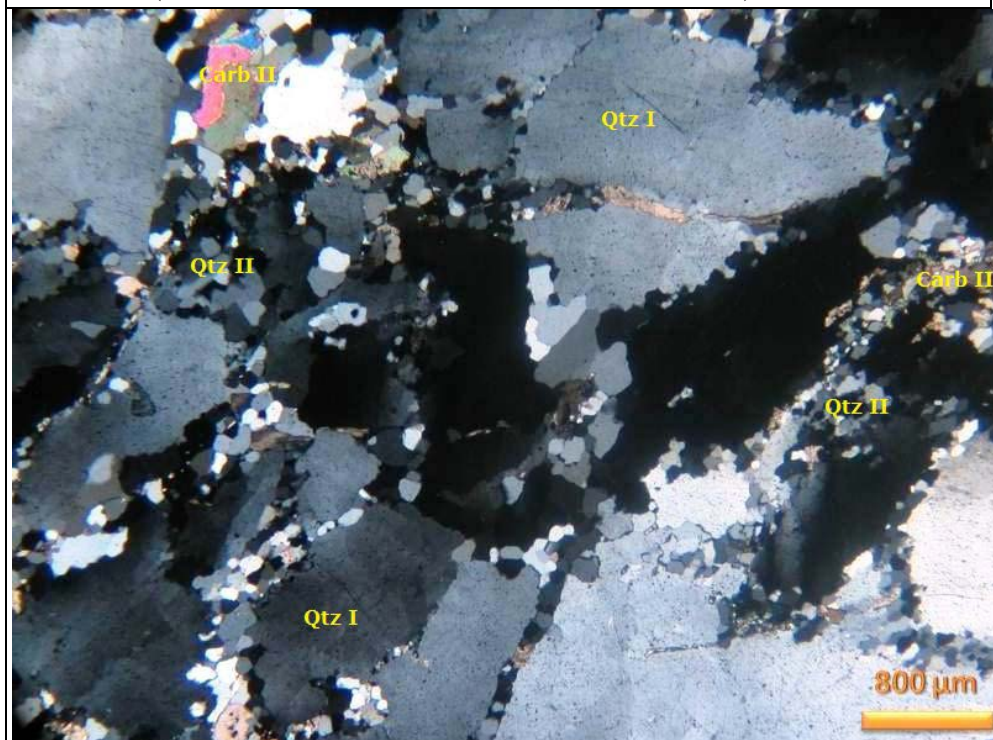


Imagem BSE e espectros 3– Carbonatos de mesma composição ankerítica apresentando apenas diferença textural.

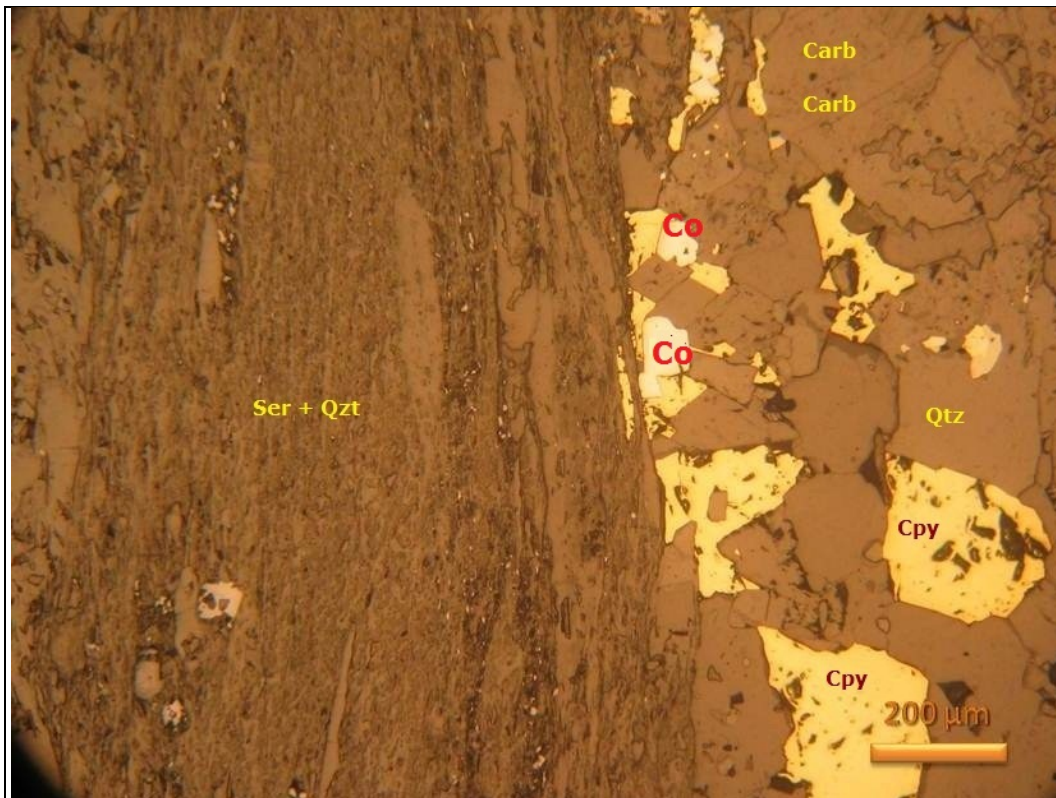
Amostra FCS926-113,85	
Lâmina	Ponto amostrado no testemunho de sondagem
	
Mineralogia	
Transparentes (%)	Opacos (%)
Ankerita ±80	Pirita rara
Quartzo ±15	Calcopirita rara
Sericita ±3	Cobaltita rara
Clorita ±2	Pirrotita rara
	Esfalerita rara
	Ullmanita/ Tetraedrita rara
Rocha encaixante: Sericita-quartzo-carbonato xisto	
Descrição	
<p>Veio com 3,0 cm de espessura, concordante, de granulação média a grossa e apresenta minerais com textura granoblástica. É formado por quartzo, ankerita, sericita e sulfetos.</p> <p>Quartzo - É possível observar dois tipos de quartzo: (i) quartzo mais grosso (até 4,0 mm) tem extinção ondulante, contato dentado a irregular e maior quantidade de inclusões fluidas; (ii) quartzo mais fino (< 0,1 mm) é mais límpido e tem contatos poligonizados. O arranjo destes cristais de quartzo apresenta textura de recristalização com grãos grossos (I), sendo bordejados por finos cristais de quartzo (II) e ankerita.</p> <p>Ankerita - forma cristais médios (até 0,9 mm) a finos (0,04 mm), sendo os mais grossos maclados e de contato irregular e, localmente, passando a um cristal mais límpido. A ankerita mais fina e límpida é intergranular ao quartzo grosso, formando agregados associados ao quartzo fino (Fotomicrografia 2).</p> <p>Sericita e clorita – estão presentes na borda do veio, onde a rocha apresenta textura milonítica.</p> <p>Ilmenita- ocorre disseminada em cristais finos (0,02 a 0,1 mm) em meio a fragmentos da rocha.</p> <p>Calcopirita (<0,4 mm) ocorre em equilíbrio com ankerita e quartzo em pequenos agregados em meio ao veio. Pode-se observar algumas partículas de calcopirita inclusas na arsenopirita.</p> <p>Cobaltita forma finos cristais que sobrecresce a cristais de calcopirita (Fotomicrografia 3 e imagem BSE 1)</p> <p>Pirita - aparece em finos cristais (<0,2 mm) disseminados pelo veio e inclusa no único cristal esfalerita (Fotomicrografia 4).</p> <p>Pirrotita - forma cristais alongados paralelamente as paredes dos veios e alguns cristais disseminados na borda.</p>	



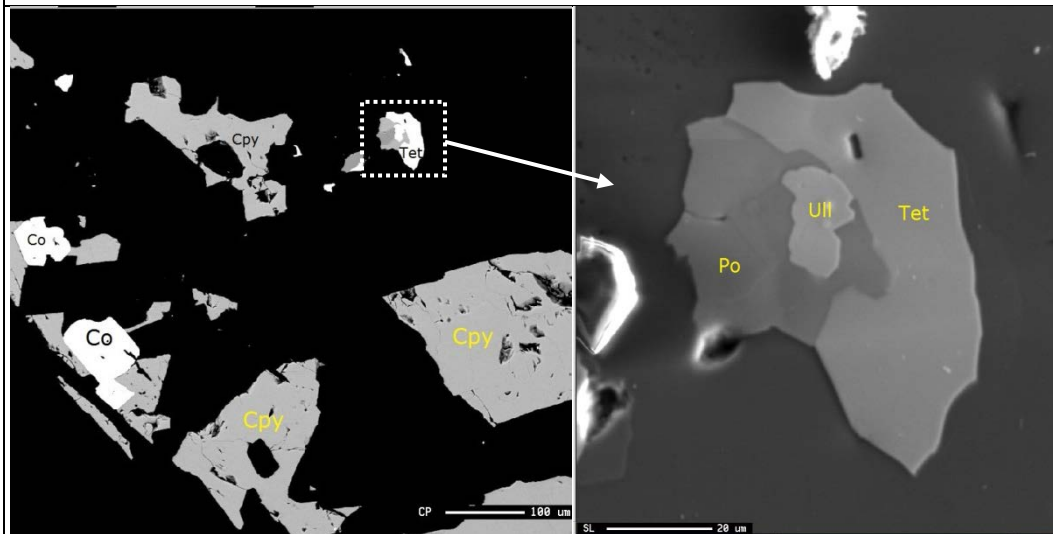
Fotomicrografia 1 – Amostra FCS926- 113,85 m – Veios com minerais de textura granoblástica onde é possível observar dois tipos de quartzo e dois tipos de ankerita (Luz transmitida e nicóis cruzados, aumento de 5x).




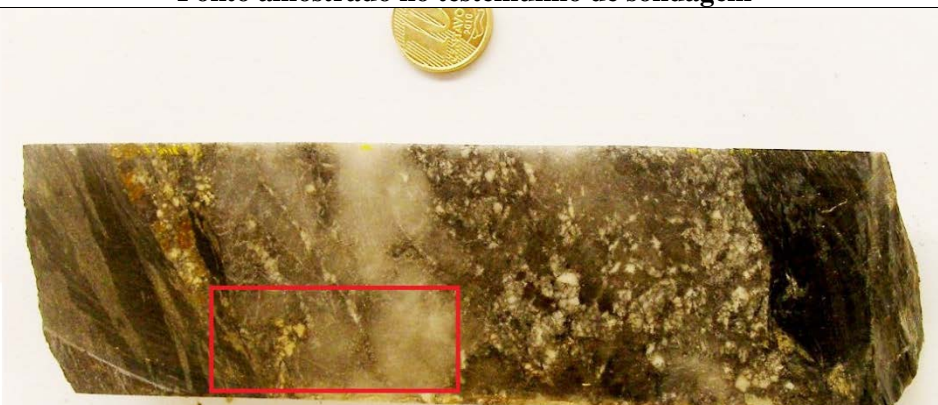
Fotomicrografia 2 – Amostra FCS926- 113,85 m - Feição de recristalização observada no quartzo, com cristais mais finos e límpidos bordejando cristais mais grossos (Luz transmitida e nicóis cruzados, aumento de 25x).

