

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

Marília Ferraz da Costa

**PETROGRAFIA TRIDIMENSIONAL DE PARTÍCULAS DE OURO DO DEPÓSITO  
OROGÊNICO CUIABÁ, *GREENSTONE BELT* RIO DAS VELHAS,  
QUADRILÁTERO FERRÍFERO, BRASIL: aplicação de tomografia computadorizada  
de raios-x de alta resolução para caracterização mineralógica**

Belo Horizonte

2023

Marília Ferraz da Costa

**PETROGRAFIA TRIDIMENSIONAL DE PARTÍCULAS DE OURO OROGÊNICO  
DO DEPÓSITO CUIABÁ, *GREENSTONE BELT* RIO DAS VELHAS,  
QUADRILÁTERO FERRÍFERO, BRASIL: aplicação de tomografia computadorizada  
de raios-x de alta resolução para caracterização mineralógica**

Dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geologia.

Orientador(a): Prof. Dr.<sup>a</sup> Lydia M. Lobato

Co-orientador(a): Prof. Dr.<sup>a</sup> Rosaline C. Figueiredo e Silva

Belo Horizonte

2023

F381p  
2023

Ferraz da Costa, Marília.

Petrografia tridimensional de partículas de ouro orogênico do depósito Cuiabá, greenstone belt Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, Brasil [manuscrito] : aplicação de tomografia computadorizada de raios-x de alta resolução para caracterização mineralógica / Marília Ferraz da Costa. – 2023.

91 f., enc. il. (principalmente color.)

Orientadora: Lydiá Maria Lobato.

Coorientadora: Rosaline Cristina Figueiredo e Silva.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2023.

Área de concentração: Geologia Econômica e Aplicada.

Bibliografia: f. 75-82.

Inclui apêndice.

1. Petrologia – Minas Gerais – Teses. 2. Ouro – Minas e Mineração – Teses. 3. Tomografia computadorizada por raios x – Teses. 4. Quadrilátero Ferrífero (MG) – Teses. I. Lobato, Lydiá Maria. II. Figueiredo e Silva, Rosaline Cristina. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. IV. Título.

CDU: 552(815.1)



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA DO IGC-UFMG**



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Petrografia tridimensional de partículas de ouro orogênico do depósito Cuiabá, greenstone belt Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, Brasil: aplicação de tomografia computadorizada de raios-X de alta resolução para caracterização mineralógica**

### **MARÍLIA FERRAZ DA COSTA**

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOLOGIA, como requisito para obtenção do grau de Mestre(a) em GEOLOGIA, área de concentração GEOLOGIA ECONÔMICA E APLICADA, pelo Programa de Pós-graduação em Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais.

Aprovada em 18 de maio de 2023, pela banca constituída pelos membros:

Prof. Dra. Lydia Maria Lobato – Orientadora  
UFMG

Prof. Dr. Breno de Souza Martins  
UFU

Prof. Dr. Marcos Henrique de Pinho Mauricio  
PUC-RJ

Belo Horizonte, 18 de maio de 2023.



## AGRADECIMENTOS

Expresso minha gratidão a todos que de alguma forma contribuíram com o desenvolvimento desse trabalho e com a minha formação enquanto mestre.

Aos meus pais Vany e Geraldo, pelo amor e suporte incondicionais. Vocês são e sempre foram o meu exemplo como cientistas. Esse mestrado é dedicado a vocês. Aos meus irmãos André e Arthur, à minha cunhada Tuane e aos meus sobrinhos Lila, Lui e Yasmin pelo amor e companhia.

À minha estimada orientadora, mestra e amiga Prof. Lydia pelas oportunidades, ensinamentos, amizade e paciência. A sua confiança foi fundamental no meu desenvolvimento enquanto geóloga. Serei eternamente grata pelas oportunidades que você me deu. À minha querida coorientadora Prof. Rosaline por todas as imensuráveis contribuições e oportunidades, além da paciência e amizade. Sou muito grata por tê-la como parte desse trabalho.

Ao Prof. J. Richard Kyle da The University of Texas at Austin que me recebeu de braços abertos em seu laboratório e confiou em mim para desenvolver uma pesquisa desafiadora. O seu acolhimento, confiança e oportunidades foram essenciais para minha jornada profissional e pessoal. Ao Prof. Richard Ketcham por ter me permitido aprender com um dos melhores geólogos especialistas em tomografia de raios-X. O produto dessa pesquisa deve-se muito às nossas intermináveis discussões sobre esse complexo processamento de dados. Ao Matthew Colbert do laboratório pelo suporte com as configurações analíticas e companhia durante as tardes de escaneamento de amostras.

Aos geólogos João H. Canela e Reuber Cota por apoiarem esse projeto junto à AngloGold Ashanti, e aos geólogos e técnicos da equipe de exploração pelo suporte e discussões, em especial Suellen P., Raphael F., Pedro B., Fernando V. e André V..

Aos meus amigos geólogos Camila, Fernanda, Thaís, João Lucas e (½ geóloga) Livia por terem percorrido a caminhada geológica ao meu lado e ainda dividirem a jornada comigo. Aos amigos Thum, Pedro, Nalu, Gabriel, Dan, Bella, Joel e Sbil por todo carinho. Sou grata pelas escutas acolhedoras nos dias que achei que não conseguiria.

Às amigas Sarah, Kristin, Victoria e Laia que tornaram a vida em Austin muito mais feliz.

Por fim, agradeço à Pró-reitoria de Pós-graduação (PRPg) da UFMG e ao Programa de Pós-graduação em Geologia do Instituto de Geociências (IGC) da UFMG. Sou quem eu sou hoje pela potência da educação pública e da pesquisa brasileira, e por isso serei eternamente grata.

## RESUMO

Os métodos petrográficos convencionais têm uma limitação intrínseca de que distribuição espacial (tridimensional, 3-D), orientação, forma e associações minerais devem ser inferidas por observações e medições em duas dimensões (2-D). Além disso, desenvolver conjuntos de dados com significância estatística é particularmente difícil para minérios de ouro, devido a granulometria fina das partículas e baixa concentração de ouro em relação a matriz. Este estudo usa tomografia computadorizada de raios-X de alta resolução e métodos de processamento aprimorados para fornecer dados 3-D de partículas de ouro in-situ e associações mineralógicas para discernir estilos de mineralização e melhorar a recuperação de minério no depósito arqueano de ouro orogênico, de classe mundial Cuiabá, na província do Quadrilátero Ferrífero, sendo esse atualmente a maior mina subterrânea do Brasil (da empresa Anglogold Ashanti Ltda.). Cuiabá é hospedada em rochas *do greenstone belt* Rio das Velhas, na porção sul do Cráton São Francisco, Minas Gerais. As amostras selecionadas representam estilos distintos de mineralização em Cuiabá. Incluem minério hospedado em formação ferrífera bandada do corpo Fonte Grande Sul (FGS) e em veios de quartzo-carbonato contendo ouro no corpo Veio de Quartzo (VQZ), hospedados em metandesito. Este estudo caracteriza a forma, tamanho, orientação e associações minerais de mais de 16.000 partículas de ouro. A segmentação e medição quantitativa de partículas de ouro em dados de tomografia é particularmente desafiadora devido ao pequeno tamanho de grão. Esse problema é resolvido usando o método de volume parcial e *blurring* (PVB). A análise da amostra VQZ mostra que as partículas de ouro estão principalmente livres na matriz de quartzo-carbonato, com muitas partículas em contato direto com um conjunto diversificado de sulfetos. Partículas de ouro da amostra do corpo FGS formam bandas em associação com zonas de alta pirrotita dentro de bandas ricas em carbonato de ferro. A análise de PVB permitiu identificar que o eixo longo de partículas medidas em ambos os tipos de minério varia de ~25  $\mu\text{m}$  a 1,4 mm, com a maioria de 50 a 150  $\mu\text{m}$ . Partículas maiores são predominantemente esferóides sub-isométricas a esferóides prolatas, com partículas menores parecendo ser predominantemente esferóides sub-isométricas a isométricas. Os dados revelam que os processos cinemáticos afetam a forma e a orientação do ouro e indicam a influência da deformação na escala de grão.

Palavras-Chave: Quadrilátero Ferrífero; mina Cuiabá; ouro orogênico; tomografia computadorizada de raios-X; caracterização mineralógica.

## ABSTRACT

Ore studies using conventional petrographic methods have an intrinsic limitation since spatial (three-dimensional, 3-D) distribution, orientation, shape and mineral associations have to be inferred by 2-D observations and measurements. Further, developing statistically significant data sets is particularly difficult for gold ores, given the fine grain size and low gold abundance even in high-grade ores. This study uses high-resolution X-ray computed tomography (HRXCT) and improved processing methods to provide 3-D data of ore textures and in-situ gold particles to discern mineralization styles and improve ore recovery at the Archean, world-class Cuiabá orogenic gold deposit in the Quadrilátero Ferrífero province, the largest underground mine in Brazil (Anglogold Ashanti Ltda.). Cuiabá is hosted by rocks of the Rio das Velhas *greenstone belt*, southern portion of the São Francisco Craton, Minas Gerais state, Brazil. Selected samples represent distinct mineralization styles at Cuiabá. Ore hosted in banded iron formation (BIF) from the Fonte Grande Sul (FGS) orebody, and gold-bearing quartz-carbonate veins hosted in a metamafic unit from the Veio de Quartzo (VQZ) orebody. This study characterizes shape, size, orientation and mineral associations of over 16,000 gold particles. Segmentation and quantitative measurements of gold particles are particularly challenging due to their small grain size. This issue is addressed using the recently formalized partial volume and blurring (PVB) method. Results show that gold mineralization styles differ in 3-D textural and quantitative aspects including size and spatial distribution. Analysis of the VQZ sample shows that gold particles are mainly free in the quartz-carbonate matrix, with many particles in direct contact with a diverse sulfide mineral assemblage. Gold particles in the BIF-hosted FGS ore form bands in association with high pyrrhotite zones within iron carbonate-rich bands. The PVB analysis allows us to show that the long axis of measured particles in both ore types ranges from ~25  $\mu\text{m}$  to 1.4 mm, with most from 50 to 150  $\mu\text{m}$ . Larger particles are dominantly sub-equant to prolate spheroids, with smaller particles appearing to be dominantly sub-equant to equant grains. The HRXCT data reveal that the kinematic processes affected gold shape and orientation and indicate the influence of deformation at the grain scale.

Keywords: Quadrilátero Ferrífero; Cuiabá deposit; orogenic gold; X-ray computed tomography; mineralogical characterization.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
1.1 Considerações iniciais .....	10
1.2 Apresentação da dissertação .....	10
1.3 Justificativa e objetivos .....	11
1.4 Objetivos específicos .....	13
1.5 Etapas do trabalho .....	13
1.7 Localização e vias de acesso .....	14
<b>2 CONTEXTO GEOLÓGICO .....</b>	<b>16</b>
2.1 Geologia Regional.....	16
2.1.1 Estratigrafia .....	17
2.1.2 Geologia Estrutural.....	21
2.1.3 Metamorfismo .....	21
2.1.4 Geologia Econômica .....	22
2.2 Geologia Local: Depósito aurífero Cuiabá .....	23
2.2.1 Estratigrafia local .....	24
2.2.2 Geologia estrutural .....	26
<b>3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA: TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE RAIOS-X .....</b>	<b>27</b>
3.1 Aplicações .....	27
3.2 Princípios básicos.....	29
3.2.1 Configuração analítica.....	29
3.2.2 Fonte e detector de raios-X .....	30
3.2.3 Atenuação de raios-X .....	33
3.2.4 Resolução espacial .....	35
3.3 Aquisição de dados .....	36
3.3.1 Preparação da amostra.....	36
3.3.2 Calibração.....	37
3.3.3 Aquisição.....	37

3.3.4 Reconstrução .....	37
3.4 Artefatos e efeitos de volume parcial (PVE).....	38
3.4.1 <i>Beam hardening</i> .....	38
3.4.2 <i>Rings</i> .....	39
3.4.3 Efeitos de volume parcial e <i>blurring</i> .....	40
3.5 Processamento de dados.....	41
<b>4 ARTIGO: OROGENIC GOLD ORES IN THREE-DIMENSIONS: A CASE STUDY OF DISTINCT MINERALIZATION STYLES AT THE WORLD-CLASS CUIABÁ DEPOSIT, BRAZIL, USING HIGH-RESOLUTION X-RAY COMPUTED TOMOGRAPHY ON GOLD PARTICLES .....</b>	<b>44</b>
<b>5 ESTUDO PETROGRÁFICO .....</b>	<b>63</b>
4.1 Amostragem .....	63
4.2 Estudos petrográficos .....	66
4.3 Contexto da alteração hidrotermal nas amostras estudadas .....	69
<b>6 CONCLUSÕES.....</b>	<b>73</b>
<b>7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>74</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>76</b>
<b>APÊNDICE A – Fichas de descrição petrográfica .....</b>	<b>84</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações iniciais

Esta dissertação constitui o resultado da pesquisa de mestrado desenvolvida no programa de Pós-graduação em Geologia na área de concentração Geologia Econômica e Aplicada do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Foi desenvolvida em colaboração científica com The University of Texas at Austin (EUA) durante a mobilidade acadêmica da autora. O trabalho foi realizado por meio do termo de cooperação técnico-científica AGA–UFMG–FUNDEP nº 18489-01 entre o Instituto de Geociências da UFMG e a empresa AngloGold Ashanti Córrego do Sítio Mineração S/A (AGA), através da Fundação do Desenvolvimento da Pesquisa S/A (FUNDEP), tendo sido assim realizado com suporte logístico e financeiro da AGA.