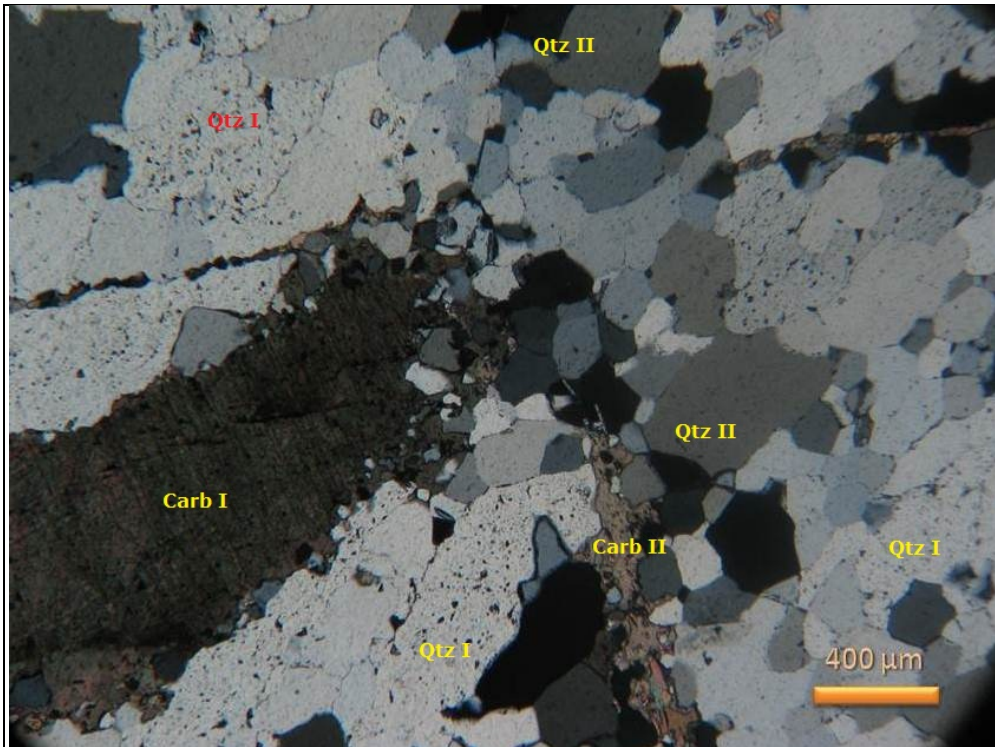


Fotomicrografia 3 – Amostra FCS926- 113,85 m – Cobaltita forma finos cristais sobrecrescendo cristais de calcopirita (Luz refletida, aumento de 100x).

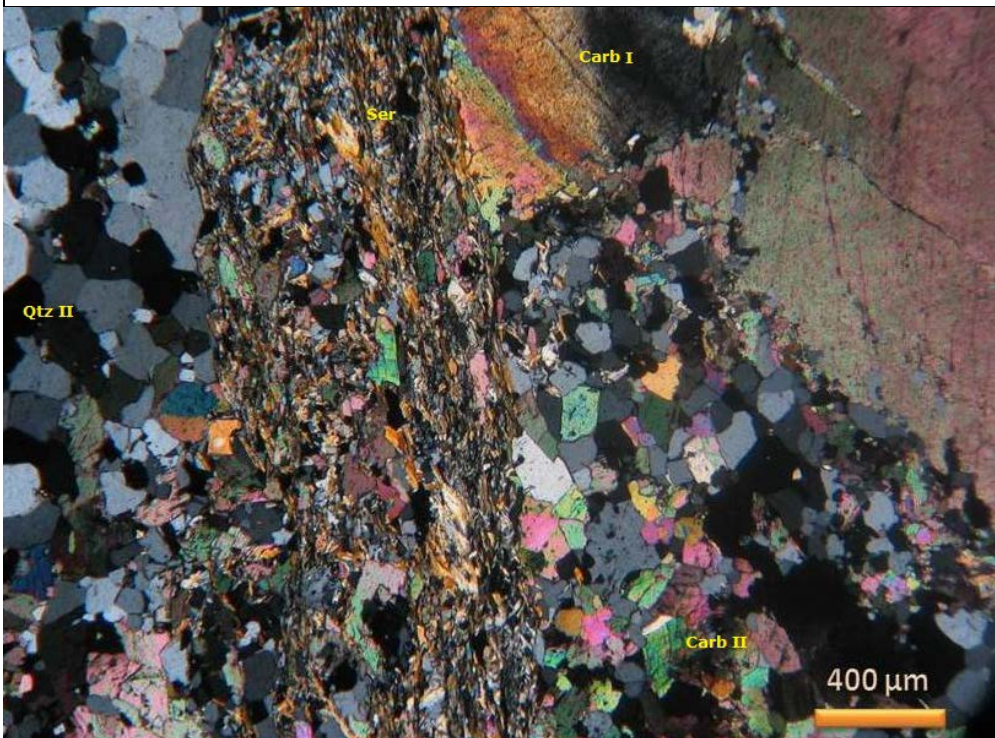


Imagens BSE 1 – Amostra FCS926- 113,85 m – Cobaltita, ullmanita e tetraedrita sobrecrescem a calcopirita e pirrotita.

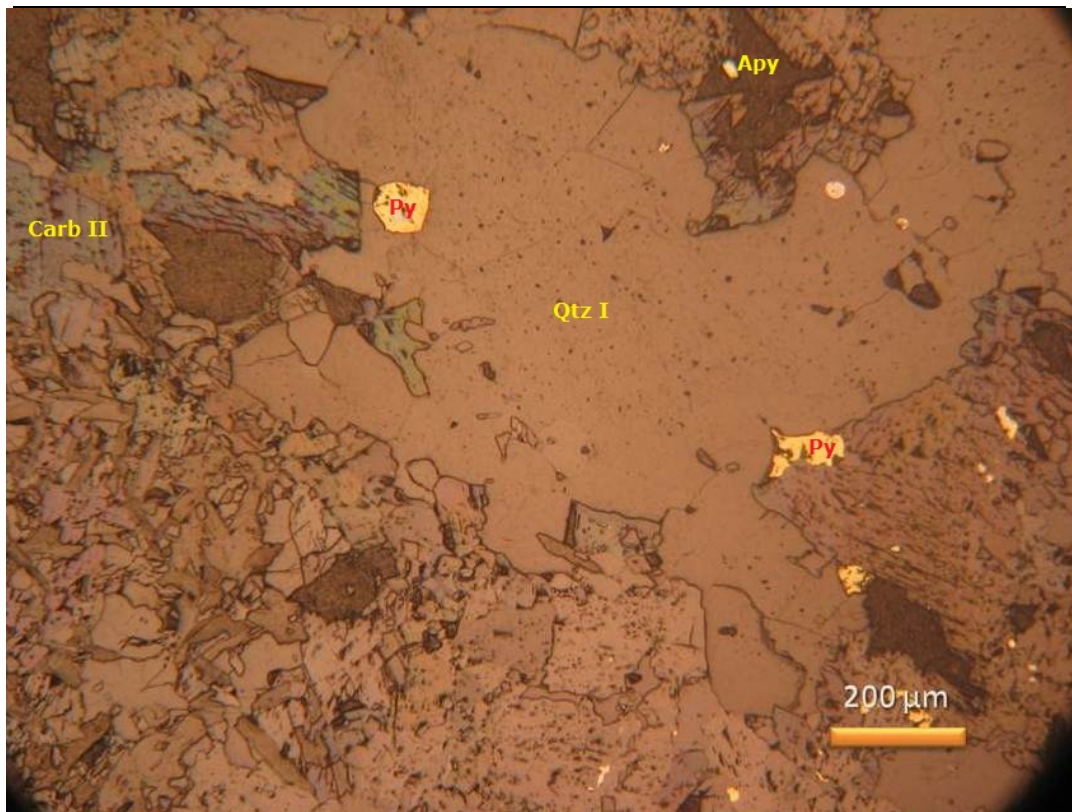
Amostra FCS926-130,80	
Lâmina	Ponto amostrado no testemunho de sondagem
	
Mineralogia	
Transparentes (%)	Opacos (%)
Quartzo ±74	Pirita rara
Ankerita ±20	Arsenopirita rara
Sericita ±5	Pirrotita rara
	Calcopirita rara
	Argentopentlandita rara
Rocha encaixante: Sericita-quartzo xisto sulfetado (ritmito pelítico-psamítico)	
Descrição	
<p>Veio com 12 cm de espessura observada em ritmito pelítico-psamítico, encaixado na foliação principal da rocha. Os minerais têm textura granoblástica e são principalmente quartzo, ankerita e opacos; a granulação destes varia de muito fina a grossa. O veio tem feição de microfraturamento, tipo “<i>stockwork</i>”, sendo as fraturas preenchidas por ankeritas (fotomicrografias 1).</p> <p>Ankerita – Ocorrem duas variedades: (i) uma de cristais com granulação de média a grossa (1,2 a 4,0 mm), os contatos são irregulares a dentados. Apresentam maclas e aspecto mais “rugoso” (Fotomicrografia 1). (ii) outra, de cristais mais finos (0,1 mm), mais límpidos e formam contato irregular; encontram-se intersticiais ao quartzo ou na borda dos cristais mais grossos de Ankerita (fotomicrografias 1 e 2).</p> <p>Quartzo – apresenta-se em dois tipos: (i) quartzo (I) mais grosso (até 3,2 mm), com extinção ondulante, contatos irregulares a dentados e processo de formação de subgrãos. Tem um aspecto mais manchado, possivelmente devido ao elevado número de inclusões fluidas; (ii) quartzo (II) é de fino a médio (0,1 a 1,2 mm), com contatos poligonizados e mais límpidos. O quartzo tipo II perfaz cerca de 90% de todo o quartzo da lâmina.</p> <p>Sericita – as palhetas exibem orientação incipiente paralela ao limite dos veios, formando agregados finos juntamente com o quartzo nas bordas dos cristais de ankeritas mais grossos (Fotomicrografia 2).</p> <p>Pirita - fina a grossa (0,1 a 4,0 mm) anédrica, ocorre em meio ao quartzo ou em meio ao ankerita, na porção sul da lâmina (ver seta na fotografia acima). Alguma calcopirita ocorre inclusa nos cristais de pirita ou cresce nas bordas deste mineral e passam a pirrotita e argentopentlandite [Ag(Fe,Ni)₈S₈] (Fotomicrografias 3 e 4 e Imagem BSE 1).</p>	



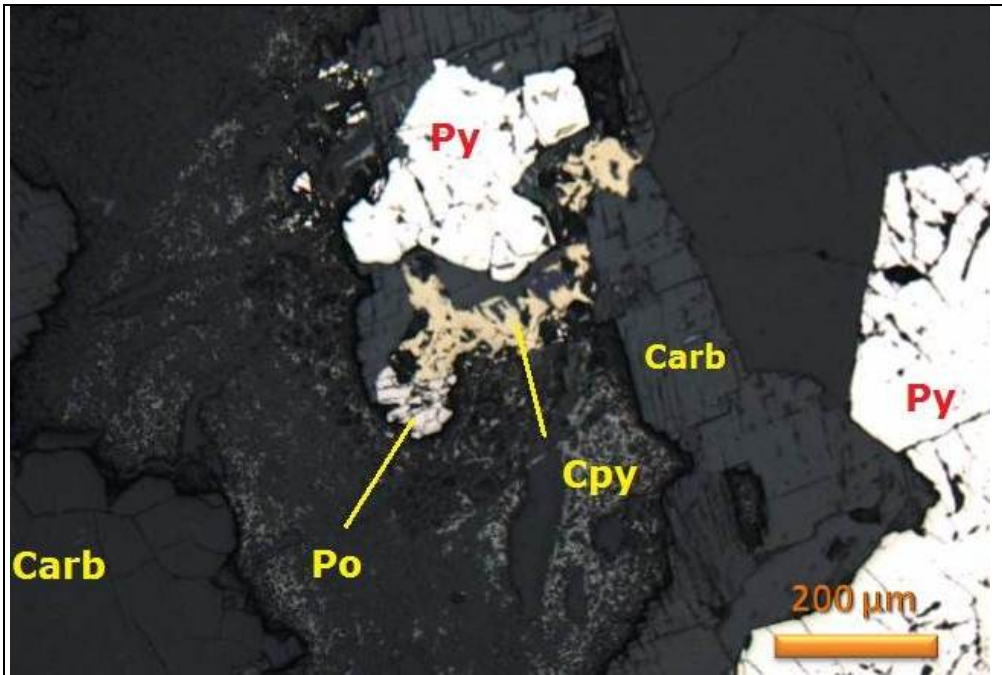
Fotomicrografia 1 – Amostra FCS926-130,80 – Quartzo (II) com microfraturas preenchidas por finos agregados de Ankerita e quartzo (Luz transmitida e nicóis cruzados, aumento de 50x).



Fotomicrografia 2 – Amostra FCS926-130,80 – Porções da rocha com agregados finos de sericita, quartzo e ankerita alongados (Luz transmitida e nicóis cruzados, aumento de 50x).



Fotomicrografia 3 – Amostra FCS926-130,80 – Porção sul da lâmina (marcada com seta na fotografia da lamina acima) com rara presença de pirita e arsenopirita (Luz refletida, aumento de 100x).



Fotomicrografia 4 – Amostra FCS926-130,80 – Cristais de calcopirita passando a pirrotita e argentopentlandita (visível apenas na imagem BSE abaixo), na borda de cristal grosso de pirita (Luz refletida, aumento de 100x).

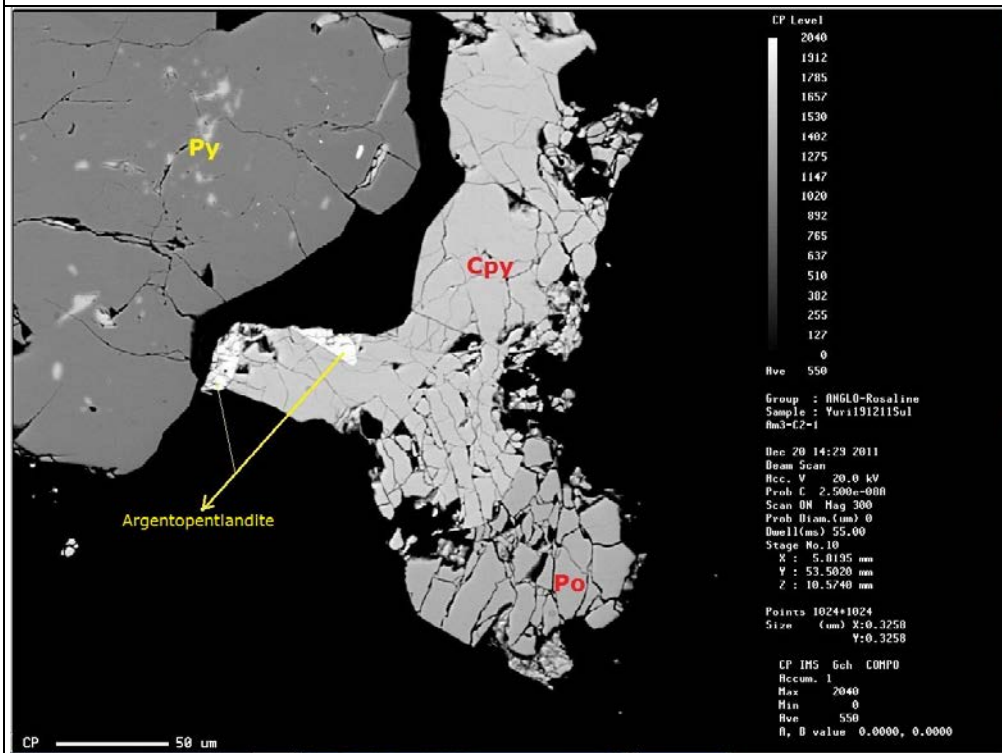

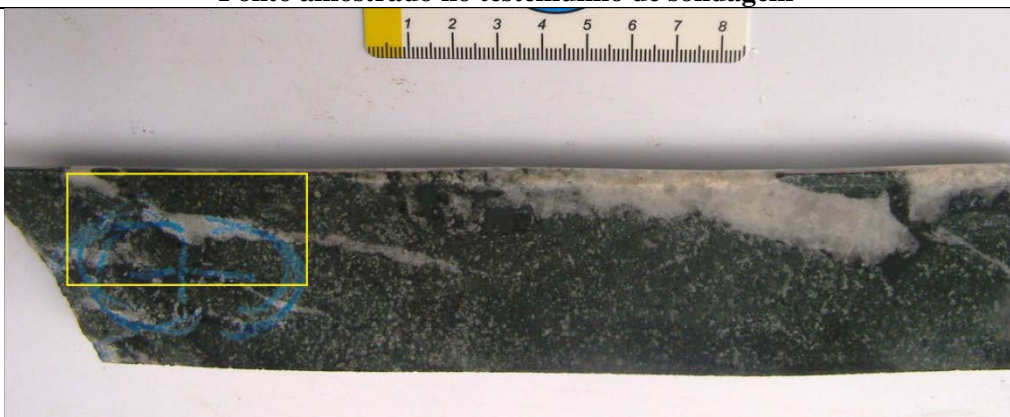
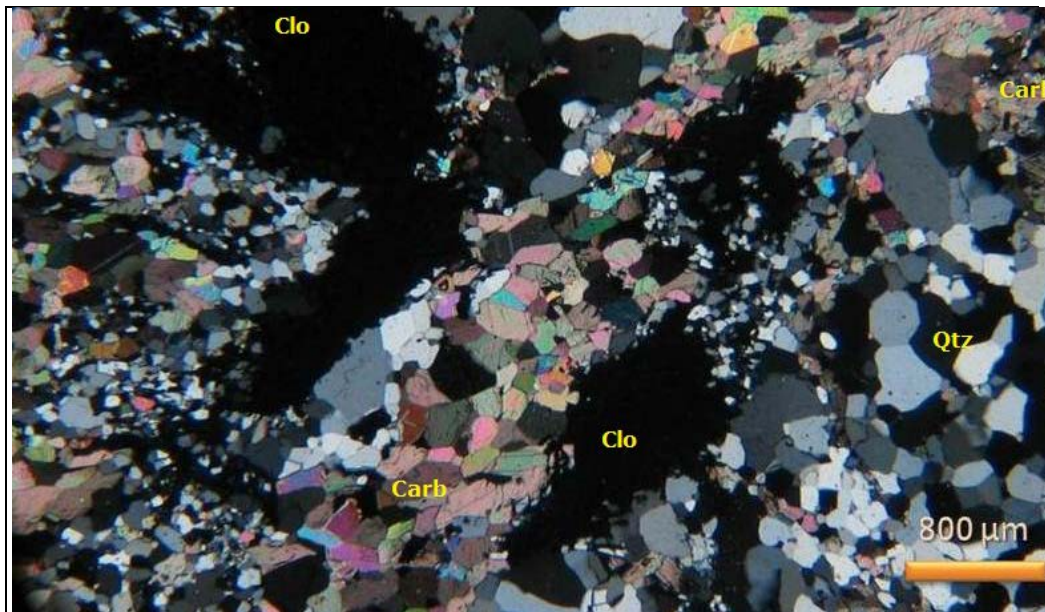
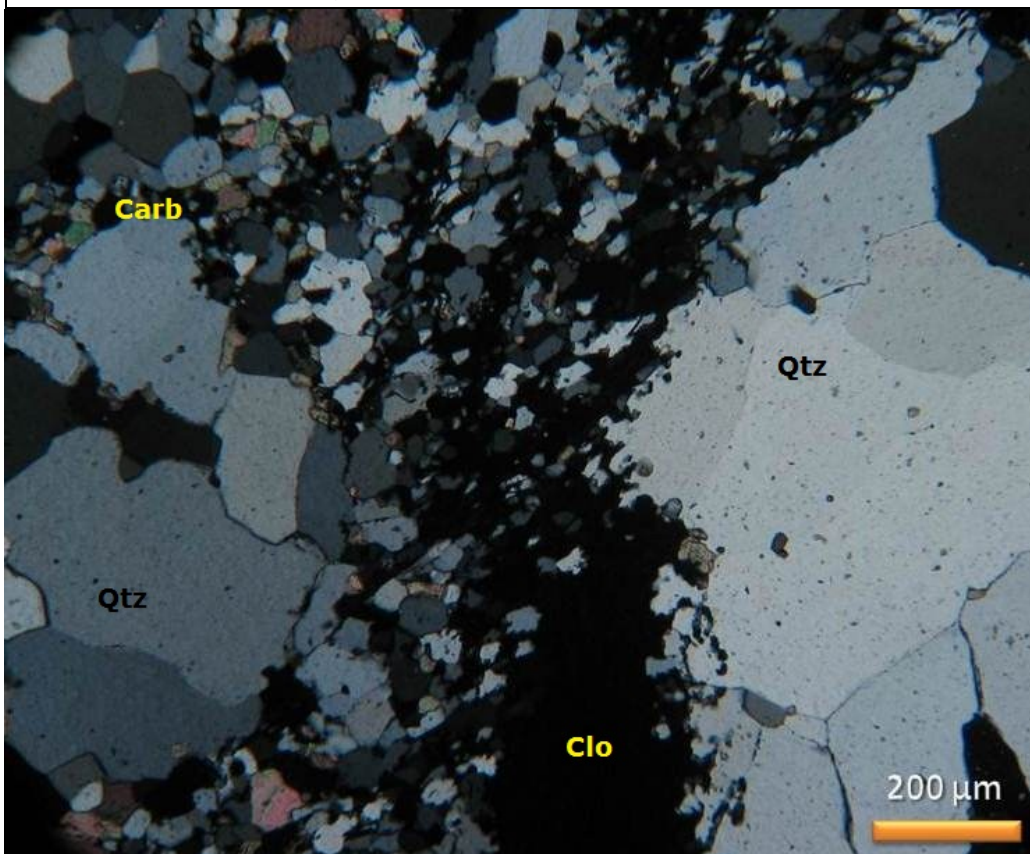


Imagem BSE 1– Amostra FCS926-130,80 – Cristais de calcopirita passando a pirrotita e argentopentlandita, em borda de cristal grosso de pirita.

Amostra FCS 926-160,00	
Lâmina	Ponto amostrado no testemunho de sondagem
	
Mineralogia	
Transparentes (%)	Opacos (%)
Quartzo ±60	Pirita rara
Clorita ±5	Magnetita rara
Calcita ±35	
Rocha encaixante: metagabro alterado a carbonato (dique DB1)	
Descrição	
<p>Veios descontínuos com espessura variável com cerca de 1,5 cm, encaixado em metagabro alterado a carbonato. O veio pode apresentar-se brechado. Os cristais tem textura granoblástica e alguns fragmentos da rocha permanecem dispostos de maneira dispersa em meio ao veio.</p> <p>Quartzo – apresenta cristais com granulação fina a média (<0,6 mm) com contatos poligonizados e extinção reta (Fotomicrografia 1). Localmente ocorrem cristais com extinção ondulante e contatos lobados.</p> <p>Calcita - são cristais de granulação fina a grossa (<4,5 mm), anédricos a euédricos, límpidos e encontram-se comumente em agregados associados a quartzo fino poligonizado (Fotomicrografia 1).</p> <p>Clorita - exibe cor de interferência roxa característica de clorita rica em ferro. Ocorre na borda do veio e em fragmentos da rocha em meio ao veio. Os cristais de quartzo e carbonato parecem consumir a clorita (fotomicrografia 2).</p> <p>Pirita e Magnetita – são raras, de granulação muito finas, subédricas e se concentram no contato veio/rocha.</p>	

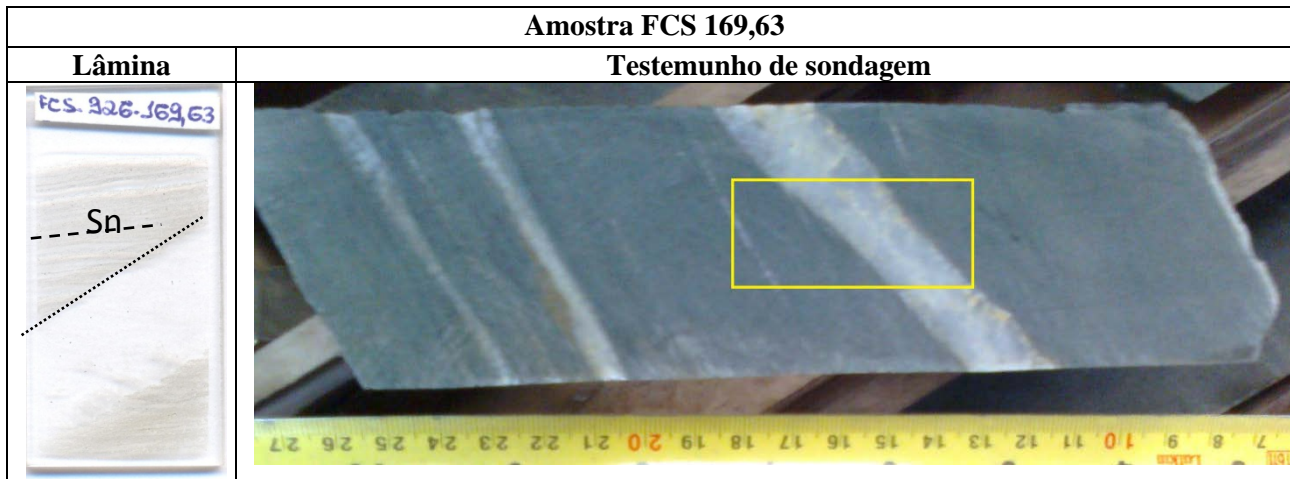


Fotomicrografia 1 – Amostra FCS926-160,00 – Veio com minerais de textura granoblástica, formado principalmente por quartzo e calcita (Luz transmitida e nicóis cruzados, aumento de 2,5x).