## 1.2 Apresentação da dissertação

Os capítulos a seguir apresentam as etapas do desenvolvimento e produtos do trabalho de pesquisa de mestrado em Geologia Econômica e Aplicada. A pesquisa foi orientada pela Prof. Dra. Lydia Maria Lobato, com coorientação da Prof. Dra. Rosaline Cristina Figueiredo e Silva. Esta dissertação está organizada em 5 capítulos:

- **Capítulo 1 – Introdução:** justificativa, objetivos, metodologia, dados do estudo, localização e vias de acesso.
- **Capítulo 2 – Contexto geológico:** apresentação da geologia regional do Quadrilátero Ferrífero na região de Sabará (MG) e geologia local do depósito aurífero Cuiabá.
- **Capítulo 3 – Fundamentação teórica:** princípios teóricos da técnica Tomografia de Raios-X em Alta Resolução.
- **Capítulo 4 – Artigo:** artigo em inglês publicado no periódico *Ore Geology Reviews*, intitulado “*Orogenic gold ores in three-dimensions: A case study of distinct mineralization styles at the world-class Cuiaba’ deposit, Brazil, using high-resolution X-ray computed tomography on gold particles*”.
- **Capítulo 5 – Estudo petrográfico:** petrografia microscópica dos tipos de minério analisados e rochas encaixantes.
- **Capítulo 6 – Conclusões:** notas finais sobre o trabalho.
- **Capítulo 7 – Considerações finais:** recomendações futuras.

### 1.3 Justificativa e objetivos

Estudos petrográficos convencionais em minérios comumente são baseados em análises bidimensionais (2D) em lâminas polidas, usando técnicas como microscopia ótica, microscopia eletrônica de varredura (MEV), microsonda eletrônica e ablação a laser com espectrometria de massa (LA-ICP-MS). Os métodos apresentam limitação espacial intrínseca que induz interpretação restrita de relações texturais, tamanho dos minerais e abundâncias, já que os aspectos tridimensionais (3D) são inferidos pelas observações 2D e dados de diferentes lâminas.

Nesse sentido, a tomografia computadorizada de raios-X de alta resolução (em inglês *high-resolution X-ray computed tomography* – HRXCT) é uma técnica não-destrutiva que não somente produz imagens tridimensionais únicas, como permite a quantificação *in situ* de aspectos texturais, estruturais e mineralógicos em 3D. A técnica foi aplicada em uma grande variedade de investigações geológicas nas últimas duas décadas (e.g. Ketcham e Carlson, 2001; Mees et al., 2003; Cnudde e Boone, 2013), incluindo petrologia metamórfica (e.g. Denison e Carlson, 1997; Huddleston-Holmes e Ketcham, 2010; Denison et al., 1997; Sayab et al., 2015) e ígnea (e.g. Jerram et al., 2009, 2010; Godel et al., 2013a; Vukmanovic et al., 2013); meteoritos (e.g. Hezel et al., 2013, Hanna e Ketcham 2017) e engenharia do petróleo (e.g. Van Geet et al., 2000; Akin e Kovschek, 2003).

A aplicação da tomografia computadorizada de raios-X de alta resolução (HRXCT) na área da Geologia Econômica é extremamente efetiva no estudo de minérios metálicos, particularmente para minerais preciosos como ouro, prata e platina, que têm contraste significativo de densidade, mesmo com outras fases metálicas comuns (Kyle e Ketcham, 2015). Recentemente, a HRXCT tem tido aplicação crescente no estudo de minérios, principalmente ouro (e.g. Kyle e Ketcham, 2003; Mote et al., 2005; Mauk et al., 2006; Kyle et al., 2008; Wright, 2017), incluindo amostras de um depósito do tipo ouro orogênico (e.g. Sayab et al. 2016), e minérios do grupo da platina – PGE (e.g. Godel et al., 2006, 2010; Godel, 2013), bem como em óxidos de Fe-Ti-V (Liu et al., 2014), cobre (Merinero et al., 2019) e tungstênio (Le Roux et al., 2015). Além disso, essa técnica fornece parâmetros 3D cruciais para o processamento mineral e geometalúrgico (e.g. Miller et al., 2003, 2009; Dhawan et al., 2012; Reyes et al., 2017).

Nesse contexto, o projeto apresentado é pioneiro na quantificação de forma, tamanho e orientação de um número elevado de partículas de ouro: foram identificadas cerca de 16.000 partículas nas amostras escaneadas, que permitem a quantificação *in situ* de características tridimensionais. Assim, a pesquisa proposta fornecerá dados únicos quanto à ocorrência do

ouro, em 3D, em amostras de dois estilos de mineralização comumente observados em depósitos do tipo ouro orogênico em diversas províncias no mundo.

As medidas quantitativas tridimensionais dos dados de tomografia computadorizada requerem, no entanto, processamento de dados específicos quando as partículas desejadas são muito finas em relação ao volume total da amostra (Ketcham e Mote, 2019), exemplo típico de depósitos de elementos preciosos em que a concentração do minério é em torno de gramas por tonelada (g/t). O projeto propõe a avaliação do método de quantificação PVB, desenvolvido por Ketcham e Mote (2019) em grãos de ouro livres, em amostras de minério naturais. Logo, se constitui também como uma ferramenta para o desenvolvimento das aplicações da tomografia computadorizada de raios-X de alta resolução, técnica que possui elevado potencial para estudos petrográficos na Geologia Econômica e que não têm ainda ampla divulgação na área.

Nesse projeto, realizou-se o estudo de amostras do depósito de ouro *world-class* Cuiabá, localizado em Sabará (MG), que têm estilos de mineralização comumente identificados em depósitos de ouro orogênico no mundo (e.g., Phillips et al., 1984; Groves et al., 1998; Goldfarb e Groves, 2015). O depósito Cuiabá está inserido na província mineral do Quadrilátero Ferrífero-QF, localizado na região centro-sul do estado de Minas Gerais, sul do Cráton São Francisco (Almeida, 1967; Dorr, 1969). É conhecido por seus depósitos de ouro hospedados no *greenstone belt* arqueano Rio das Velhas, bem como seus depósitos de ferro paleoproterozoicos do tipo Lago Superior.

O QF foi a província produtora de ouro brasileira mais importante do início do século 18 até o final dos anos 1970 (Lobato et al., 2001a, 2020). Esta província representa um terreno arqueano granito-*greenstone* coberto por sequências supracrustais do Proterozoico. Três unidades principais (Dorr, 1969, Marshak e Alkmim, 1989) dominam: os terrenos granito-gnáissicos; o *greenstone belt* do Supergrupo Rio das Velhas; e as unidades sedimentares paleoproterozóicas do Supergrupo Minas. Unidades dos grupos Sabará e Itacolomi e do Supergrupo Espinhaço estão localmente presentes.

A jazida Cuiabá é atualmente a mina em operação mais profunda no Brasil, com 22 níveis em cerca de 1,5 km abaixo da superfície. O total de reservas em 2022 somam 1,16 Moz com teor de 4,32 g/t Au, e os recursos totais são estimados em 5,15 Moz com teor médio de 5,77 g/t Au (Relatório de Recursos e Reservas, AngloGold Ashanti, 2022). Os corpos de minério estão hospedados em rochas metavulcânicas máficas, FFB, filitos micáceos e filitos carbonosos do Grupo Nova Lima, no *greenstone belt* arqueano Rio das Velhas (Lobato et al. 2001b).

Os seis principais corpos de minério estão contidos no horizonte da FFB de Cuiabá: Fonte Grande Sul, Canta Galo, Balancão, Galinheiro, Galinheiro Extensão e Serrotinho. A



paragênese de sulfetos típica é pirita-pirrotita-arsenopirita, com menores ocorrências de calcopirita e esfalerita. O ouro está incluso principalmente na pirita, pirrotita e arsenopirita, variando em tamanho entre 10 e 80  $\mu\text{m}$ , e pode ocorrer como partículas livres ao longo dos limites do cristal ou preenchendo fraturas na pirita, bem como partículas livres na matriz de quartzo-carbonato (Ribeiro Rodrigues et al., 2007).

Corpos associados à unidade vulcânica máfica superior foram extraídos localmente no passado, como é o caso dos corpos Viana e Galinheiro Footwall. Três ocorrências foram recentemente descobertas em veios de quartzo-carbonato hospedados na unidade vulcânica máfica inferior (Vitorino et al., 2020).

O objetivo do projeto consiste então na análise *in situ*, em escala de partículas, de características mineralógicas e texturais dos estilos de mineralização de substituição em FFB e em veios associados a rochas máficas do depósito Cuiabá por tomografia computadorizada de raios-X, complementada por estudos petrográficos convencionais. Assim, objetiva-se diferenciar os estilos de mineralização quanto a mineralogia e texturas tridimensionais. Essa contribuição também investiga a influência da deformação do depósito, em escala regional, nas relações entre partículas e orientações minerais em 3D.

#### **1.4 Objetivos específicos**

A pesquisa propõe a primeira aplicação, em amostras naturais, de uma versão atualizada e melhorada do software de processamento de dados de tomografia com o método PVB (Ketcham e Mote, 2019), que permite a quantificação de partículas muito finas, como é o caso do ouro. Essa proposta permite a análise tridimensional mais precisa da forma e tamanho das partículas, além de ser também pioneira na detecção da orientação das partículas de ouro e sua relação com estruturas em escala de depósito.

#### **1.5 Etapas do trabalho**

O estudo consistiu na seleção, escaneamento, manipulação e interpretação de dados de tomografia computadorizada de raios-X e petrografia microscópica de amostras dos corpos Fonte Grande Sul (FGS) e Veio de Quartzo (VQZ) da mina Cuiabá (Sabará, MG), concedido pela mineradora AngloGold Ashanti (AGA) por meio do convênio de pesquisa AGA–UFMG–FUNDEP nº 18489-01. O escaneamento por tomografia computadorizada em raios-X das amostras foi executado no laboratório UTCT da The University of Texas at Austin (EUA),

durante a mobilidade acadêmica do estudante inscrito na pós-graduação, e as análises petrográficas realizadas na Universidade Federal de Minas Gerais (Brasil).

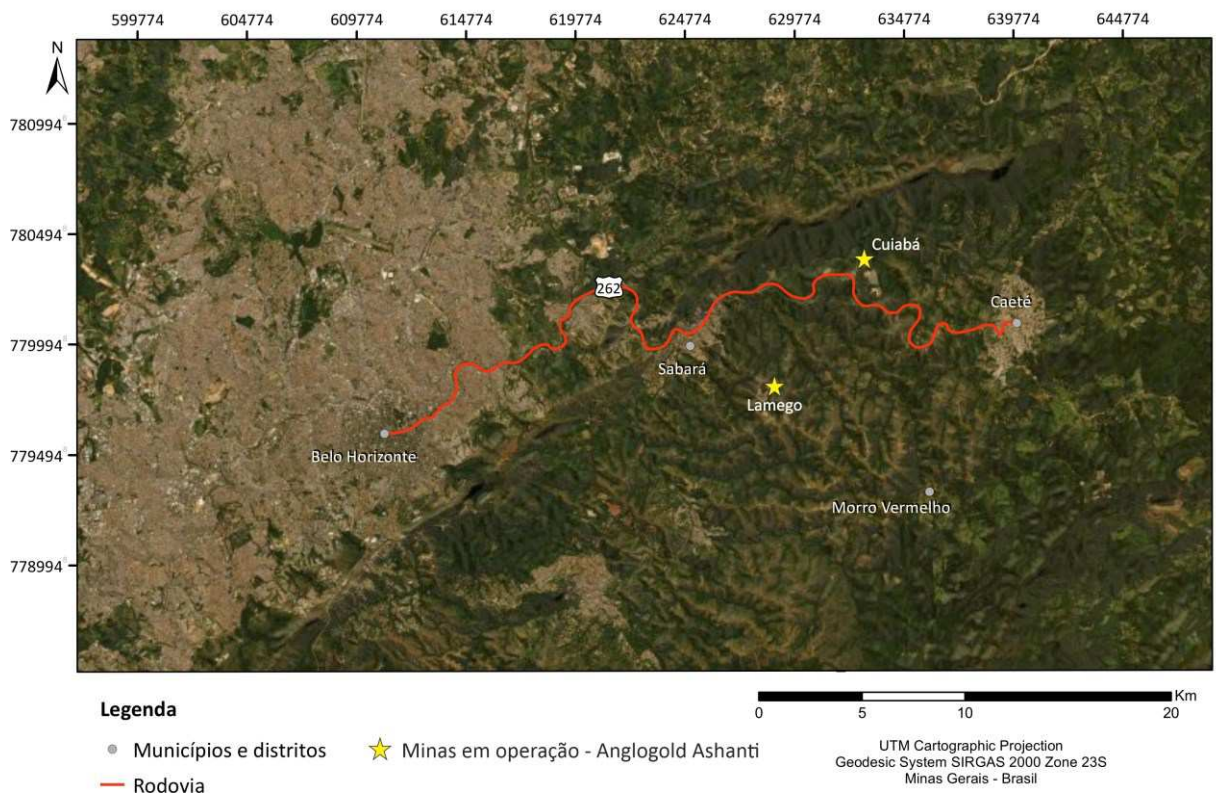
As etapas gerais do trabalho são descritas a seguir:

- a. Revisão bibliográfica;
- b. Amostragem para realização de tomografia computadorizada de raios-X de alta resolução;
- c. Escaneamento de amostras via tomografia computadorizada de raios-X de alta resolução;
- d. Processamento dos dados obtidos via tomografia computadorizada de raios-X de alta resolução;
- e. Interpretação de dados;
- f. Amostragem complementar para realização de estudo de petrografia microscópica;
- g. Petrografia microscópica;
- h. Interpretação de dados petrográficos;
- i. Elaboração da dissertação.

### **1.7 Localização e vias de acesso**

A mina Cuiabá está localizada no município de Sabará (Figura 1), na região centro-sul do estado de Minas Gerais. A partir de Belo Horizonte o acesso pode ser feito pela BR-262, a cerca de 33 km sentido Sabará-Caeté. A rodovia BR-262, no sentido Sabará-Caeté, pode ser acessada pelo Anel Rodoviário Celso Mello Azevedo, sentido Vitória, ou pela MG-050 através da Av. José Candido da Silveira. A partir da entrada do município de Sabará segue-se pela Av. Perimetral até a R. Presidente Juscelino Kubitscheck; na rotatória do “trevo do Gaia” é acessada a BR-262 onde são percorridos aproximadamente 6 km até a entrada da mina Cuiabá.