Fotomicrografia 2 – Amostra FCS926-160,00 – Quartzo com extinção reta, parece sobrecrecer cristais de clorita (Luz transmitida e nicóis cruzados, aumento de 100x).

Amostra FCS 169,63



Mineralogia

Transparentes (%)		Opacos (%)	
Quartzo	±80	Pirita	rara
Ankerita	±20	Calcopirita	rara

Rocha encaixante: carbonato-quartzo-sericita xisto (Metagrauvaca)

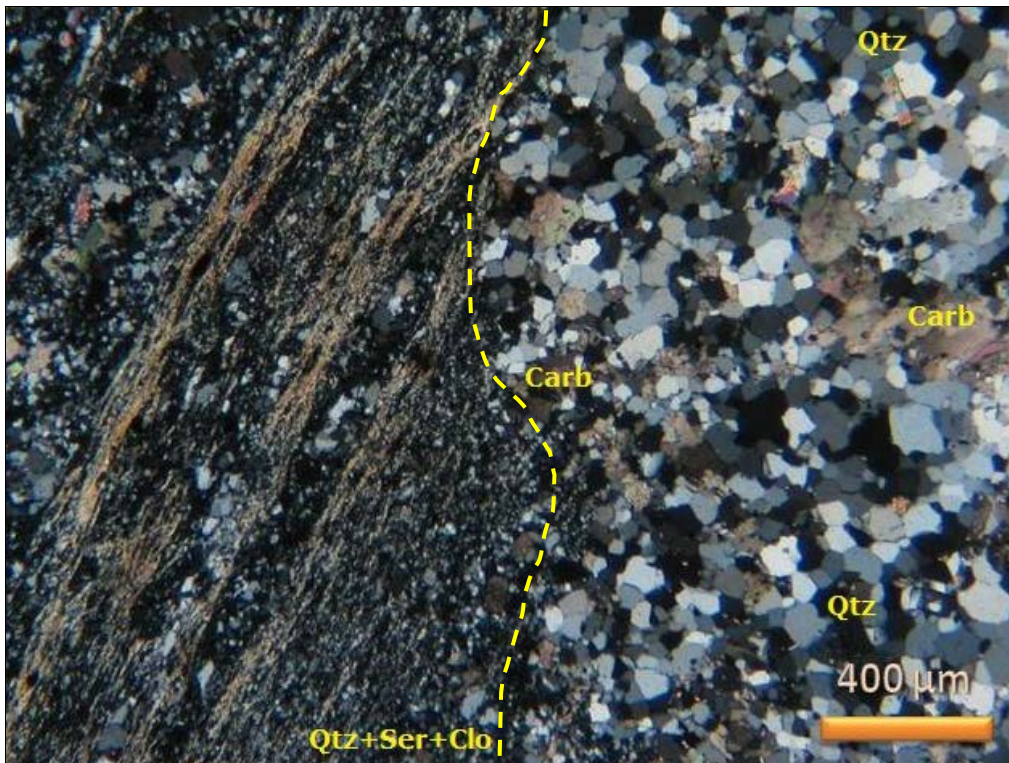
Descrição

Veio de 2,5 cm de espessura composto exclusivamente de quartzo e ankerita. Os minerais apresentam textura granoblástica. O veio se posiciona obliquamente à foliação principal (S_n) da rocha (ver foto de lâmina acima e Fotomicrografia 1).

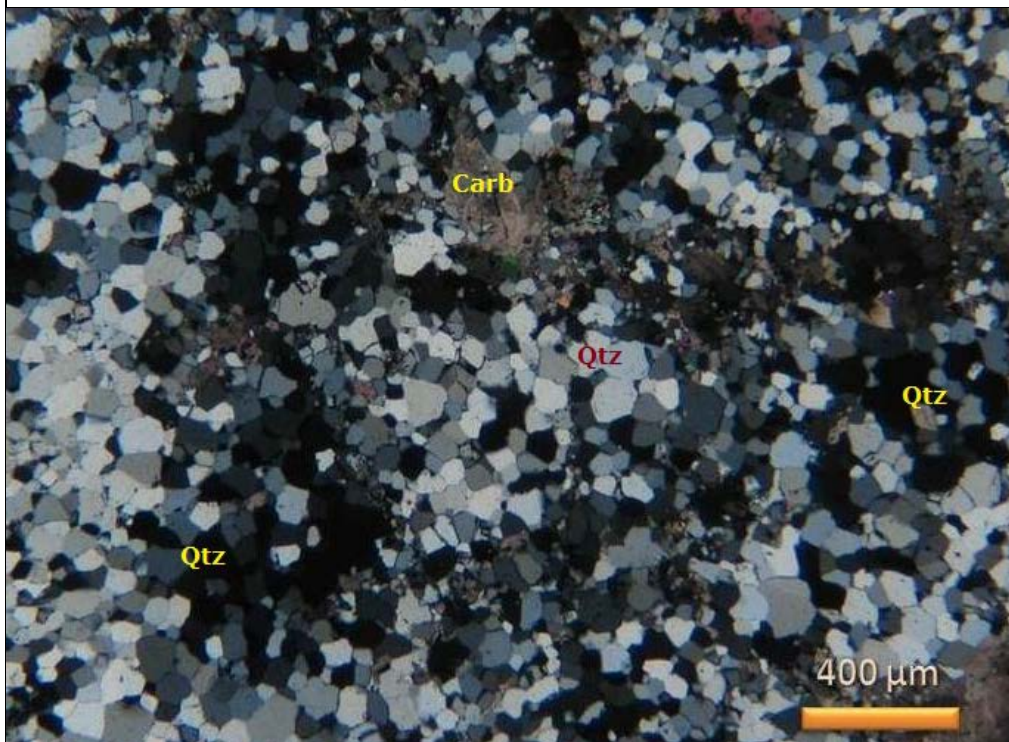
Quartzo – cristais são de granulação fina a média (até 1,2 mm) com contatos poligonizados e extinção reta (Fotomicrografia 1 e 2). Quartzo com extinção ondulante e contatos irregulares são raros, e nestes casos observa-se de formação de subgrãos.

Ankerita – são encontrados dois tipos: (i) cristais grossos (4,0 mm), anédrico, contatos irregulares e apresentam maclas. (ii) cristais finos (0,4 mm) mais límpidos e com contatos poligonizados a irregulares. Os cristais de ankerita mais grossos apresentam direção de crescimento para o interior do veio e os cristais de granulação mais fina forma massas intersticiais com cristais de quartzo (Fotomicrografia 2).

Pirita e calcopirita - são raras e formam finos cristais (até 0,16 mm) anédricos .

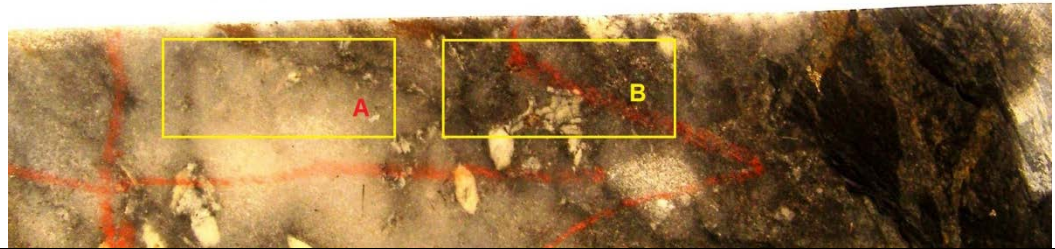
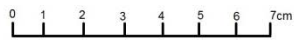


Fotomicrografia 1 – Amostra FCS926-169,63 – Veio truncando foliação principal da rocha (limite do veio marcado por linha tracejada) (Luz transmitida e nicóis cruzados, aumento de 50x).



Fotomicrografia 2 – Amostra FCS926-169,63 – Aspecto do veio, os minerais exibem textura granoblástica (Luz transmitida e nicóis cruzados, aumento de 50x).

Amostra FCS 926-P192,20 B



Mineralogia

Transparentes (%)		Opacos (%)	
Quartzo	±80	Berthierita	±8
Ankerita	±5	Pirita	±2
Sericita	rara	Calcopirita	rara

Rocha encaixante: Veio de quartzo sulfetado

Descrição

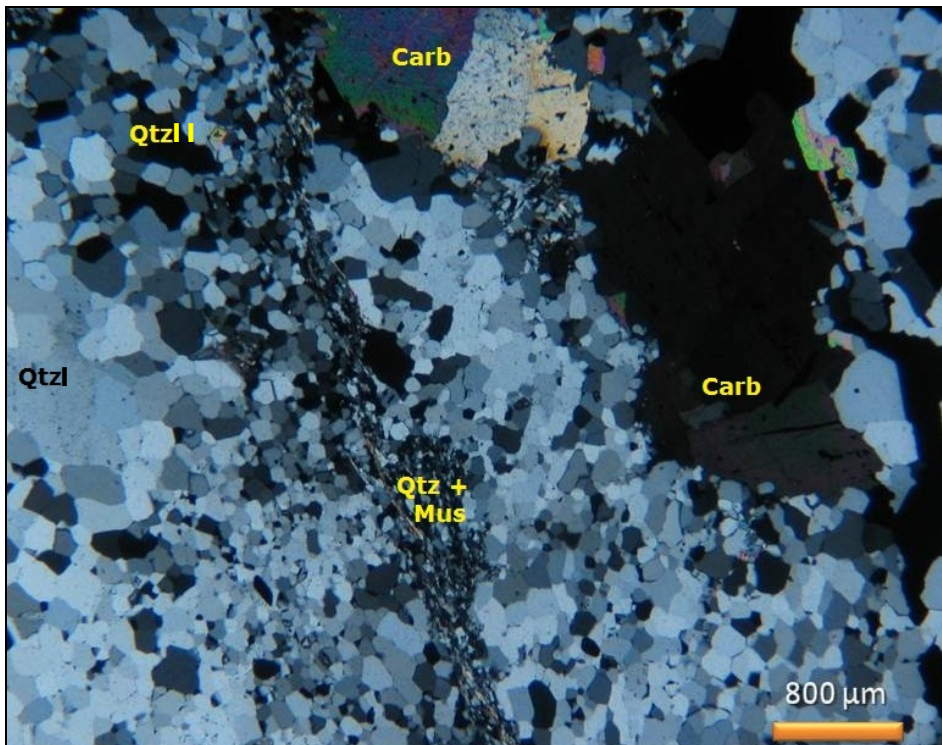
Veio quartzo-carbonático concordante com a foliação com espessura de 5,25 m. Os cristais apresentam granulação de fina a média e textura granoblástica.

Quartzo - ocorre com granulação de fina à média (até 3,8 mm), com duas variedades: (i) cristais mais grossos tem extinção ondulante, contatos irregulares a dentados e início de processo de formação de subgrãos. Tem um aspecto mais manchado, possivelmente devido ao elevado número de inclusões fluidas; (ii) cristais são de granulação muito fina a média (0,1 a 1,4 mm), com contatos poligonizados e aspecto mais límpido (Fotomicrografia 1).

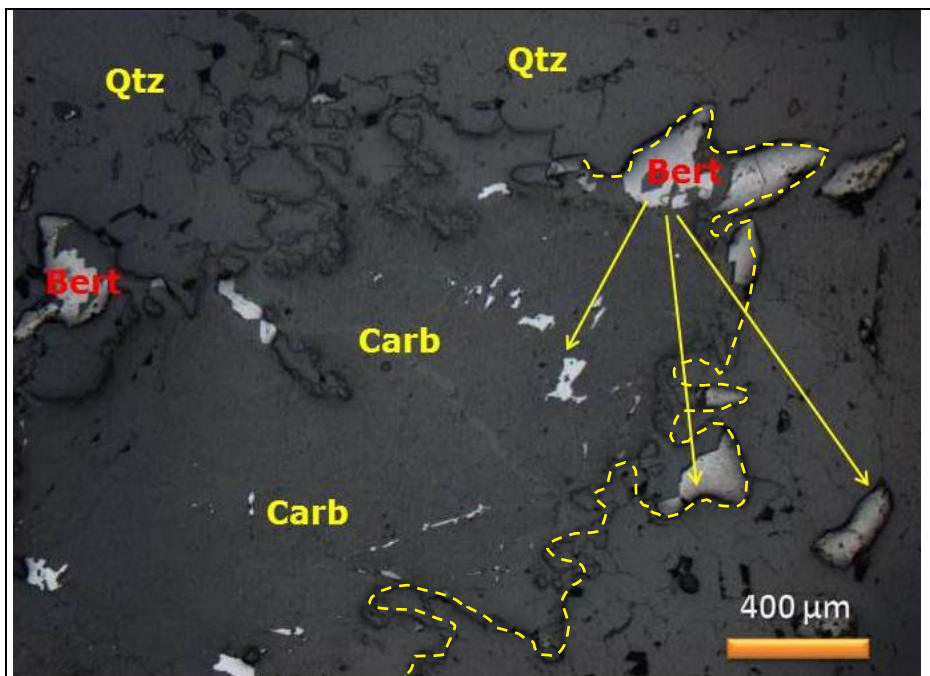
Ankerita – apresenta granulação de fina (0,08 mm) a média (2,0 mm) e os cristais são subédricos a euédricos. Os cristais euédricos têm inclusões de quartzo e são geralmente finos. Os cristais médios são intersticiais aos grãos de quartzo, são maclados e exibem aspecto rugoso, e alguns cristais passam na borda a ankerita mais límpidos.

Muscovita – ocorrem em pequenos agregados com o quartzo fino e também preenchendo microfraturas (Fotomicrografia 1).

Berthierita - encontra-se distribuída de forma heterogênea em cristais médios (até 3,0 mm), granulares e anédricos; sobrecrecem cristais de quartzo e ankerita (Fotomicrografia 2).



Fotomicrografia 1 – Amostra FCS926-192,20B – Cristais de quartzo com contato poligonizados a lobados e cristais de ankerita associados (Luz transmitida e nicóis cruzados, aumento de 25x).



Fotomicrografia 2 – Amostra FCS926-192,20 – Cristais de berthierita sobrecrecendo em borda de ankerita, linha tracejada destaca borda do carbonato (Luz refletida, aumento de 50x).

Amostra FCS 926-195,70



Mineralogia

Transparentes (%)		Opacos (%)	
Quartzo	±65	Berthierita	±15
Ankerita	±6	Pirita	±3
Sericita	±1	Calcopirita	rara
		Arsenopirita	rara
		Ullmanita	rara

Rocha encaixante: sericita-quartzo xisto (ritmito pelítico-psamítico)

Descrição

Porção amostrada de veio de 5,25 metros, concordante com a foliação, de granulação média a grossa. É composto por quartzo, ankerita e sulfetos. O veio encontra-se encaixado em xisto e filito carbonosos hidrotermalizados a quartzo e sulfetos.

Quartzo - ocorre de fino à médio (até 3,0 mm) em dois tipos principais: (i) mais grosso tem extinção ondulante, contatos irregulares a dentados e início de processo de formação de subgrãos; (ii) é de muito fino a médio (até 1,2 mm), com contatos poligonizados, extinção reta e aspecto mais límpidos.

Ankerita – apresenta granulação fina a média (até 1,2 mm), em cristais anédricos e alguns tem centro mais “impuro” com as bordas de aspecto mais límpido. É possível observar alguns cristais com inclusão de quartzo.

Mica branca – ocorre como finas paletas isoladas em meio ao quartzo. São encontradas formando finos agregados com cristais finos de quartzo e ankerita, e nas bordas do veio.

Berthierita – está dispersa por todo o veio, com cristais de finos a grossos (até 5,0 mm), tem cristais anédricos que, localmente, parecem crescer às custas da ankerita. Ocorre inclusão de calcopirita, com borda de ullmanita, em cristal de berthierita (Imagem BSE e espectro 1, e Fotomicrografia 1).

Pirita – é um único cristal de 1,5 cm, poroso e deformado pela foliação principal da rocha. Tem uma discreta franja de pressão formada por quartzo e é bordejada por finos cristais de arsenopirita e berthierita (Fotomicrografia 2 e 3).

Arsenopirita – ocorre na borda do veio e porção da rocha em cristais finos, euédricos a anédricos. Os cristais acompanham a foliação da rocha e borda do veio. Ainda inclusa em berthierita e pirita (Fotomicrografia 2 e 3).

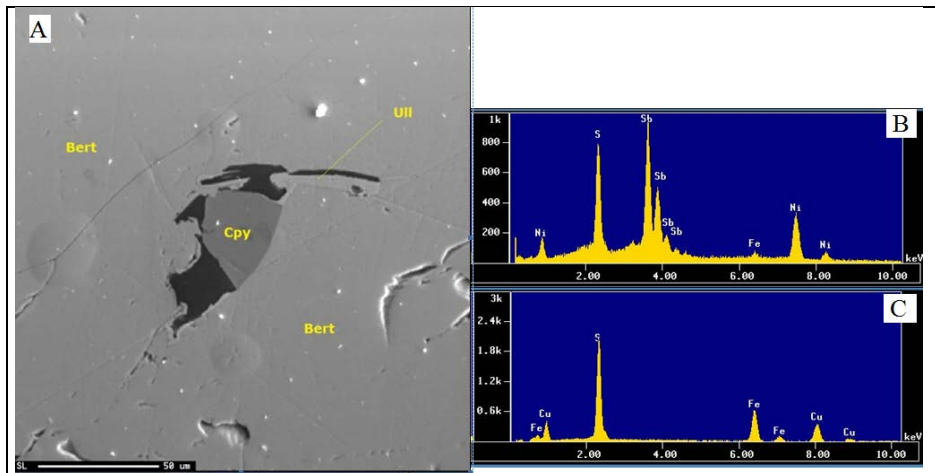
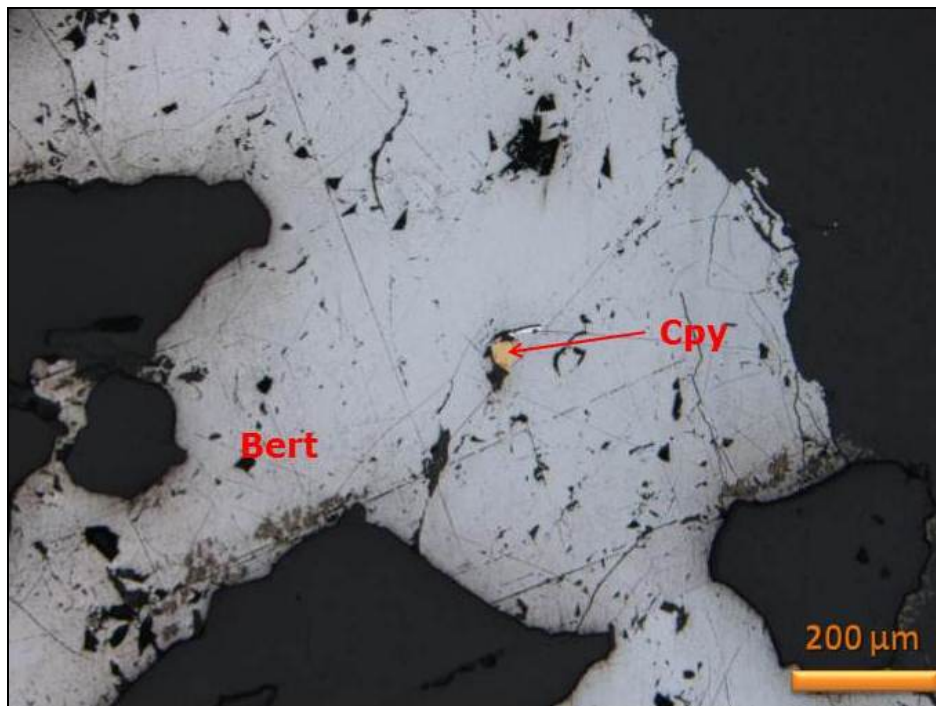
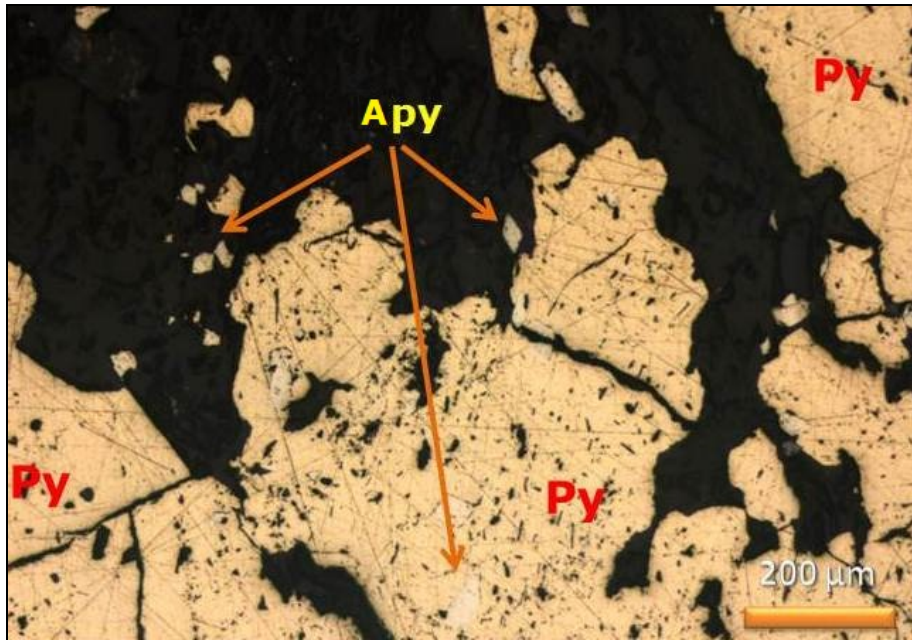


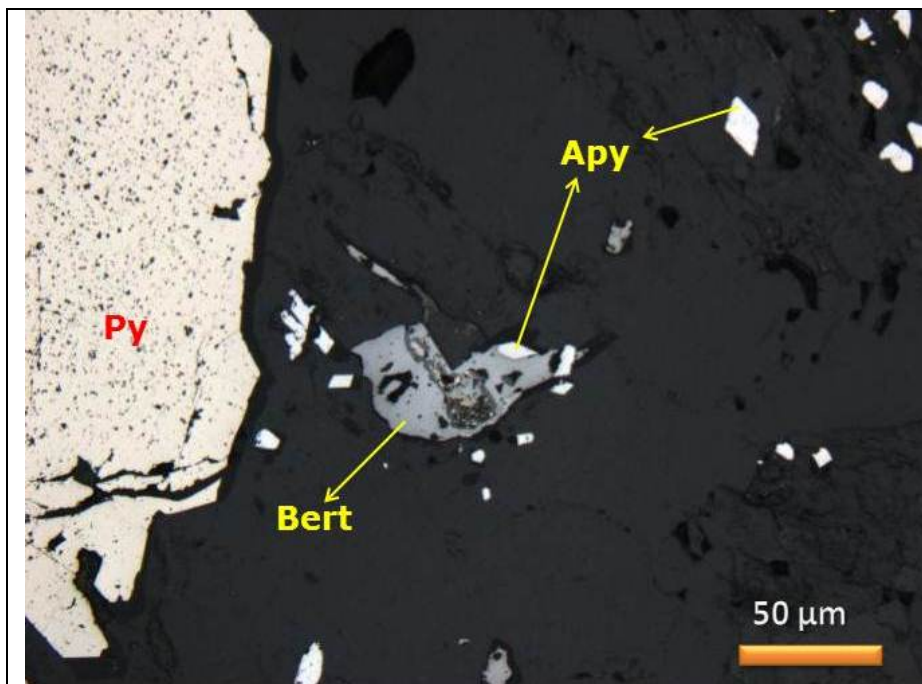
Imagem BSE e espectro 1 – Amostra FCS926-195,70 – A) Cristal de berthierita com inclusão de fino cristal de calcopirita e sobrecrescimento de ullmanita. B) Espectros eds da Ullmanita e C) Espectros EDS da Calcopirita.