Figura 1 - Localização da mina Cuiabá e principal via de acesso (BR-262) entre os municípios de Belo Horizonte e Caeté (BR-262)

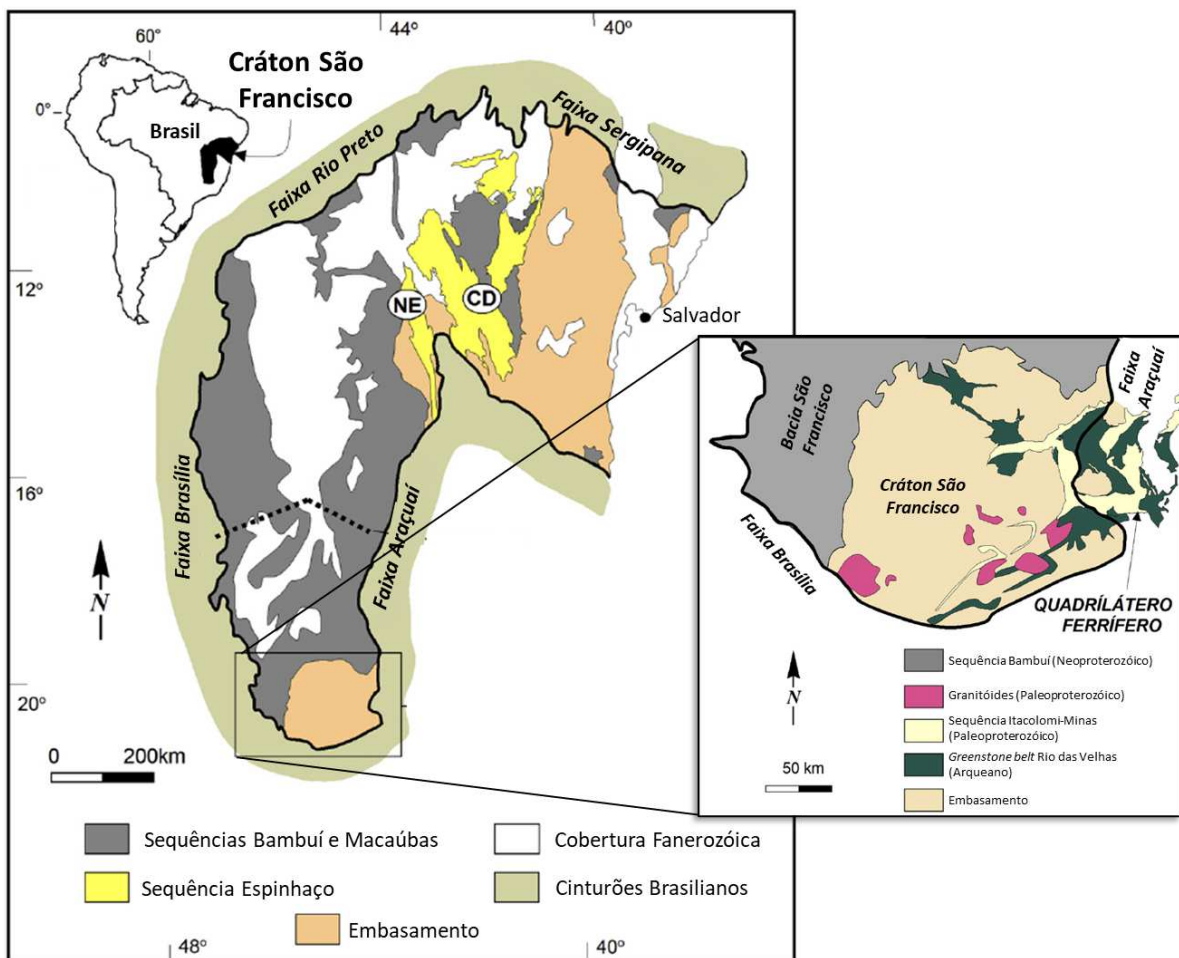


## 2 CONTEXTO GEOLÓGICO

### 2.1 Geologia Regional

A região do Quadrilátero Ferrífero (QF) é uma importante província metalogenética brasileira localizada no sudeste do estado de Minas Gerais que recobre uma região de aproximadamente 7.000 km<sup>2</sup> (Almeida, 1967; Dorr, 1969). O QF (Figura 2) está situado na porção meridional do Cráton São Francisco (Almeida, 1977), sendo seccionado em sua porção central pela Faixa Araçuaí (Pedrosa-Soares et al. 2007) e limitado pelo Cinturão Mineiro ao sul (Teixeira et al. 2015).

Figura 2 - Localização do Quadrilátero Ferrífero (QF) considerando a posição geotectônica do Cráton São Francisco e faixas orogênicas adjacentes (Modificado de Alkmim e Martins-Neto, 2012)



### 2.1.1 Estratigrafia

O arcabouço estratigráfico do Quadrilátero Ferrífero (Figura 3) é composto por um terreno arqueano de granito-*greenstone* sobreposto por sequências supracrustais proterozóicas, onde três unidades principais dominam (Dorr, 1969; Marshak e Alkmim, 1989): os terrenos arqueanos granito-gnáissicos; o Supergrupo Rio das Velhas, de idade arqueana; e as unidades sedimentares proterozóicas do Supergrupo Minas. Também há unidades do Grupo Sabará, que corresponde a uma sequência vulcano-sedimentar depositada em uma bacia *foreland*, e Grupo Itacolomi, formado por arenitos, conglomerados e pelitos dispostos em discordância angular com as unidades inferiores que pode corresponder a um depósito molássico (Alkmin e Noce, 2006). Localmente ocorrem rochas ígneas intrusivas pós-Minas, e o Supergrupo Espinhaço na Serra dos Cambotas à nordeste do QF. A coluna estratigráfica simplificada do QF é identificada na Figura 4.

Figura 3 - Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero. Abreviatura dos plútons e batólitos: C- Caeté, F- Florestal, M-Mamona, P- Pequi, Sa- Samambaia, SN- Souza-Noschese (Modificado de Farina et al. 2016; baseado em Alkmim e Marshak, 1998)

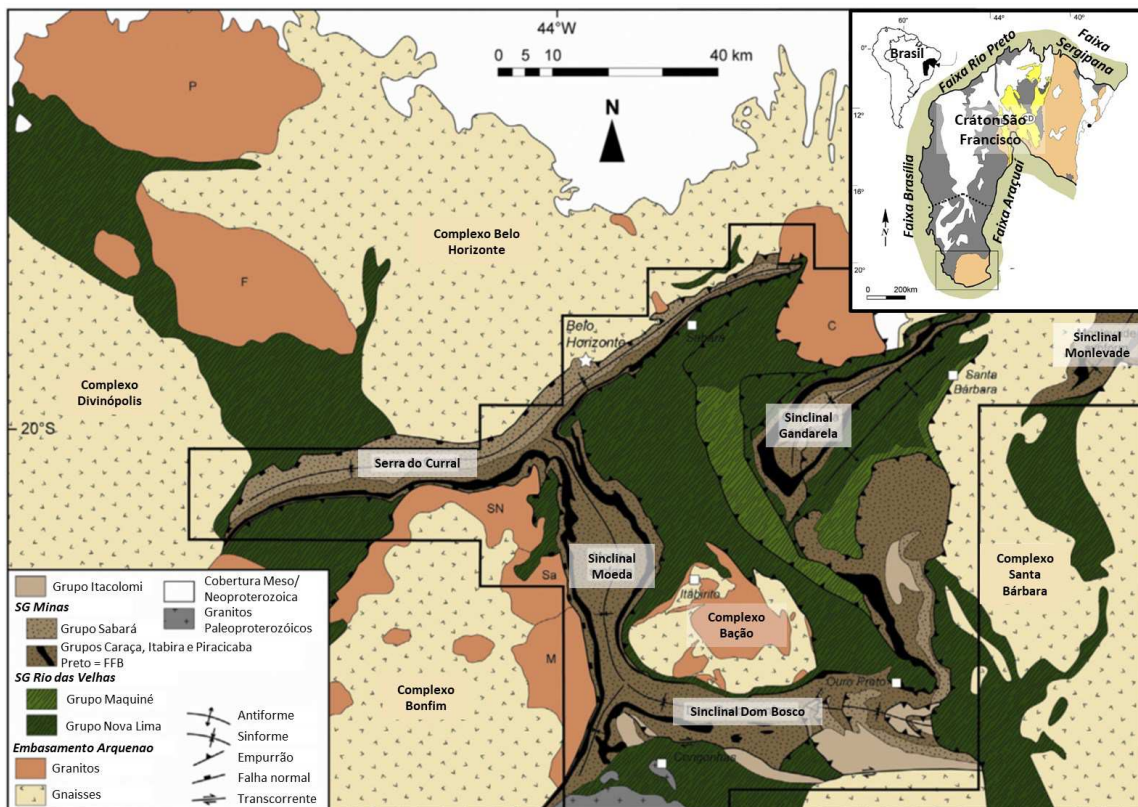
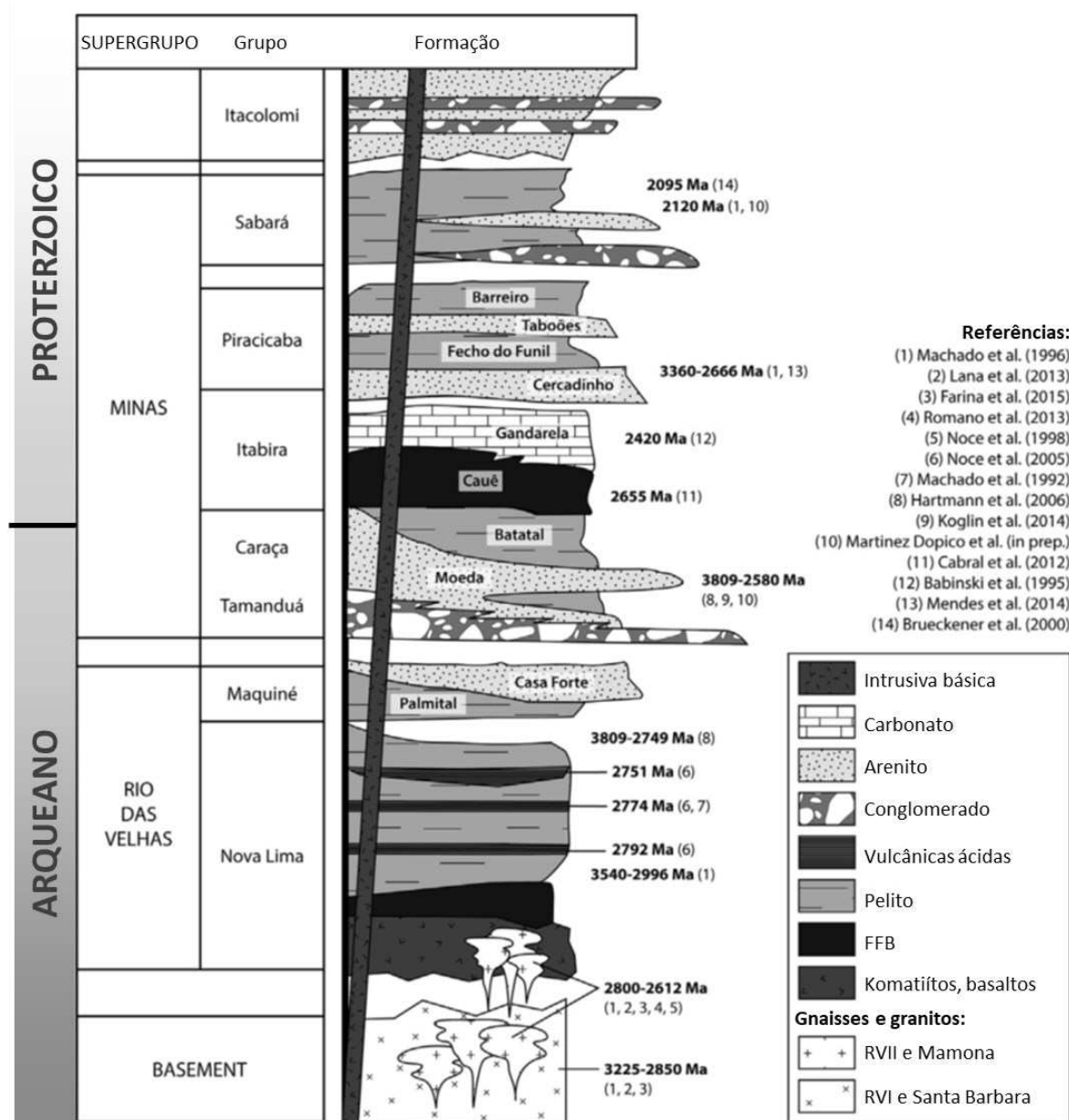




Figura 4 - Coluna estratigráfica das seqüências supracrustais do Quadrilátero Ferrífero. Abreviaturas: RVI e RVII são os eventos Rio das Velhas I e II, SB corresponde ao evento Santa Barbara (Modificado de Farina et al. 2016, baseado em Dorr, 1969 e Alkimim e Marshak, 1998)



### 2.1.1.1 Embasamento granito-gnáissico

A maior proporção do embasamento cristalino do QF é formada por gnaisses trondhjemitó-tonalito-granodioríticos (TTG) bandados, compreendendo quatro principais domos litoestruturais, e.g. Belo Horizonte ao norte, Caeté a nordeste, Bação na porção central, e Bonfim a oeste. Esses complexos TTG são intrudidos por metatonalitos, metandesitos,

metagranitos, pegmatitos e diques máficos (Noce et al., 2007; Farina et al., 2015; Moreira et al., 2016).