Fotomicrografia 1 – Amostra FCS926-195,70 – Inclusão de cristal de calcopirita em cristal de berthierita (Luz refletida, aumento de 100x).



Fotomicrografia 2 – Amostra FCS926-195,70 – Cristais de arsenopirita formados a partir da pirita (Luz refletida, aumento de 25x).



Fotomicrografia 3 – Amostra FCS926-192,20 – Cristais de arsenopirita formando a partir da pirita e da berthierita (Luz refletida, aumento de 1000x).

Amostra FCS 926-202,50



Mineralogia

Transparentes (%)		Opacos (%)	
Quartzo	±70	Berthierita	rara
Ankerita	±30	Pirita	rara
		Calcopirita	rara

Rocha encaixante: carbonato-quartzo-sericita xisto (ritmito pelítico-psamítico)

Descrição

Veio discordante de 1,5 cm de espessura. É constituído por quartzo, ankerita e opacos, os quais exibem textura granoblástica. Está encaixado em ritmito pelítico-psamítico truncando a foliação principal da rocha (ver foto de lâmina acima e Fotomicrografia 1).

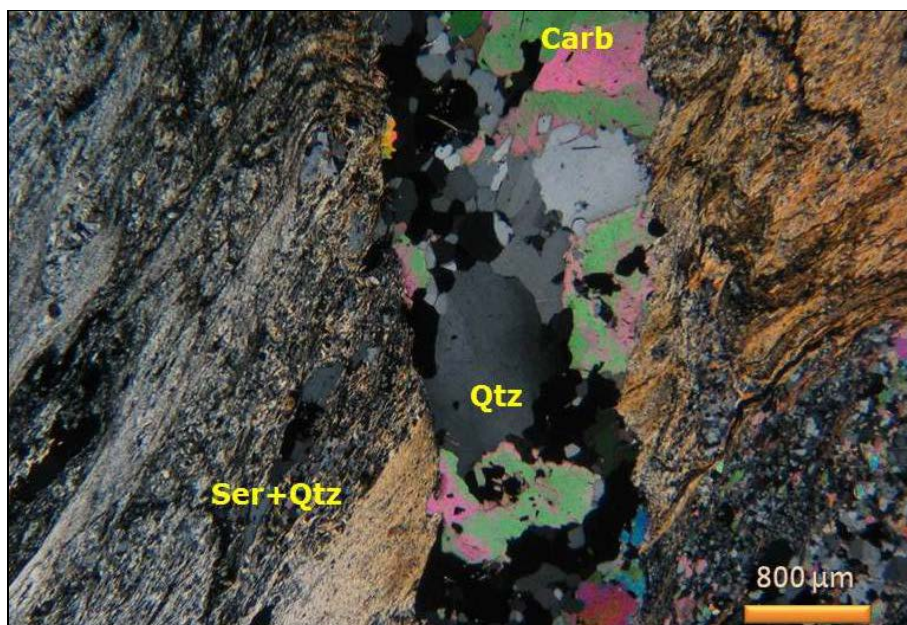
Quartzo – ocorre em duas variedades. (i) quartzo mais grosso (até 2,4 mm), com extinção ondulante e contatos irregulares a dentados e com processo de formação de subgrãos. Tem um aspecto mais manchado, possivelmente devido ao elevado número de inclusões fluidas; (ii) quartzo fino (0,2 mm) com contatos poligonizados e mais límpidos, perfaz cerca de 70% do quartzo da vênula.

Ankerita – dois tipos são observados: (i) cristais grossos (4,0 mm) que apresentam-se maclados, os quais formam contatos irregulares; (ii) cristais mais finos (0,1 mm) que são límpidos e com contatos poligonizados. A ankerita mais fina forma massas heterogênea com quartzo e sericita, também ocorre intersticial a cristais de quartzo de granulação média a grossa.

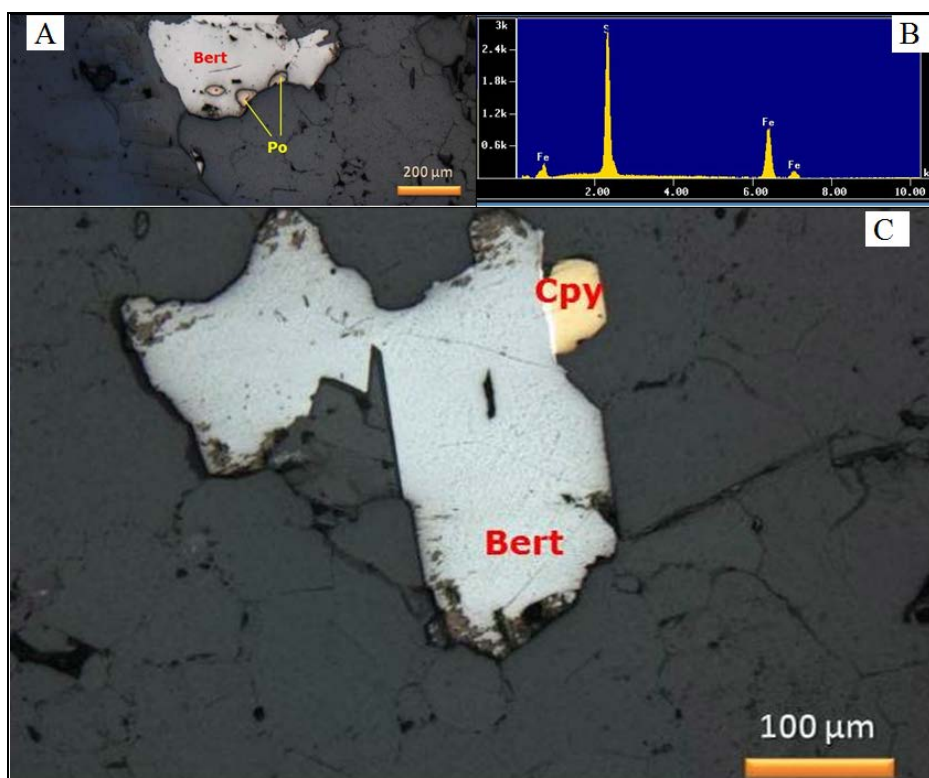
Pirita – ocorre de muito fina (< 0,1 mm) a grossa (3,0 mm), anédrica e porosa.

Berthierita – ocorre disseminada no veio, apresenta cristais de granulação média (até 1,0 mm), é anédrica e parece estar fragmentada no veio. Cristais finos de pirrotita estão inclusos em meio a berthierita (Fotomicrografia 2).

Calcopirita – ocorre em raros e finos cristais (0,15 mm) anédricos associados à berthierita.



Fotomicrografia 1 – Amostra FCS926-202,50 – Veio truncando a foliação S_n da rocha com os cristais de quartzo com contato poligonizados a lobados e cristais de Ankerita (Luz transmitida e nicóis cruzados aumento de 25x).



Fotomicrografia 2 – Amostra FCS926-202,50 – A) Inclusões de pirrotita em cristal de berthierita; B) Espectro da pirrotita inclusão em berthierita; C) Calcopirita em cristal de de berthierita sobrecrescendo borda de Ankerita (Luz refletida, aumento de 500x).

Amostra FCS 926-213,85



Mineralogia

Transparentes (%)		Opacos (%)	
Quartzo	±52	Pirita	±2
Ankerita	±25	Berthierita	±5
Sericita	±15	Arsenopirita	rara
Clorita	±2	Pirrotita	rara
		Estibinita	rara

Rocha encaixante: Sericita-Quartzo xisto sulfetado (ritmito pelítico-psamítico)

Descrição

Veio de quartzo concordante, composto por quartzo, ankerita e opacos com 1,5 metro de espessura. Os minerais apresentam textura granoblástica. Fragmentos de rocha ocorrem em meio ao veio (Fotomicrografia 1). Fragmentos de rocha foliada e crenulada, localmente a foliação é anastomosada, envolvendo as porções quartzo-carbonáticas e opacos. Apresentam textura lepidoblástica. (Fotomicrografia 1),

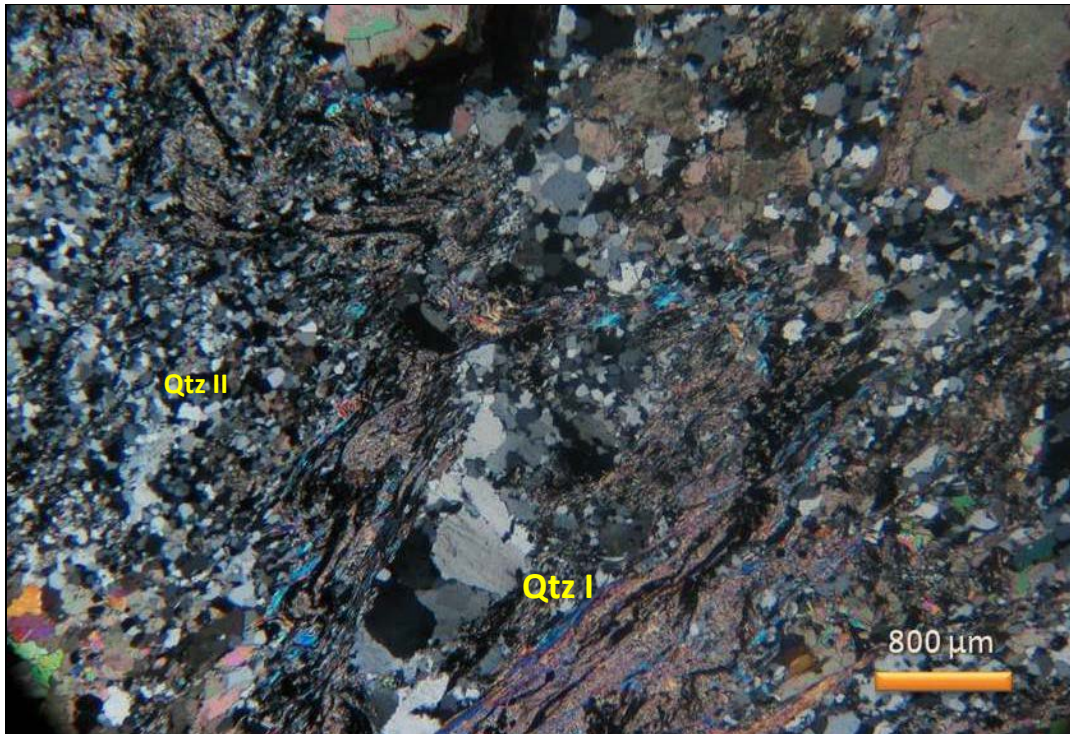
Quartzo ocorre em duas variedades. Quartzo mais grosso (até 1,6 mm), com extinção ondulante e contatos irregulares a dentados e com processo de formação de subgrãos. Tem um aspecto mais manchado, possivelmente devido ao elevado número de inclusões fluidas. Quartzo mais fino (0,1 mm) com contatos poligonizados e mais límpidos.