A paragênese mineral desses TTGs varia de hornblenda-biotita-plagioclásio-quartzo tonalitos a plagioclásio- K-feldspatos- biotita-quartzo granodioritos que representam um período de metamorfismo de alto grau, com a formação de foliação penetrativa de fácies anfíbolito e desenvolvimento local de migmatitos (Carneiro, 1992; Noce, 1995; Endo, 1997). São caracterizados pela presença de porções de terrenos *greenstone*, de escala métrica quilométrica, que estão em contato tectônico com os domos principais (Lana et al. 2013).

Farina et al. (2015) e referências nele contidas caracterizam a evolução magmática da crosta TTG iniciada em 3200 Ma com a consolidação do Complexo Santa Bárbara, no Evento Santa Bárbara (SB, ca. 3220 – 3200 Ma) e afetada por três episódios de magmatismo: Evento Rio das Velhas I (RV I, ca. 2930-2850 Ma); Evento Rio das Velhas II (RV II, ca. 2800-2760 Ma); e Evento Mamona (ca. 2760-2680). O evento SB representa o magmatismo inicial, originando a crosta paleoarqueana que foi retrabalhada pelos eventos posteriores. Os eventos RV I e RV II representam a maior amalgamação de blocos continentais na região, concomitante à deposição das sequências supracrustais do *greenstone belt* Rio das Velhas, sendo o RV I marcado pela adição de rochas juvenis e o RV II pelo final do desenvolvimento da crosta TTG com magmatismo de ambiente convergente (Lana et al. 2013).

### **2.1.1.2 Supergrupo Rio das Velhas**

O Supergrupo Rio das Velhas (ca. 3000-2700 Ma; Machado e Carneiro, 1992) corresponde a uma sequência de rochas metavulcanossedimentares de idade arqueana, metamorfizadas regionalmente em fácies xisto-verde inferior (Herz, 1970), que definem o *greenstone belt* homônimo em conjunto com o embasamento cristalino. Dorr (1969) subdivide a sequência nos grupos Nova Lima e Maquiné, e posteriormente, Schorscher (1978) descreve fluxos komatiíticos na base da sequência definindo o Grupo Quebra Osso. Em abordagem mais recente, Zucchetti et al. (2000) agrupa o Grupo Quebra Osso ao Grupo Nova Lima.

O Grupo Nova Lima está dividido em três unidades (Vieira, 1988; 1991a, b): a unidade inferior, composta por rochas metavulcânicas básicas komatiíticas a toleíticas intercalados com rochas metassedimentares clásticas e químicas; a unidade intermediária, composta por metavulcânicas máficas e félsicas intercaladas com rochas metassedimentares carbonáceas, formação ferrífera bandada (FFB) e metavulcânicas félsicas; e a unidade superior formada por rochas metassedimentares clásticas intercaladas por metavulcanoclásticas máficas e félsicas.

Sobre eles estão quartzitos e conglomerados do Grupo Maquiné, subdividido nas formações: Palmital, na base, com turbiditos e arenitos de ambiente marinho; e Casa Forte, no topo, composta por arenitos e conglomerados de ambiente fluvial (Baltazar e Zucchetti, 2007; Baltazar e Lobato, 2020).

Baltazar e Zucchetti (2007) subdividiram o Supergrupo Rio das Velhas em associações de litofácies, levando em consideração o ambiente deposicional de suas unidades sedimentares e áreas de origem. Nesta classificação, da base para o topo, o Grupo Nova Lima é separado em: 1) associação vulcânica máfico-ultramáfica, composta por toleitos e komatiitos, 2) associação vulcão-químico-sedimentar, com metavulcânicas máficas e félsicas intercaladas com FFB e chert ferruginoso, 3) associação clástico-químico-sedimentar tipicamente constituída por pelito carbonáceo com BIF e chert ferruginoso, 4) associação vulcanoclástica composta por rochas vulcanoclásticas félsicas e máficas e 5) associação ressedimentada, composta principalmente por grauvaques, arenitos e siltitos. Estas são sobrepostas pelas associações costeiras e não marítimas que correspondem ao Grupo Maquiné. Araújo et al. (2020) revisita a estratigrafia do *greenstone belt* Rio das Velhas e propõe uma subdivisão de diferentes sucessões metavulcânicas sedimentares em três blocos tectono-estratigráficos limitados por falhas, denominados: Santa Bárbara, Nova Lima-Caeté e São Bartolomeu.

### 2.1.1.3 Supergrupo Minas

O paleoproterozoico Supergrupo Minas (2600-2100 Ma, Babinski et al. 1995; 2650 Ma, Cabral et al. 2012) é formado por rochas sedimentares clásticas e químicas que representam uma sequência de gradação de ambiente continental para plataforma de margem passiva com cerca de 6 km de espessura. Dorr (1969) a subdividiu nos Grupos Tamanduá, Caraça, Itabira e Piracicaba. O Supergrupo Minas é extensamente descrito na literatura (e.g. Endo, 1997; Alkmim e Noce, 2006; Mendes et al. 2014) e apresentado no presente trabalho de modo sintético.

Os grupos Tamanduá e Caraça, compostos por quartzitos, filitos, xistos quartzosos e argilosos, itabiritos filíticos e dolomíticos, metaconglomerados e quartzitos grossos, correspondem ao início da fase *rift* e, com o desenvolvimento progressivo para depósitos aluvionares a depósitos de praia. De modo subordinado ocorrem rochas que representam sedimentos marinhos transgressivos. O Grupo Itabira é formado na base por itabiritos, itabiritos dolomíticos, metamargas e filitos, e no topo por metadolomitos, metacalcários dolomíticos, metapelitos, metaconglomerados e metachert que marcam a expansão da bacia e a extensa



sedimentação em plataforma continental. O Grupo Piracicaba é composto por quartzitos puros a ferruginosos, filitos, filitos ferruginosos, metadolomitos, quartzinos finos e metapelitos, descritos como sedimentos de ambiente marinho raso a deltaico.

### 2.1.2 Geologia Estrutural

Uma descrição detalhada das várias propostas para a evolução estrutural do QF está resumida em Baltazar e Lobato (2020). Quatro fases tectono-estruturais são identificadas, i.e. D1, D2, D3 e D4.

As duas primeiras gerações, D1 e D2, estão relacionadas a um evento de deformação arqueana progressiva desenvolvido sob regimes dúctil a dúctil-rúptil. A deformação D1 está correlacionada com o transporte tectônico de N para S, resultando em falhas reversas de tendência E que mergulham para o norte, dobras flexurais abertas sub-horizontais vergindo para S, bem como dobras isoclinais fechadas com eixos mergulhando para ENE. A segunda geração D2 é definida por falhas de empurrão de direção NW em associação com dobras estreitas a isoclinais de tendência NW, vergindo para SW.

As estruturas D3 são atribuídas à fase de compressão do ciclo orogênico paleoproterozoico nomeado como evento Transamazônico. A deformação D3 produziu um cinturão de dobras e empurrões orientado NE-SW, vergente para NW em um regime dúctil-rúptil, com transporte tectônico de SE para NW.

O evento D4 está correlacionado com a orogênese Brasileira do Neoproterozoico ao Ordoviciano Inferior (650 a 450 Ma) com compressão e transporte de E para W, impactando fortemente a porção leste do QF e imprimindo dobras orientadas N-S vergindo para W. No domínio leste, D4 sobrepõe-se progressivamente a frentes de empurrão mais jovens a leste, e na porção norte-central forma zonas miloníticas de direção E-W com baixo mergulho para sul.

### 2.1.3 Metamorfismo

Pelo menos dois tipos de metamorfismo são descritos para as rochas do terreno granito-*greenstone* do Quadrilátero Ferrífero (Herz, 1978), sendo o primeiro associado aos complexos TTG e o segundo de caráter regional. O primeiro evento afetou os domos granito-gnáissicos com metamorfismo de fácies anfíbolito a granulito e migmatização local, em fase anterior ao desenvolvimento da sequência *greenstone belt*. Em sequência, o segundo evento de fácies xisto

verde a anfibolito é reconhecido sobre as rochas do Supergrupo Rio das Velhas em cerca de 2700 Ma.

De acordo com Marshak e Alkmin (1989), os supergrupos Rio das Velhas e Minas foram submetidos a dois eventos metamórficos progressivos de caráter regional em fácies xisto verde durante o Paleozoico e Neoproterozoico, respectivamente de idades 2200-2000 Ma e 600-400 Ma. Rosière et al. (2001) propõe a subdivisão do QF em dois domínios metamórficos separados pelo sistema de falhas Cambotas-Fundão: sistema oeste, de baixa deformação e fácies xisto verde inferior; e sistema leste, de mais alta deformação e fácies xisto verde superior a anfibolito, devido à sobreposição de estruturas durante a orogênese Brasileira.

#### 2.1.4 Geologia Econômica

O Quadrilátero Ferrífero abarca a “região das minas” desde o período colonial brasileiro, quando foram encontrados inúmeros depósitos auríferos que abasteceram a economia do Ciclo do Ouro e perduraram por cerca de 200 anos como o principal georecurso da província. O QF foi o maior produtor brasileiro de ouro desde o início do século 18 até o fim dos anos 1970, acumulando mais de 1000 toneladas de metal extraído, o que equivale a cerca de 40% de toda a produção já realizada no Brasil (Lobato et al. 2001a, 2020). Com a evolução do conhecimento regional, o QF consolidou-se como hospedeiro de uma das maiores reservas de minério de ferro de alto teor do mundo, além de outros depósitos minerais de menor expressão econômica como bauxita, manganês e topázio imperial (Alkmin, 2020). Dessa forma, o desenvolvimento econômico, demográfico e cultural das cidades localizadas no QF é fortemente influenciado pelas atividades de exploração e extração mineral desde o início da ocupação do território brasileiro.

Os depósitos de ouro de idade arqueana são hospedados em litotipos do Grupo Nova Lima, na sequência basal do Supergrupo Rio das Velhas, e correspondem a depósitos do tipo ouro orogênico. A mineralização é controlada pela geologia estrutural em zonas de cisalhamento regionais, cujas rochas hospedeiras principais são formações ferríferas bandadas (FFB) e rochas hidrotermalmente alteradas conhecidas como *lapa seca*. As FFB e *lapa seca* são responsáveis, respectivamente, por cerca de 49% e 47% dos depósitos de ouro, sendo os 4% restantes localizados em rochas metavulcânicas máficas, metavulcânicas ultramáficas, rochas metavulcanoclásticas e epiclásticas (Lobato et al. 2001a, b).

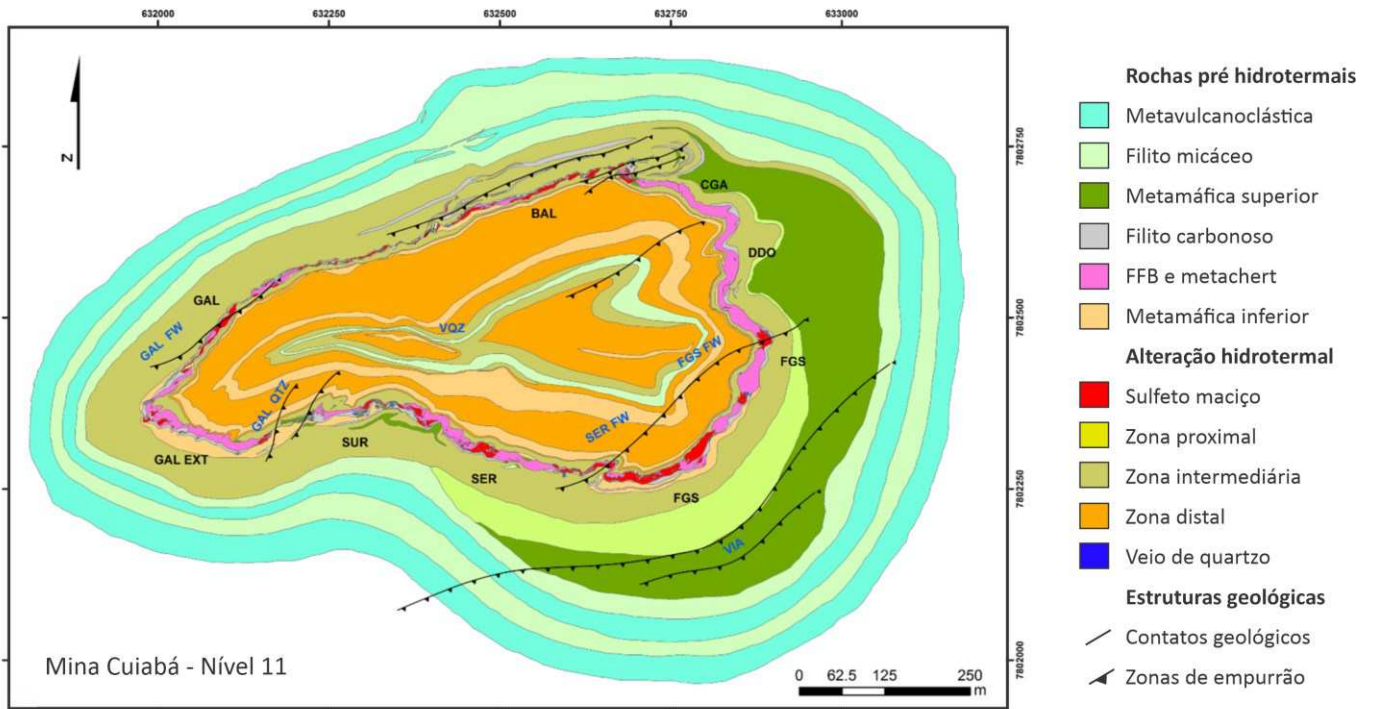
De idade paleoproterozóica, ocorrem depósitos de ouro associados às rochas do Supergrupo Minas de três grupos: orogênicas; de ouro paladiado; e *paleoplacers* em

metaconglomerados piritosos (Lobato et al. 2020). Os depósitos orogênicos paleoproterozoicos localizam-se em extensa faixa mineralizada a sudeste do QF, sendo as minas mais importantes Passagem de Mariana e Santana. A ocorrência de ouro paladiado é hospedada em rochas denominadas Jacutinga, e também de origem hidrotermal encaixadas em zonas de cisalhamento nas FFB do Grupo Itabira. As mineralizações do tipo *paleoplacer* ocorrem na Formação Moeda na forma de lentes de metaconglomerados em quartzitos aluvionares que representam paleocanais sobre superfície de aplainamento nos xistos arqueanos do Grupo Nova Lima.

## **2.2 Geologia Local: Depósito aurífero Cuiabá**

O depósito de ouro Cuiabá está localizado na região nordeste do Quadrilátero Ferrífero (QF), no sul do Cráton São Francisco, e contida na associação vulcanoclástica de Baltazar e Zucchetti (2007). Vial (1980) caracteriza o depósito como uma sucessão de rochas metamórficas de fácies xisto verde, controladas estruturalmente por uma dobra anticlinal nomeada como dobra Cuiabá. A Figura 5 apresenta o mapa geológico da mina no nível 11 e a localização dos principais corpos de minério.

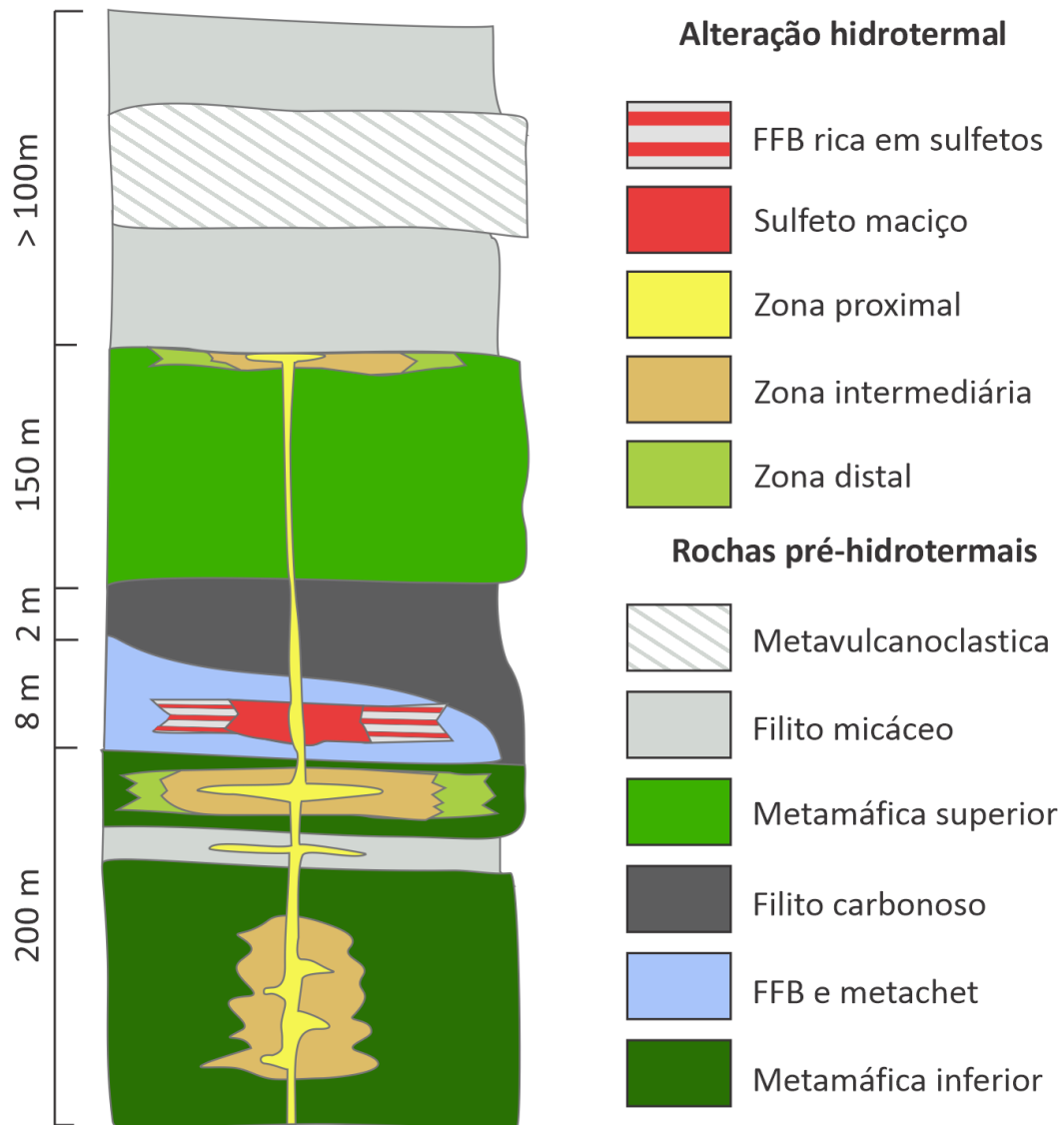
Figura 5 - Mapa geológico do nível 11 da mina Cuiabá evidenciando os corpos principais de minério associados a FFB: FGS – Fonte Grande Sul; SER – Serrotinho; BAL – Balancão; GAL – Galinheiro; GAL EXT – Galinheiro extensão; DDO – Dom Domingos; CGA – Canta Galo; SUR – Surucu; e zonas mineralizadas relacionadas a veios de quartzo-carbonato: VQZ; SER FW – Serrotinho Footwall; FGS FW – Fonte Grande Footwall (Modificado de Vitorino, 2017)



### 2.2.1 Estratigrafia local

A estratigrafia na jazida Cuiabá (Figura 6) foi definida por Vial (1980) e detalhadamente descrita em Vieira (1992), Lobato et al. (2001b) e Fernandes et al. (2016). O depósito é dominado por rochas metavulcânicas, metavulcanoclásticas e metassedimentares metamorfizados em fácies de xisto verde e está relacionado com as unidades inferior, média e superior do Grupo Nova Lima (Vieira, 1988, 1991a, b). Para fins de clareza, o prefixo meta será omitido nessa descrição.

Figura 6 - Coluna estratigráfica da mina Cuiabá (modificado de Fernandes et al. 2016)



A unidade inferior é caracterizada por uma sucessão espessa (>400 m) de vulcânicas máficas de granulação fina intercaladas com pelitos e lentes de pelitos carbonosos. Acima desse conjunto ocorre formação ferrífera bandada (FFB) do tipo Algoma, dominada por carbonatos, com cerca de 15 m de espessura. Os carbonatos são os minerais dominantes de ferro nas FFBs, embora magnetita e estilpnomelano tenham sido descritos localmente na mina (e.g. Sena, 2020).

A unidade intermediária é uma sequência de pelitos carbonosos, cujo conteúdo de carbono orgânico chega até 2%w wt. em rocha total, e rochas vulcânicas máficas alteradas hidrotermalmente e com intercalações locais de pelitos. O topo dessa unidade é formado por rochas vulcânicas máficas não alteradas com espessura estimada em 150 m (Lobato et al. 2001a, b).

A unidade superior possui espessura > 600 m e é constituída por pelitos micáceos com matéria carbonosa, alternados com rochas vulcanoclásticos de composição dacítica e riolítica. Diques máficos de até 30 m de largura cortam todos os tipos de rocha e têm composição semelhante às vulcânicas máficas (Lobato et al. 2001a, b).

### **2.2.2 Geologia estrutural**

Três eventos deformacionais, D1, D2, D3, são descritos na evolução estrutural do depósito Cuiabá (Ribeiro Rodrigues et al., 2007). As duas primeiras gerações estão relacionadas a um evento de deformação progressiva desenvolvido em regime dúctil a dúctil-rúptil, com zonas de falha orientadas na direção NW-SE. Ribeiro-Rodrigues (2007) e Vitorino (2017) consideram o transporte tectônico como frontal de SE para NW, enquanto Fernandes et al. (2016) considera como lateral/oblíquo com direção NE-SW.

A geração D1 é marcada por dobras estreitas e reclinadas com mergulho para ESE, enquanto D2 mostra dobras reclinadas e fechadas coaxiais à fase D1 (Fernandes et al. 2016; Vitorino et al. 2020). As estruturas reconhecidas como D3 são dobras com eixos sub-horizontais caindo para S, formadas sob condições dúcteis-rúpteis. Estes incluem uma clivagem de crenulação (S3 = EW-NS/subvertical) e uma linha de crenulação com tendência NS e EW, que é paralela aos eixos das dobras abertas de D3.

A dobra Cuiabá é um anticlinal invertido com um flanco norte invertido e uma sequência normal no flanco sul (e.g. Vial, 1980, Ribeiro Rodrigues et al., 2007). Essa estrutura é uma dobra isoclinal em escala quilométrica marcada pelos contornos da FFB. O eixo da dobra mergulha 116/35° na superfície cujo mergulho progressivamente diminui com profundidade, variando entre 35° a 12° abaixo do nível 18 (Vitorino et al., 2020). A gênese da dobra Cuiabá ainda está sendo debatida (Vial, 1980; Vieira, 1992; Ribeiro Rodrigues, 1998; Ribeiro Rodrigues et al., 2007; Fernandes et al., 2016).

### **2.2.3 Mineralização**

Três estilos de mineralização principais são identificados no depósito Cuiabá: 1) substituição em FFB; 2) disseminado, relacionado à alteração hidrotermal em zonas de cisalhamento; e 3) veios de quartzo-carbonato-sulfetos relacionados à zona de cisalhamento (Lobato et al., 2001a; Ribeiro Rodrigues et al., 2007).

Vários estudos foram realizados sobre a mineralização de ouro em Cuiabá (e.g., Vial, 1988a; Ribeiro Rodrigues, 1998; Lobato e Vieira, 1998; Costa, 2000; Lobato et al., 2001a, b;

Vitorino et al., 2020; Kresse et al., 2018, 2020; Sena, 2020). Kresse et al. (2020) atesta a origem metamórfica dos fluidos mineralizadores neste corpo de minério da jazida Cuiabá e propõe um modelo hidrotermal em dois pulsos de fluido durante o Arqueano: um cedo-hidrotermal aquo-carbônico, de temperatura relativamente alta; e um fluido evoluído, também aquo-carbônico, de mais baixa temperatura. A mineralização de ouro é neoarqueana, datada em  $2672 \pm 14$  Ma por monazita U-Pb SHRIMP (Lobato et al., 2007).

Os corpos de minério de Cuiabá mostram um forte controle estrutural (Ribeiro Rodrigues et al., 2007) e são concordantes com estruturas lineares de D1, com caimento paralelo à linha de interseção e coincidente com o eixo de dobra Cuiabá (L1 = 116/24-35). Os litotipos apresentam uma foliação axial planar pervasiva (Sn = 135/45, Vitorino et al., 2020) localmente milonítica, com uma proeminente lineação mineral (Lmin1 = 126/22-35) expressa pela orientação preferencial de sericita alongada, carbonatos e sulfetos.

### **3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA: TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE RAIOS-X**

#### **3.1 Aplicações**

Após um intenso desenvolvimento nas ciências médicas para o imageamento de tecidos moles e ossos, a topografia computadorizada de raios-X (computed tomography, CT) foi adaptada para a indústria com o objetivo de obter informações tridimensionais de volumes opacos. Essas aplicações demandaram o imageamento de objetos mais densos, de diferentes volumes e em resoluções maiores, fatores que permitiram seu uso também nas ciências geológicas e de materiais (e.g. Carlson et al. 2000, Ketcham e Carlson, 2001, Kyle e Ketcham, 2015).

A fim de maximizar a efetividade da diferenciação de tecidos, enquanto minimiza a exposição de pacientes aos raios-X, os tomógrafos médicos utilizam uma dose limitada, relativamente baixa, de raios-X ( $< 125$  keV) e detectores de alta eficiência (escala milimétrica). Uma vez que tomógrafos industriais não possuem critérios limitadores para o nível de radiação, as fontes de raios-X podem emitir energias mais altas e objetos podem ser escaneados com tempos maiores de exposição. Detectores menores ainda podem ser utilizados permitindo resoluções maiores compensadas pela maior intensidade dos raios-X (Ketcham and Carlson, 2001).

Kyle e Ketcham (2015) elencam quatro otimizações principais dos CT industriais em relação aos CT médicos, sendo esses: 1) uso de raios-X de maior energia, os quais são mais efetivos ao penetrar materiais densos; 2) uso de pontos focais de raios-X menores, permitindo uma resolução mais alta das imagens; 3) uso de detectores de raios-X mais finos e mais densos, que também aumentam a resolução pela alta eficiência na detecção; 4) uso de tempos de exposição mais longos durante o escaneamento, aumentando a razão entre o sinal e o ruído para compensar o decréscimo de sinal entre a fonte e o detector.

Os scanners de tomografia computadorizada podem ser agrupados de modo geral em quatro categorias (Tabela 2), com base em sua resolução espacial e o tamanho mais apropriado dos objetos para aquele escaneamento (Ketcham and Carlson, 2001). A maioria dos sistemas médicos são considerados como convencionais e os industriais possuem escalas diversas, de convencionais até microtomográficos, a depender da aplicação.

*Tabela 1 - Classificação geral dos tipos de tomografia computadorizada (modificado de Ketcham e Carlson, 2001)*

<b>Tipo</b>	<b>Escala de observação</b>	<b>Escala de resolução</b>
Convencional	m	mm
Alta resolução	dm	100 $\mu$ m
Ultra alta resolução	cm	10 $\mu$ m
Microtomografia	mm	$\mu$ m

A aplicação da tomografia computadorizada de raios-X para a paleontologia marca o início do uso da técnica nas geociências (e.g. Conroy e Vannier, 1984; Haubitz et al. 1988). Em geologia econômica, o CT é notoriamente efetivo no estudo de minérios metálicos, em particular minerais de metais preciosos que tipicamente possuem densidades elevadas, em alto contraste com a densidade dos minerais da matriz (Kyle e Ketcham, 2015).