Ankerita – ocorre como dois tipos, um de cristais grossos (3,0 mm) contatos irregulares a dentados, com maclas e de aspecto mais rugoso. Os cristais mais finos (0,1mm) são mais límpidos e com contatos poligonizados. Ankerita mais grossas (I) com as bordas que passam a ankerita límpida (II) (Fotomicrografia 3 e Espectro 1).

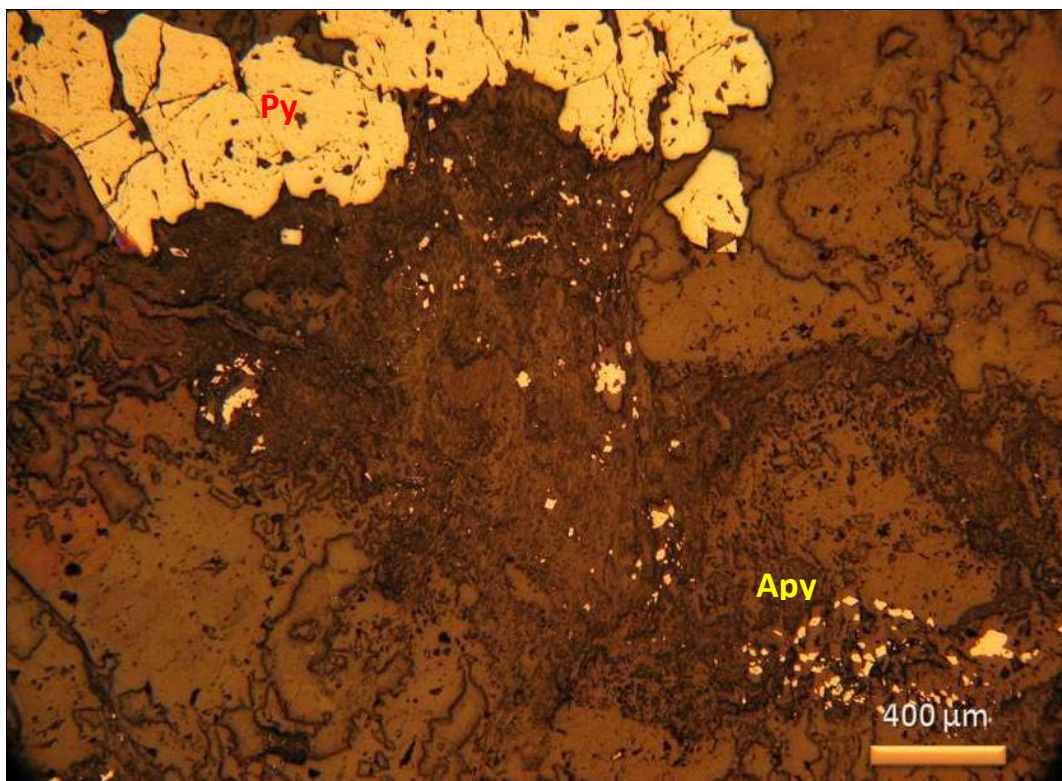
Pirita - ocorre com granulação de muito fina (< 0,1 mm) a grossa (2,4 mm), euédrica a subédrica, os cristais estão em meio a lasca da rocha e borda do veio, dispendo-se concordantemente a deformação do fragmento (Fotomicrografia 2).

Arsenopirita - está distribuída, principalmente, em meio a porções da rocha de forma bastante irregular, é fina (0,25 mm) e está de subédrica a anédrica (Fotomicrografia 2). Ocorre ainda sobrecrescendo a pirrotita (Imagem BSE 1 e Fotomicrografia 4).

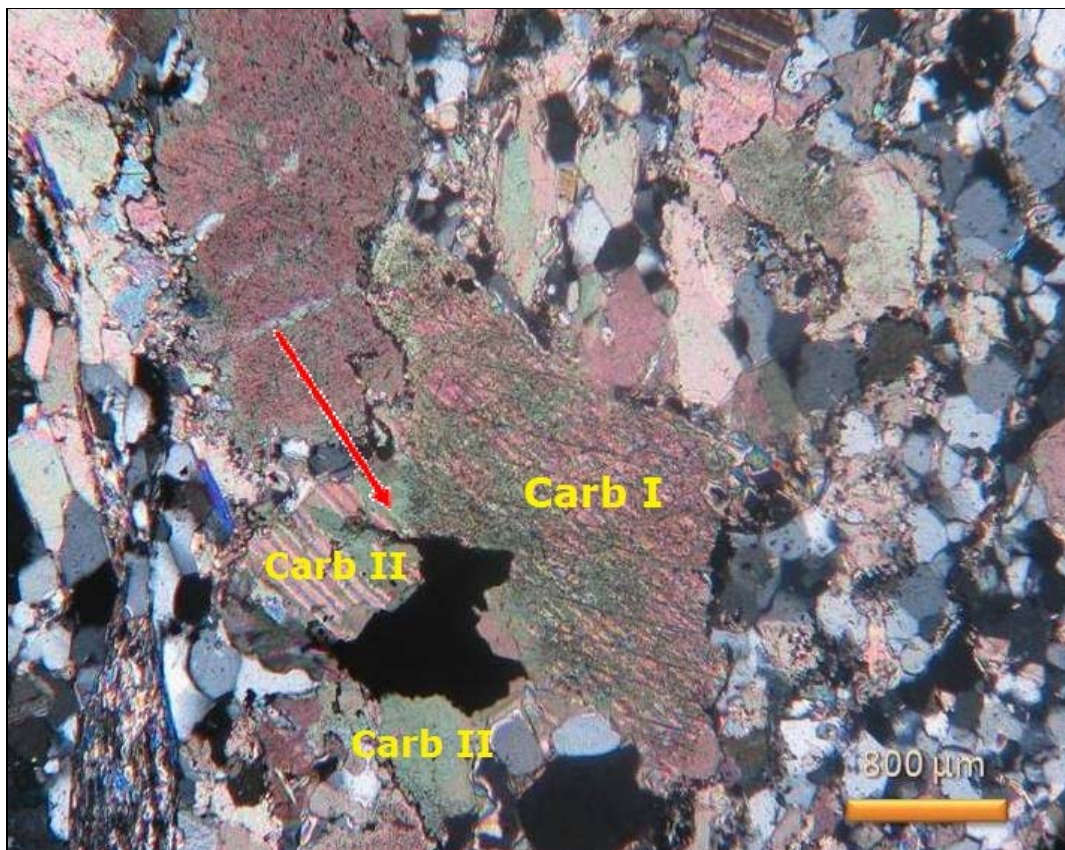
Berthierita - ocorre na borda NE da lâmina, apresenta cristais médios (0,8 mm) a grossos (1,2 mm) (Espectro 2). Berthierita sobrecrescendo a cristais de pirrotita e ankerita, pode ocorrer finos cristais de estibinita em sua borda (Imagem BSE1 e Fotomicrografia 5).



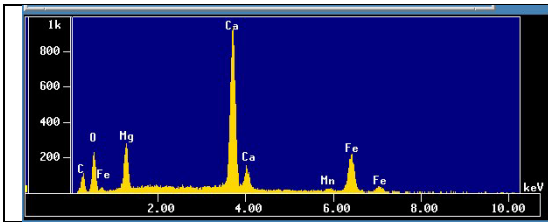
Fotomicrografia 1 – Porções da rocha bastante deformadas ocorrem em meio ao veio (Luz transmitida e nicóis cruzados, Aumento de 25x).



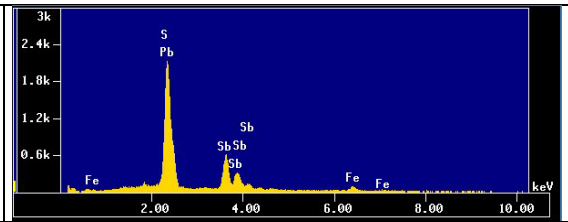
Fotomicrografia 2 – Cristal grosso de pirita acompanhando a deformação da rocha encaixantes em borda de veio. Arsenopirita disseminada em porção da rocha (Luz refletida, Aumento de 100x).



Fotomicrografia 3 – Ankerita tipo II mais límpida formando na borda da ankerita tipo I, indicado contato por seta vermelha (Luz transmitida e nicóis cruzados, aumento de 25 x).



Espectro 1 – Carbonato de composição ankerítica.



Espectro 2 – Berthierita.

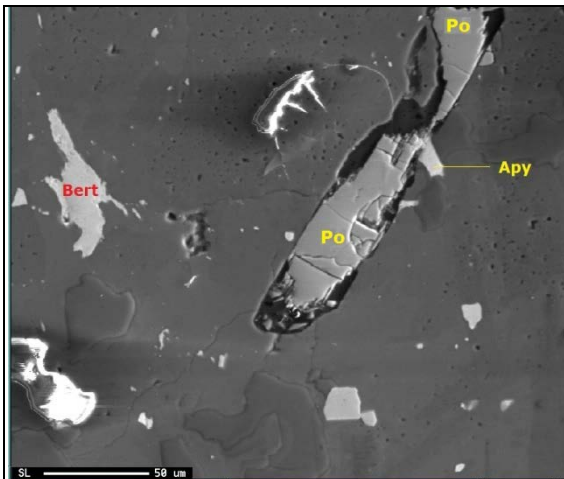
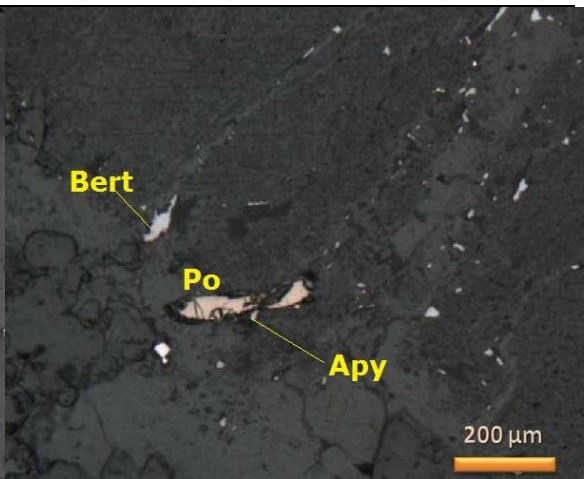
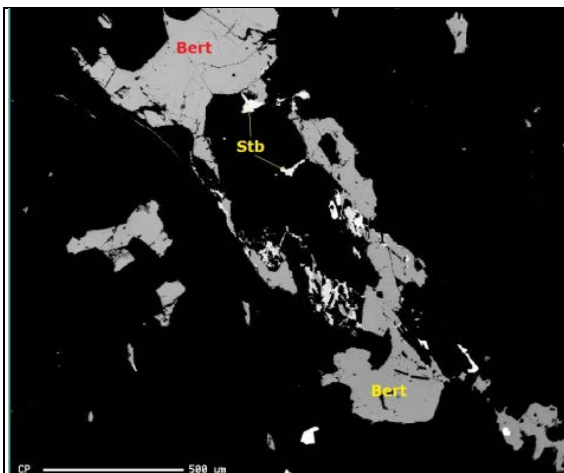


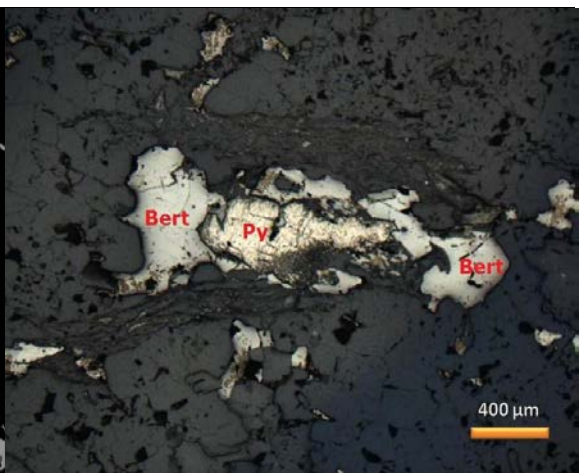
Imagem BSE 1 – Finos cristais de berthierita e pirrotita, com arsenopirita sobrecrescendo em borda de pirrotita.