De acordo com Kyle e Ketcham (2015), um dos recursos subutilizados dos estudos por CT é a possibilidade de analisar as relações entre aspectos estruturais e tramas minerais das amostras de rocha, em comparação com os dados tradicionais das estruturas dos depósitos minerais. Durante a aquisição de dados, a orientação estrutural e atitude das amostras coletadas *in-situ* são relativamente simples de manter. Exemplos de estudos que contemplam análises estruturais por CT são Mote et al. (2005), que extraem orientações de partículas de ouro de



amostras de minérios de Cripple Creek (EUA), e Mauk et al. (2006), que verificam a direção de fraturas controlando o comportamento de fluidos durante a precipitação mineral, no depósito epitermal Karangahake (NZ).

### 3.2 Princípios básicos

O seguinte resumo dos princípios básicos da tomografia computadorizada de raios-X é baseado em Kyle e Ketcham (2015), após a revisão de Ketcham e Carlson (2001).

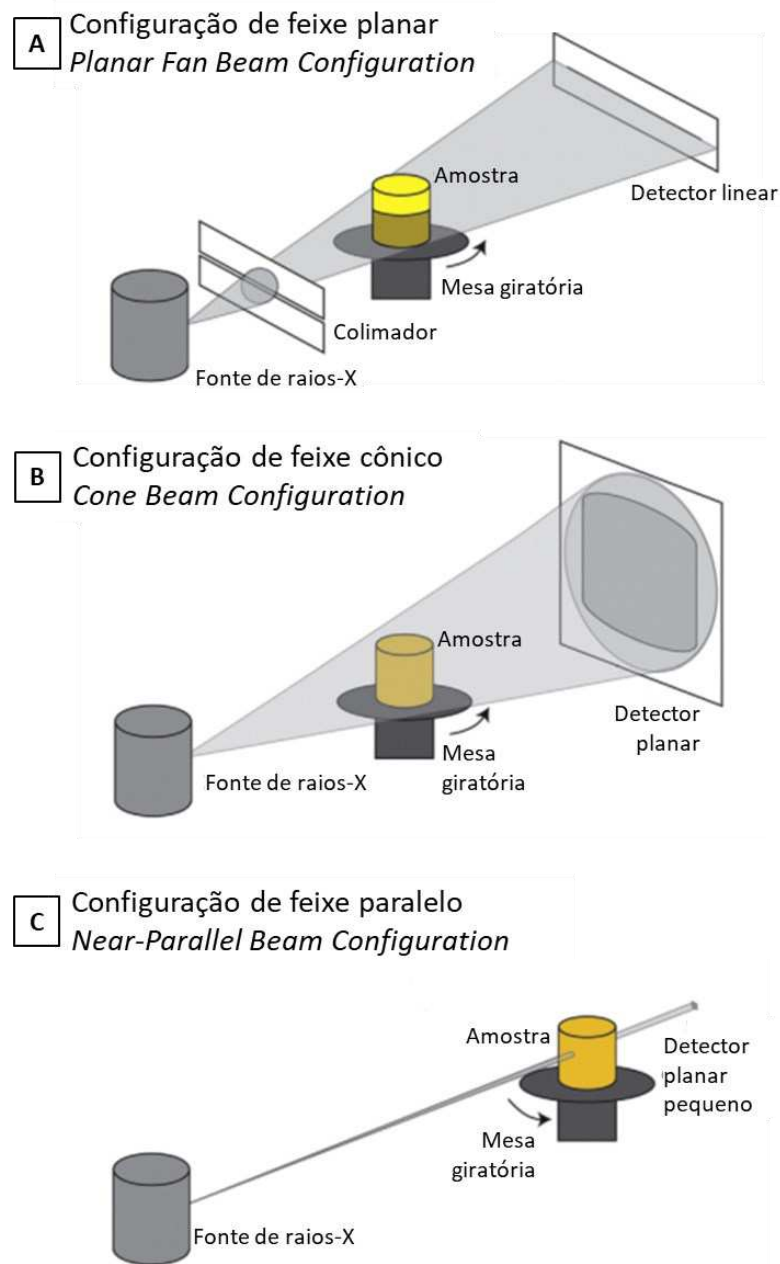
#### 3.2.1 Configuração analítica

Os elementos mais comuns de equipamentos de tomografia (tridimensional, 3D) ou radiografia (bidimensional, 2D) de raios-X são: (i) uma fonte de raios-X; (ii) o objeto a ser escaneado por onde os raios-X atravessam; e (iii) uma série de detectores, que medem a extensão que o sinal de raios-X foi atenuado ao atravessar o objeto.

Para uma determinada posição do objeto e geometria do equipamento, um único conjunto de medidas de intensidade dos raios-X nos detectores é designada como uma projeção. O objetivo da tomografia é a aquisição de múltiplas projeções de um objeto em uma série de orientações angulares, a fim de compor um conjunto de dados 3D. Exemplos de configurações para o escaneamento são evidenciadas na Figura 7, de acordo com a direção de emissão dos raios-X sobre a amostra.

A maioria dos CT em laboratórios emprega uma configuração de feixe cônico (*cone beam configuration*, Figura 7B), na qual o feixe de raios-X se origina de um pequeno ponto focal e ilumina um detector planar maior, com a amostra sendo colocada em um estágio rotacional entre os dois. Essa configuração permite que dados de várias projeções sejam adquiridos ao mesmo tempo, sendo muito eficiente para redução de ruídos na detecção. A alta resolução é obtida pela ampliação geométrica da fonte ao detector e o objeto pode ser posicionado perto da fonte para maximizar efeito.

Figura 7 - Ilustração esquemática de configurações de tomografia de raios-X em alta resolução, baseado no laboratório da The University of Texas at Austin (Modificado de Kyle e Ketcham, 2015)



### 3.2.2 Fonte e detector de raios-X

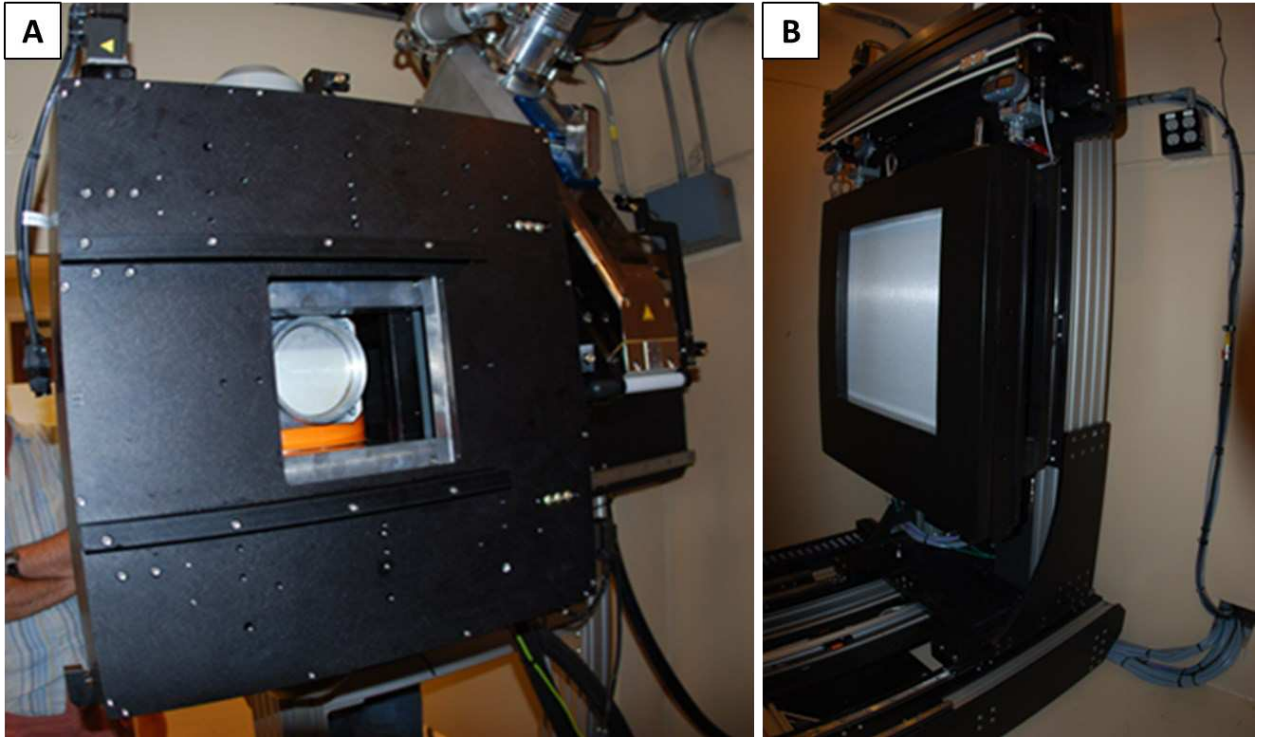
As variáveis da fonte de raios-X (Figura 8A) são (i) o tamanho do ponto focal, (ii) a intensidade dos raios-X e (iii) o espectro de energias de raios-X gerado. O tamanho do ponto focal define parcialmente a resolução do sistema, determinando o número de possíveis caminhos entre fonte e detector que podem interceptar um ponto no objeto. Quanto mais caminhos entre fonte e detector existem, mais atributos desfocados (*blurring features*) podem

existir na imagem resultante. A intensidade dos raios X afeta diretamente a relação sinal-ruído e, portanto, a clareza da imagem. Intensidades mais altas melhoram as estatísticas de contagem de raios-X atravessando a amostra, mas requerem um ponto focal maior.

O espectro de energia define a capacidade de penetração dos raios-X, bem como a atenuação relativa esperada pelos materiais ao serem atravessados pelos raios emitidos. Raios-X de alta energia penetram os objetos de forma mais efetiva do que os de baixa energia, mas são menos sensíveis à mudanças de densidade e composição dos materiais e mais propensos à dispersão. O espectro de energia gerado é geralmente descrito em termos de pico de energia de raios-X (keV ou MeV), mas consistem em um *continuum* em que a energia com intensidade máxima está consideravelmente abaixo do pico.

O espectro “efetivo” total é determinado por uma série de fatores além da energia emitida pela fonte de raios-X, como (i) filtragem pela absorção de fótons dentro do objeto; (ii) filtragem pela passagem através do tubo emissor; (iii) aplicação de filtros para remoção seletiva dos raios-X de baixa energia; (iv) o artefato *beam hardening* no objeto que está sendo escaneado; e (v) a eficiência relativa dos detectores para distinguir diferentes energias. As mudanças no espectro de raios-X por esses fatores podem levar a uma variedade de artefatos durante o escaneamento.

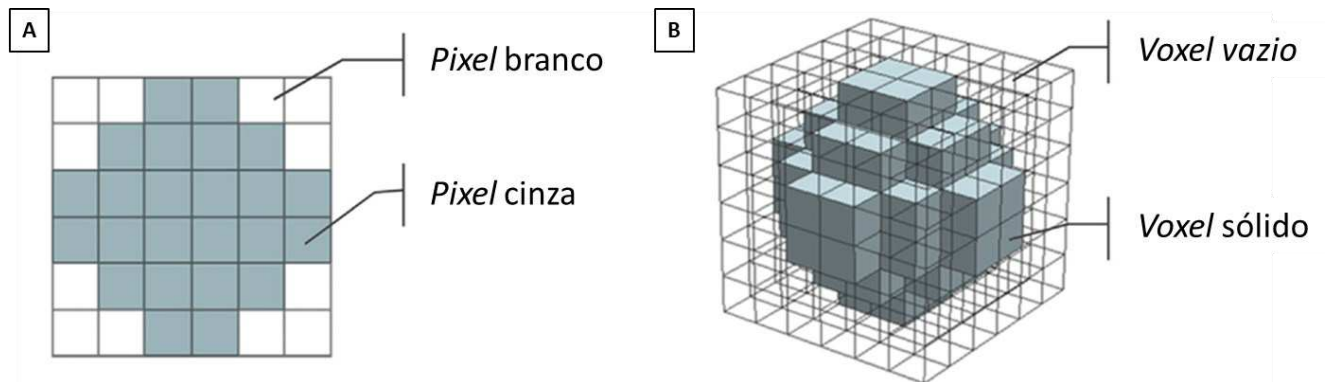
Figura 8 - Exemplo do equipamento de tomografia computadorizada de raios-X do laboratório UTCT da The University of Texas at Austin. A) Fonte de raios-X; B) Detector de raios-X (Arquivo pessoal)



Os detectores de raios-X (Figura 8B) tipicamente utilizam materiais cintilantes de modo que os raios-X, ao atingir a superfície, produzem sinais luminosos que são contados. Os detectores influenciam a qualidade da imagem adquirida por meio de três fatores principais: (i) o tamanho e a quantidade dos elementos individuais detectados; (ii) a eficiência na detecção do espectro de energia gerado pela fonte e sua faixa de sensibilidade; e (iii) a minimização de fatores prejudiciais, como ruídos. A sensibilidade dos detectores, de modo simplificado, é determinada pelo número de valores que ele é capaz de reportar (*bit depth*), por exemplo em contrastes de 16- ou 32-bits. Assim, os valores discretos detectados compõem uma faixa de valores de  $2^{16}$  ou  $2^{32}$ .

Uma fatia do objeto obtida por CT representa uma certa espessura daquele objeto, e é composta por *voxels* (elementos de volume, *volume elements*; Figura 9A), em comparação a uma radiografia digital que é composta por *pixels* (elementos de imagem, *picture elements*; Figura 9B).

Figura 9 - Ilustração de A) Pixel; e B) Voxel (Modificado de Aremu et al. 2017)



### 3.2.3 Atenuação de raios-X

À medida que os feixes atravessam o objeto escaneado, os raios-X são atenuados por dispersão e absorção. Para materiais homogêneos, a equação básica para a atenuação de um feixe de energia constante é definida pela Lei de Lambert-Beer:

$$I = I_0 e^{-\mu x},$$

em que  $I_0$  é a intensidade inicial do feixe de raios-X,  $I$  é a intensidade final,  $\mu$  é o coeficiente de atenuação linear do material e  $x$  é a distância que os raios atravessam no objeto. Para objetos de composição heterogênea, como as rochas, a equação se torna:

$$I = I_0 e^{-\sum \mu_i x_i},$$

onde cada incremento  $i$  define um dos materiais da composição do objeto cujo coeficiente de atenuação linear é  $\mu_i$  em uma extensão linear  $x_i$ . Uma vez que o coeficiente de atenuação é uma função da energia dos raios-X, a solução completa da equação requer a integração no espectro efetivo de energia  $E$ :

$$I = \int I_0(E) \left[ \sum_i e^{-\mu_i(E)x_i} \right] dE.$$

No entanto, a forma precisa do espectro de raios-X geralmente é estimada teoricamente e a maioria dos detectores fornece apenas um único canal por *pixel*, em vez de um espectro de transmissão de energias e intensidades medido naquele ponto. A partir disso, a maioria das estratégias de reconstrução atribuem um único valor a cada *voxel* em vez de um conjunto de intensidades em várias energias. A propriedade física representada pelos valores de CT é, portanto, o coeficiente de atenuação efetivo, pois representa uma média integrada na faixa de raios-X das energias detectadas e varia tanto com as configurações de raios-X quanto com as propriedades da amostra.

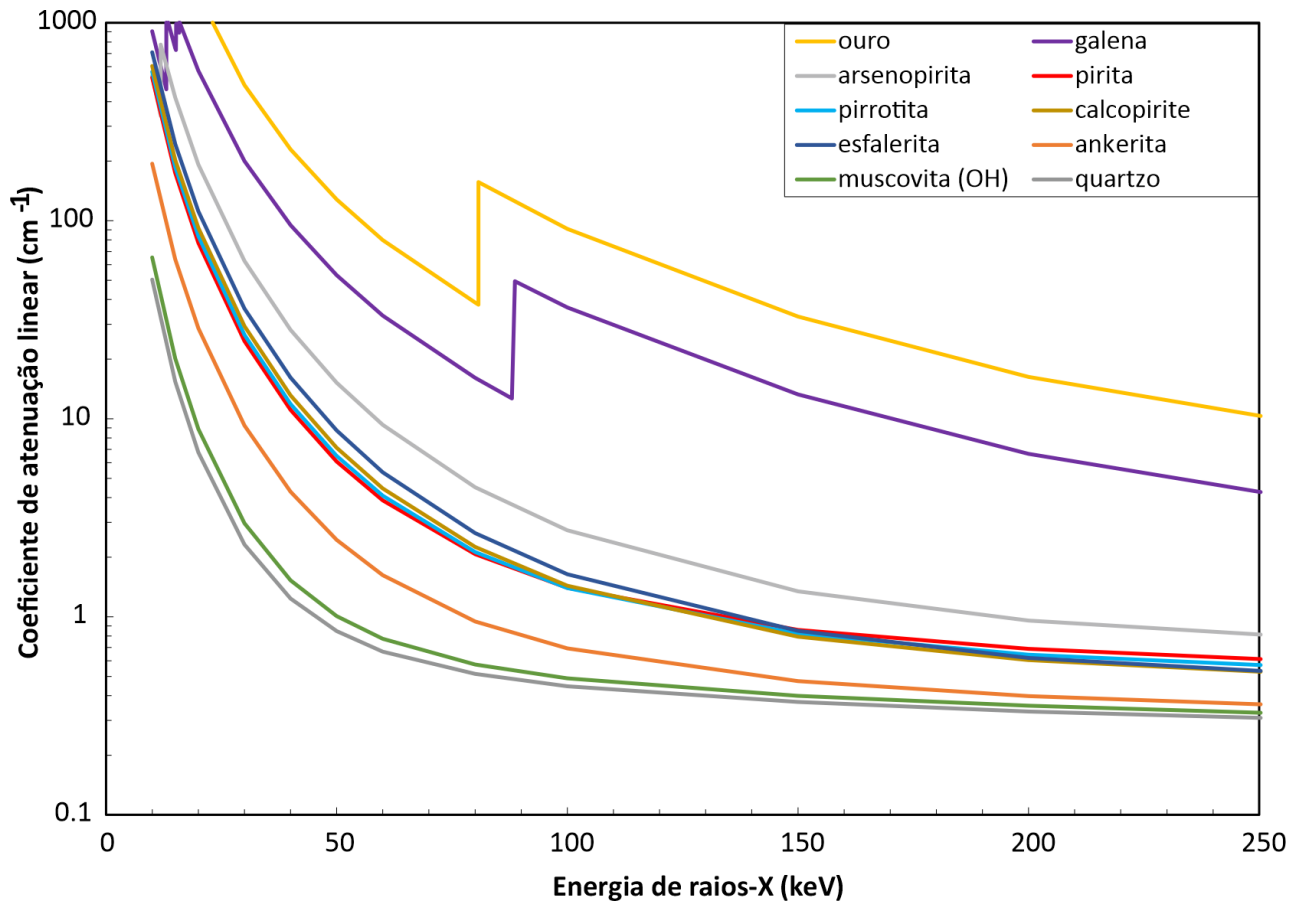
Três processos físicos dominantes são responsáveis pela atenuação do sinal de raios-X ao atravessarem os materiais:

- Absorção fotoelétrica: a energia total de um fóton de raios-X incidente é transferida para um elétron interno, fazendo com que o elétron seja ejetado. Um aspecto desse mecanismo que pode influenciar o imageamento de rochas é a presença de limites de absorção de raios-X, que representam energias necessárias para ejetar elétrons de camadas específicas. O coeficiente de atenuação para um determinado elemento muda repentinamente quando esse limite de energia é excedido, à medida que mais elétrons se tornam disponíveis para absorver fótons.
- Efeito ou espalhamento Compton: o fóton incidente interage com um elétron externo, ejetando o elétron e perdendo parte de sua própria energia, e depois é desviado em uma direção diferente.
- Produção de pares: o fóton interage com um núcleo e se transforma em um par pósitron-elétron, sendo que o excesso de energia do fóton se transforma em energia cinética nas partículas produzidas.

Em geral, para materiais geológicos, o efeito fotoelétrico é o mecanismo de atenuação dominante em baixas energias de raios-X (50-100 keV); o efeito Compton é dominante em energias mais altas (5-10 MeV), e após essa faixa predomina a produção de pares. A importância prática da distinção entre esses mecanismos é que eles são proporcionais ao número atômico  $Z$  dos elementos (absorção fotoelétrica proporcional a  $Z^{4-5}$ ; efeito Compton proporcional a  $Z$ ) e, portanto, os raios-X de baixa energia são mais sensíveis às diferenças na composição do que os de alta energia.

A melhor abordagem para definir a atenuação esperada durante o imageamento de uma amostra geológica é plotar os coeficientes de atenuação linear dos minerais que a compõe ao longo do espectro de energia de raios-X a fim de definir a melhor configuração analítica e o contraste de atenuação entre esses minerais (Figura 10). A capacidade de diferenciar materiais em imagens de CT depende de seus respectivos coeficientes de atenuação linear, que em termos gerais está relacionada à densidade dos minerais. Boas imagens então dependem da densidade e composição atômica dos minerais, do espectro de raios-X utilizado e da relação sinal-ruído. Assim, se os materiais são muito diferentes em suas propriedades de atenuação, detalhes muito finos ou partículas muito pequenas podem ser visualizados; mas se forem partículas semelhantes, só podem ser confiavelmente distintos em grande escala.

Figura 10 - Coeficiente de atenuação linear como função da energia dos raios-X em exemplo de uma determinada paragénese mineral. Os valores foram calculados utilizando a base de dados XCOM Photon Cross-Sections (<http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/Text/XCOM.html>). Os picos observados nas curvas do ouro e galena são limites de absorção, que correspondem ao limite de energia em que um elétron de uma camada interna é ejetado



### 3.2.4 Resolução espacial

A resolução espacial em uma imagem de CT é essencialmente determinada pelo tamanho do detector, o tamanho do ponto focal de raios-X, e a distância da configuração analítica entre a fonte, o objeto e o detector. Como regra geral, a imagem deve ter tantos *pixels* em cada dimensão quanto existem canais detectores que fornecem dados para visualização. Por exemplo, um detector linear de 1024 canais justifica uma imagem reconstruída de  $1024 \times 1024$  *pixels*. A espessura da fatia, que determina a resolução na terceira dimensão, é geralmente igual ao tamanho dos *pixels* em sistemas de feixe cônico, e determinada pelo colimador em

configurações planares. Assim, em configurações de feixes cônicos, os *voxels* possuem o mesmo tamanho nas três dimensões.

A resolução espacial também depende da nitidez das imagens. Esse fator pode ser caracterizado por uma função de dispersão de pontos (*point-spread function*, PSF) ou função de transferência de modulação (*modulation transfer function*, MTF). A utilização do PSF fornece uma interpretação direta, uma vez que o sinal do material dentro de um único *voxel* é parcialmente distribuído pelos *voxels* vizinhos conforme definido pela função PSF, que pode ser representada como um núcleo de suavização gaussiana. O tamanho aparente de qualquer material com qualquer dimensão menor que o PSF é afetado pelo limite de resolução, embora ainda possa ser mensurado com precisão.

### **3.3 Aquisição de dados**

A aquisição de dados por tomografia computadorizada de raios-X consiste em quatro etapas principais, descritas a seguir.

#### **3.3.1 Preparação da amostra**

A única preparação necessária de uma amostra para o CT deve garantir que essa é compatível ao campo de visão do equipamento e que permanecerá imóvel durante o *scan*. A geometria mais eficiente para o imageamento é um cilindro, uma vez que o campo de escaneamento é cilíndrico (Kyle e Ketcham, 2015). O tamanho máximo dos objetos que pode ser escaneados em uma configuração de CT é determinado pela capacidade de aquisição de um sinal suficientemente forte após o feixe ter sido atenuado pela passagem através do objeto. Se o objeto for muito espesso, ele absorverá muita energia e resultará em leituras pequenas no detector, resultando em imagens de baixa qualidade.

Para algumas aplicações, a amostra pode ser tratada para ressaltar contrastes entre as fases que a compõem. De acordo com Ketcham and Carlson (2001), exemplos incluem a injeção de fluidos em amostras para observar características do fluxo de fluido e a imersão de rochas em água para avaliação de permeabilidade e porosidade.



### 3.3.2 Calibração

A etapa de calibração do sistema do CT é de suma importância para estabelecer as características do sinal de raios-X lido pelos detectores nas condições de escaneamento e reduzir as incertezas geométricas. A calibração geométrica é dependente do equipamento, e de modo geral *scanners* com geometria fixa ou movimento limitado não necessitam correções. As duas principais calibrações de sinal determinam: (i) a leitura do detector com os raios-X desligados, designada como “campo escuro” ou *offset*; (ii) a leitura do detector com os raios-X ligados em condições de escaneamento, porém sem o objeto, denominada “campo claro” ou *gain* (Ketcham em Carlson, 2001).

### 3.3.3 Aquisição

De acordo com Kyle e Ketcham (2015), as principais variáveis na aquisição de dados são o número de projeções e o tempo de aquisição de sinal no detector por projeção. Geralmente a rotação da amostra é contínua durante a aquisição e abrange um total de 360°, embora para alguns sistemas rotações mais limitadas possam ser utilizadas. Dados de feixe cônico (*cone beam*) e de feixe paralelo (*parallel beam*) são normalmente armazenados como uma série de imagens de projeção, enquanto dados de uma única fatia (*planar fan beam*) são armazenados como imagens de sinogramas, em que cada linha contém um único conjunto de leituras para uma projeção.

### 3.3.4 Reconstrução

A reconstrução é o processo matemático de converter os dados brutos em imagens de fatias da amostra. Durante a reconstrução, os dados brutos de intensidade em sinogramas são convertidos em números (*CT numbers*) por algoritmos computacionais específicos. A maioria dos laboratórios atuais usam uma escala de 16 bits, que permite que os valores variem de 0 a 65.535 (*bit depth*). Os valores reconstruídos ou *CT numbers* correspondem a tons de cinza nos arquivos de imagem criados ou exportados pelos sistemas. Embora os *CT numbers* idealmente sejam mapeados linearmente para corresponder ao coeficiente de atenuação efetivo do material em cada *voxel*, na maioria dos casos os números são dimensionados arbitrariamente para preencher o *bit depth* disponível (Ketcham e Carlson, 2001).

### 3.4 Artefatos e efeitos de volume parcial (PVE)

Apesar dos resultados de tomografia computadorizada sejam de natureza visual, e portanto permitam uma interpretação direta, a existência de ruídos nas imagens pode tornar a aquisição de dados quantitativos muito desafiadora. Artefatos de digitalização podem suprimir detalhes de interesse, ou fazer com que o *CT number* de um mesmo material mude em diferentes partes de um conjunto de dados. Os denominados artefatos e efeitos de volume parcial (*partial-volume effects*) podem levar a medidas errôneas de dimensões e volumes dos compostos de interesse em um objeto, e são descritas em detalhe em Ketcham e Carlson (2001), Ketcham (2006) e Kyle e Ketcham (2015), nos quais baseia-se a presente seção.