Fotomicrografia 4 – Finos cristais de berthierita e pirrotita. Arsenopirita crescendo nas bordas de pirrotita (Luz refletida, aumento 200x).



Imagens BSE 1 – Estibinita em borda de berthierita.



Fotomicrografia 5 – Berthierita sobrecrescendo pirita porosa (Luz refletida, aumento 200x).

ANEXO II

Tabela de dados Isótopos de Oxigênio

Amostra	Tipo de Veio	δ^{18} (‰ SMOW)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{fluid}}$	T_{tot} ou T_{d} (°C)	σ_1
FCS926-84,40	V1	+17,4	+10,8	308	0,16
FCS926-84,40		+18,0	+11,4	308	0,22
FCS926-84,40		+17,7	+11,1	308	0,16
FCS926-84,40		+17,2	+10,6	308	0,21
FCS926-84,40		+16,2	+9,6	308	0,23
FCS926-84,40		+15,9	+9,3	308	0,19
FCS926-84,40		+16,0	+9,4	308	0,24
FCS926-95,00		+15,9	+9,3	308	0,26
FCS926-95,00		+16,1	+9,5	308	0,23
FCS926-95,00		+16,2	+9,6	308	0,17
FCS926-95,00		+16,0	+9,5	308	0,24
FCS926-95,00		+16,1	+9,5	308	0,23
FCS926-95,00		+16,2	+9,6	308	0,32
FCS926-95,00		+16,0	+9,4	308	0,26
FCS926-95,00		+16,0	+9,4	308	0,21
FCS926-95,00		+15,8	+9,2	308	0,19
FCS926-95,00		+16,0	+9,4	308	0,27
FCS926-95,00		+15,9	+9,3	308	0,30
FCS926-95,00		+15,6	+9,0	308	0,27
FCS926-95,00		+15,6	+9,0	308	0,16
FCS926-95,00		+15,7	+9,2	308	0,23
FCS926-130,80		+15,9	+9,9	325	0,25
FCS926-130,80		+15,6	+9,5	325	0,22
FCS926-130,80		+16,1	+10,1	325	0,23
FCS926-130,80		+15,9	+9,9	325	0,18
FCS926-130,80		+15,8	+9,8	325	0,28
FCS926-130,80		+15,9	+9,9	325	0,19
FCS926-130,80		+15,5	+9,5	325	0,22
FCS926-130,80		+15,5	+9,5	325	0,25
FCS926-130,80		+15,8	+9,8	325	0,17
FCS926-130,80		+16,0	+9,9	325	0,30
FCS926-130,80		+15,6	+9,5	325	0,16
FCS926-130,80		+16,0	+10,0	325	0,23
FCS926-130,80	+15,7	+9,7	325	0,24	
FCS926-130,80	+15,6	+9,6	325	0,23	
FCS926-130,80	+15,6	+9,6	325	0,27	
FCS926-130,80	+16,0	+10,0	325	0,27	
FCS926-139,50	V3	+15,6	+9,0	325	0,24
FCS926-139,50		+15,4	+8,8	325	0,20
FCS926-139,50		+15,8	+9,2	325	0,28
FCS926-139,50		+15,8	+9,2	325	0,26

Amostra	Tipo de Veio	δ^{18} (‰ SMOW)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{fluid}}$	T_{tot} ou T_d (°C)	σ_1	
FCS926-139,50	V3	+15,8	+9,2	325	0,28	
FCS926-139,50		+15,7	+9,1	325	0,24	
FCS926-139,50		+15,6	+9,0	325	0,21	
FCS926-139,50		+15,7	+9,1	325	0,20	
FCS926-139,50		+16,0	+9,4	325	0,21	
FCS926-139,50		+16,4	+9,8	325	0,22	
FCS926-139,50		+15,0	+8,4	325	0,35	
FCS926-139,50		+15,4	+8,8	325	0,32	
FCS926-139,50		+15,6	+9,0	325	0,28	
FCS926-139,50		+15,5	+8,9	325	0,19	
FCS926-192,20B		V1	+15,9	+9,7	318	0,19
FCS926-192,20B	+16,2		+9,9	318	0,19	
FCS926-192,20B	+16,0		+9,8	318	0,28	
FCS926-192,20B	+16,0		+9,8	318	0,25	
FCS926-192,20B	+15,7		+9,4	318	0,23	
FCS926-192,20B	+15,9		+9,6	318	0,23	
FCS926-195,70	+17,0		+9,4	280	0,33	
FCS926-195,70	+17,2		+9,6	280	0,12	
FCS926-195,70	+17,3		+9,6	280	0,23	
FCS926-195,70	+16,8		+9,2	280	0,18	
FCS926-195,70	+17,2		+9,6	280	0,33	
FCS926-195,70	+16,8		+9,2	280	0,15	
FCS926-195,70	+16,7		+9,1	280	0,23	
FCS926-195,70	+17,2		+9,6	280	0,20	
FCS926-195,70	+16,8		+9,2	280	0,24	
FCS926-195,70	+16,6		+9,0	280	0,16	
FCS926-202,50	V2		+16,7	+10,0	304	0,18
FCS926-202,50			+16,9	+10,2	304	0,20
FCS926-202,50			+16,0	+9,3	304	0,29
FCS926-202,50		+16,2	+9,5	304	0,26	
FCS926-202,50		+16,4	+9,7	304	0,22	
FCS926-202,50		+16,4	+9,6	304	0,30	
FCS926-202,50		+16,4	+9,7	304	0,23	
FCS926-202,50		+15,6	+8,9	304	0,26	
FCS926-202,50		+15,9	+9,2	304	0,25	
FCS926-202,50		+15,9	+9,2	304	0,19	
FCS926-202,50		+16,0	+9,3	304	0,21	
FCS926-202,50		+16,1	+9,4	304	0,16	
FCS926-169,63		V3	+17,1	+10,5	308	0,31
FCS926-169,63	+16,6		+10,0	308	0,24	
FCS926-169,63	+19,6		+13,0	308	0,72	

Amostra	Tipo de Veio	δ^{18} (‰ SMOW)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{fluid}}$	T_{tot} ou T_d (°C)	σ_1
FCS926-169,63	V3	+18,6	+12,0	308	0,25
FCS926-169,63		+14,8	+8,2	308	0,26
FCS926-169,63		+14,6	+8,0	308	0,22
FCS926-169,63		+14,7	+8,1	308	0,18
FCS926-169,63		+14,6	+8,0	308	0,23
FCS926-169,63		+14,5	+7,9	308	0,22
FCS926-169,63		+14,5	+7,9	308	0,24
FCS926-169,63		+15,3	+8,7	308	0,26
FCS926-169,63		+14,6	+8,0	308	0,25
FCS926-150,00		V4 dique	+14,5	+2,6	196
FCS926-150,00	+14,7		+2,9	196	0,17
FCS926-150,00	+15,0		+3,2	196	0,18
FCS926-150,00	+14,8		+2,9	196	0,20
FCS926-150,00	+14,6		+2,8	196	0,19
FCS926-150,00	+14,7		+2,8	196	0,23
FCS926-150,00	+15,1		+3,2	196	0,16
FCS926-150,00	+14,9		+3,1	196	0,18
FCS926-150,00	+14,6		+2,8	196	0,23
FCS926-150,00	+14,6		+2,7	196	0,22
FCS926-150,00	+15,7		+3,9	196	0,28
FCS926-150,00	+15,8		+4,0	196	0,22
FCS926-150,00	+15,8		+4,0	196	0,27
FCS926-150,00	+15,9		+4,1	196	0,23

ANEXO III

Tabela

Isótopos de Enxofre

Amostra	Veio	Mineral	$\delta^{34}\text{S}$	σ	$\delta^{33}\text{S}$	σ	$\Delta^{33}\text{S}$
FCS926-84,40	V1	Py	+3,7	0,2	+3,5	0,2	+1,6
		Py	+4,2	0,2	+3,8	0,2	+1,6
		Py	+4,0	0,2	+3,8	0,2	+1,7
		Py	+4,0	0,2	+3,8	0,2	+1,7
		Py	+3,8	0,2	+3,7	0,2	+1,8
		Py	+3,9	0,2	+3,9	0,2	+1,9
FCS926-95,00		Py	+3,1	0,2	+5,0	0,2	+3,5
		Cpy	+0,4	0,2	+3,6	0,2	+3,4
FCS926-139,50	Borda de V3	Py	+4,7	0,3	+5,8	0,2	+3,4
		Py	+4,7	0,3	+5,8	0,2	+3,4
		Py	-0,3	0,3	+2,8	0,3	+3,0
		Py	+5,1	0,3	+5,9	0,2	+3,3
		Py	+5,0	0,3	+5,9	0,2	+3,3
		Py	+5,0	0,3	+6,0	0,2	+3,4
		Py	+4,9	0,3	+5,9	0,2	+3,4
		Py	+4,8	0,3	+5,7	0,2	+3,3
		Py	+4,7	0,3	+5,8	0,2	+3,4
		Py	+5,6	0,3	+6,3	0,2	+3,4
		Py	+5,5	0,3	+6,2	0,2	+3,4
		Py	+5,7	0,3	+6,3	0,2	+3,4
		Py	+5,4	0,3	+6,2	0,2	+3,4
		Py	+6,1	0,3	+6,5	0,2	+3,3
		Py	+5,2	0,3	+6,1	0,2	+3,4
		Py	+5,4	0,3	+6,2	0,2	+3,4
		Py	+6,0	0,3	+6,4	0,2	+3,3
		Py	-1,4	0,3	+2,7	0,3	+3,5
		FCS926-150,00	V4	Py	+0,9	0,2	+1,0
Py	+0,9			0,2	+1,0	0,2	+0,5
Py	+0,9			0,2	+0,7	0,1	+0,3
FCS926-195,70	V1	Py	+4,8	0,2	+4,6	0,2	+2,2
		Py	+4,6	0,2	+4,6	0,2	+2,2
		Py	+4,6	0,2	+4,7	0,2	+2,3
		Py	+4,7	0,2	+4,6	0,2	+2,2
		Py	+4,5	0,2	+4,4	0,2	+2,1
		Py	+4,8	0,2	+4,7	0,2	+2,3

Lista de abreviações:

Veios: V1 – quartzo+ankerita+sulfetos±sulfossais, V2 – quartzo+ankerita+sulfetos, V3 – quartzo+ankerita±sulfetos e V4 – veios quartzo+calcita.

Minerais: Py=pirita, Cpy= calcopirita, Po=pirrotita.

Amostra	Veio	Mineral	$\delta^{34}\text{S}$	σ	$\delta^{33}\text{S}$	σ	$\Delta^{33}\text{S}$
FCS926-202,50	Borda de V2	Po	-1,2	0,2	+1,8	0,2	+2,4
		Po	-2,9	0,2	+0,7	0,2	+2,2
		Py	+2,7	0,2	+3,6	0,2	+2,2
		Py	+2,8	0,2	+3,5	0,2	+2,1
		Py	+2,7	0,2	+3,6	0,2	+2,2
		Py	+2,6	0,2	+3,7	0,2	+2,3
		Po	+0,1	0,2	+2,0	0,2	+2,0
		Py	+2,8	0,2	+3,6	0,2	+2,2
		Py	+2,6	0,2	+3,6	0,2	+2,2
		Py	+2,1	0,2	+3,3	0,2	+2,2
		Py	+2,4	0,2	+3,6	0,2	+2,3
		Py	+3,4	0,2	+3,9	0,2	+2,2
		Py	+3,4	0,2	+4,0	0,2	+2,3
		Cpy	+2,9	0,2	+3,7	0,2	+2,2
		Cpy	+2,3	0,2	+3,4	0,2	+2,2
Cpy	+2,3	0,2	+3,2	0,2	+2,1		

Lista de abreviações:

Veios: V1 – quartzo+ankerita+sulfetos±sulfossais, V2 – quartzo+ankerita+sulfetos, V3 – quartzo+ankerita±sulfetos e V4 – veios quartzo+calcita. **Minerais:**Py=pirita, Cpy= calcopirita, Po=pirrotita,