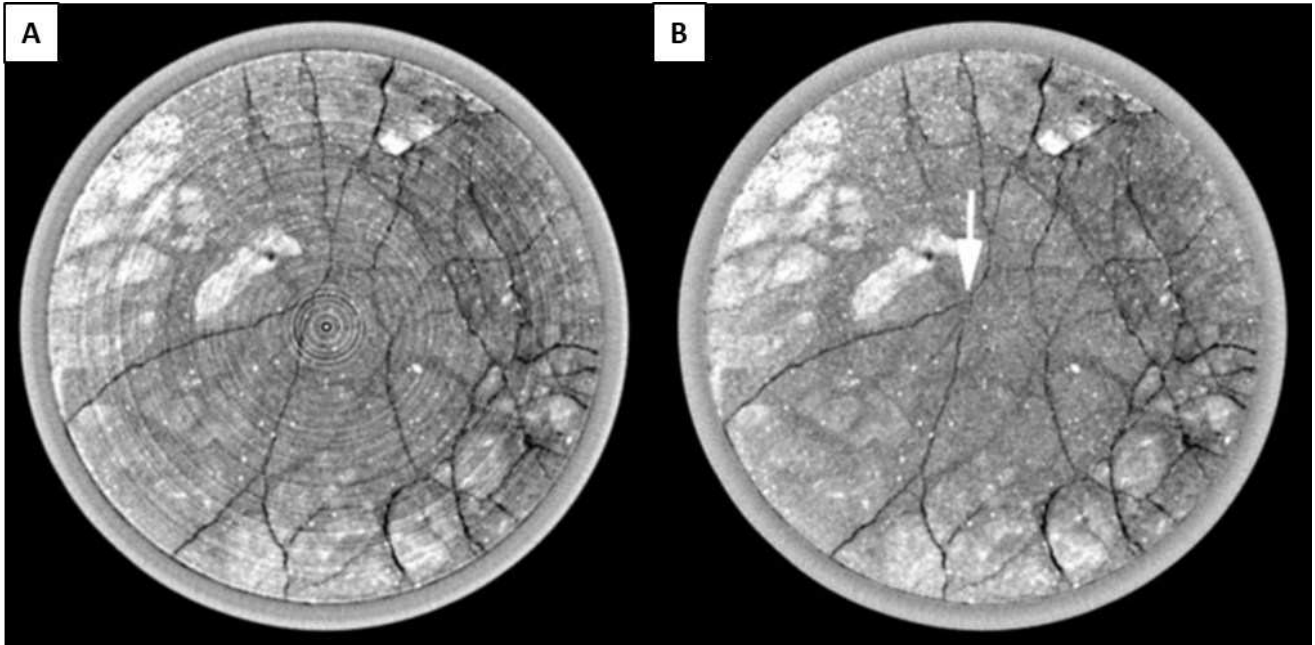
#### 3.4.1 *Beam hardening*

O artefato mais encontrado em dados de CT é o *beam hardening* (em português, endurecimento de feixe), que faz com que o *CT number* de um material varie dependendo da sua localização no objeto. Esse efeito é causado devido ao aumento da energia média de raios-X ou "endurecimento" do feixe de raios-X à medida que passa através do objeto escaneado.

Uma vez que os raios-X de energia mais baixa são atenuados mais rapidamente que os raios-X de alta energia, um feixe policromático atravessa um objeto e perde preferencialmente as partes de baixa energia de seu espectro. O resultado é um feixe que, embora menor em intensidade geral, tem uma energia média mais alta do que o feixe incidente. Esse efeito também significa que, à medida que o feixe atravessa o objeto, o coeficiente de atenuação efetivo da maioria dos materiais diminui.

Esse processo geralmente se manifesta como um escurecimento no centro das imagens do objeto e um brilho na região das extremidades (Figura 11A). O *beam hardening* também pode ser gerado por partículas de minerais de alto número atômico, que se manifestam como listras claras e escuras se estendendo na matriz circundante.

Figura 11 - Exemplos dos artefatos *beam hardening* e *rings*. A) Fatia de CT após o escaneamento; B) Fatia de CT após correção dos artefatos em software durante a reconstrução (Modificado de Ketcham e Carlson, 2001)



Existem várias soluções para esse artefato, desde a preparação de amostras, escaneamento até o processamento de dados. Estratégias contemplam a utilização de filtros atenuadores antes ou depois dos feixes passarem pelo objeto, a calibração do sistema usando um material de propriedades de atenuação semelhantes ao objeto, e o emprego de técnicas matemáticas durante a reconstrução dos dados adquiridos (Figura 11B).

### 3.4.2 Rings

Os artefatos *rings* (em português, anéis) aparecem como círculos completos ou parciais centrados no eixo rotacional da amostra (Figura 9A) e são causados por mudanças na detecção de elementos individuais ou em conjunto, que causam a ocorrência de valores anômalos de um ponto em comparação a seus vizinhos. Os *rings* podem ser reduzidos durante a aquisição de dados, tornando as condições de calibração mais similares às condições de escaneamento do objeto em termos de intensidade do feixe e energia. Outro método é o *dithering*, ou aplicação de ruídos intencionais, permitindo que os sinais anômalos sejam dispersos na amostra, ao invés de concentrados.

Artefatos *ring* são mais facilmente corrigidos por meio do processamento de dados que os artefatos *beam hardening*. Uma série de leituras anômalas de um único detector aparece em

um sinograma como uma linha vertical e, portanto, pode ser detectado e removido antes da reconstrução. Da mesma forma, uma imagem reconstruída pode ser convertida em coordenadas polares, e então as linhas verticais detectadas são removidas e convertidas de volta.

### 3.4.3 Efeitos de volume parcial e *blurring*

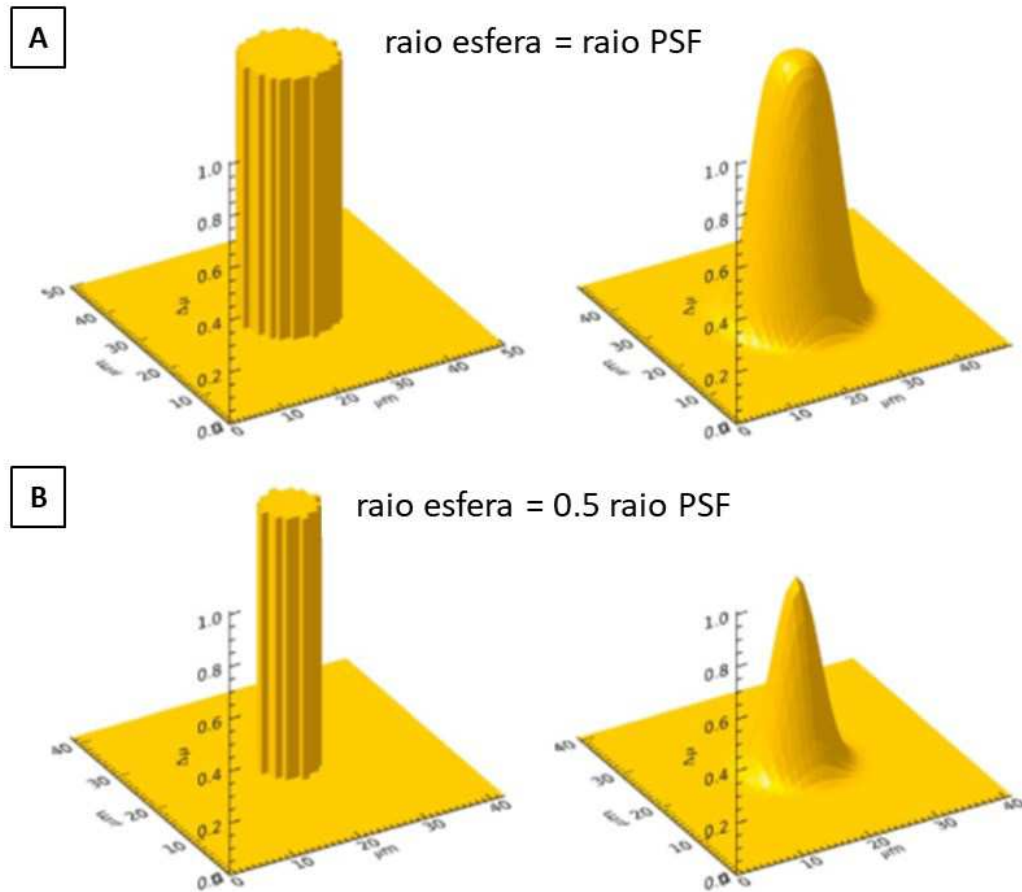
Uma característica fundamental e inevitável das imagens de CT é a resolução espacial finita. Se mais de um material ocupa o volume contido por um *voxel* de dados, o valor de atenuação do *voxel* será a média ponderada desses materiais. Esse artefato é designado efeito de volume parcial (*partial-volume effect*, PVE). Devido às limitações inerentes de resolução, como o tamanho do ponto focal e dos detectores de raios-X, todos os limites dos materiais são desfocados até certo ponto em um *voxel* e podem afetar os *CT numbers* dos *voxels* vizinhos, causando o efeito de *blurring* (em português, desfoque).

Esses artefatos podem ser resumidos como uma função de dispersão de pontos (*point-spread function*, PSF), que corresponde a um filtro de suavização 2D que é convoluído com a realidade para produzir a imagem CT. A forma exata do PSF é indeterminada e depende de vários fatores geométricos, sendo sugerida geralmente como uma forma gaussiana.

Quando o artefato é mais largo que o PSF, a consequência aparente são limites borrados. Quando um atributo tem uma dimensão menor que o diâmetro PSF, ambos brilho e largura aparente são afetados. A largura da zona sobre a qual o sinal de atenuação é divergido corresponde à soma do diâmetro PSF e à dimensão do artefato, de modo que nenhum artefato parecerá menor que o PSF. Assim, para a realização de medidas quantitativas, é necessária a aplicação de métodos corretivos para compensar o *blurring* e PVE. A combinação de efeitos de volume parcial e *blurring* é chamada de efeito PVB (*partial-volume and blurring*) seguindo Ketcham e Mote (2019).

A Figura 12 representa a ocorrência desses artefatos na aparência e medição de esferas. Se o raio da esfera for da ordem do PSF (Figura 12A), então suas bordas são borradas mas sua região central manifesta o membro final do *CT number* do material. Quando o atributo é menor que o PSF, o *CT number* central e a diferença entre a matriz diminuem, tornando-a mais escura nos dados da imagem (Figuras 12B).

Figura 12 - Ilustração do efeito da função de dispersão de ponto (point-spread function, PSF) em atributos 3D em dados de tomografia computadorizada de raios-X. A ilustração mostra do lado esquerdo a diferença de atenuação de um atributo esférico em relação à matriz, e do lado direito está evidenciado a aparência do atributo após o efeito dos artefatos caracterizados pela PSF em um resultado de CT. A) Atributo igual ao tamanho do PSF; B) Atributo 0.5x menor que o tamanho do PSF (Modificado de Ketcham e Mote, 2019)



### 3.5 Processamento de dados

O fluxo de trabalho típico do processamento de dados de tomografia computadorizada para caracterização mineral é baseado no processamento de imagens em *software* especializado (e.g. Avizo, [www.fei.com/software/avizo-3d-for-materials-science/](http://www.fei.com/software/avizo-3d-for-materials-science/); ImageJ, [www.imagej.nih.gov/ij/](http://www.imagej.nih.gov/ij/); Blob3D, Ketcham 2005), combinando visualizações 2D e 3D para segmentar e extrair os objetos de interesse. As quantificações dos objetos de interesse são baseadas em estabelecer o sinal de atenuação de raios-X (representado pelos *CT numbers*) associado a esse e convertê-lo em um volume, o que requer uma calibração que relaciona qual volume corresponde a uma determinada atenuação de raios-X em um número finito de *voxels*.

O valor, no entanto, depende não apenas da configuração da fonte de raios-X, mas também de como a amostra interage com os raios-X.

Medições quantitativas de partículas de ouro são particularmente desafiadoras devido à resolução finita dos dados de CT, uma vez que a maioria dos grãos é pequena em relação ao tamanho da amostra. Ketcham e Mote (2019) propõe uma abordagem para a quantificação de atributos de pequeno tamanho que são afetados pelo efeito PVB, designado como método PVB (*PVB method*). O método inclui técnicas para calibração e medição de orientação e forma. Usando uma rocha sintética, consistindo de grãos de ouro suspensos em quartzo e epóxi, demonstrou-se que os volumes de grãos podem ser medidos de forma confiável mesmo quando eles estão muito desfocados (menos de 1,5 *voxels* no raio real).

Em cenários ideais, o histograma dos *CT numbers* tem um vale agudo entre duas fases diferentes e o valor limite é o valor do ponto médio entre essas duas fases. No entanto, não há um único valor limite que permita a medição precisa do volume se os tamanhos das partículas se aproximarem da PSF. O método PVB interpreta cada *voxel* associado a uma partícula como tendo um sinal parcial da fase de interesse, mas também afetado pelo desfoque do material circundante. Medidas quantitativas precisas são então obtidas combinando os *voxels* associados a uma única partícula e extraíndo a porção do sinal dessa.

A segmentação da fase de interesse consiste em selecionar todo o conjunto de *voxels* influenciados por cada partícula, que devido ao *blurring* é inevitavelmente maior que a própria partícula. Primeiro, os dados são processados de forma convencional, selecionando um *CT number* que caracteriza com sucesso as partículas de interesse sem contemplar outros materiais. Cada área selecionada é então dilatada por 1 a 3 *voxels* adicionais em 3D, dependendo do grau de *blurring* (definido pela PSF) e a quantidade de material segmentado com o *CT number* convencional, até que toda a anomalia de atenuação seja englobada.

A convenção proposta pelo método parametriza uma *point-spread function* (PSF) gaussiana definindo o parâmetro  $\Gamma_{PSF}$ , que é aproximadamente a distância para atravessar totalmente de um material para outro, ou o número de pixels através dos quais uma interface plana está desfocada em uma imagem. Essa função pode ser facilmente obtida no software Blob3D, desenvolvido na The Universidade do Texas em Austin (Ketcham 2005), que permite definir, separar e analisar objetos em conjuntos de dados tridimensionais. O procedimento para determinar o parâmetro  $\Gamma_{PSF}$  consiste em desenhar uma linha transversal normal a uma interface nítida entre dois materiais, e o *software* quantifica a extensão de desfoque em milímetros. É recomendado que seja determinada a média entre um conjunto de linhas, desde que a incerteza seja menor que um (1,0) *voxel*.

As medições de volume são obtidas convertendo todo o sinal de CT associado à partícula mineral de interesse ao volume corrigido pelo PVB, usando uma função linear simples que relaciona o número CT de cada voxel  $i$ , englobado pela partícula ( $CT_i$ ), com os números CT ideais ou finais da fase de interesse ( $CT_f$ ) e os números CT da matriz circundante adjacente aos *voxels* de interesse ( $CT_{mat}$ ):

$$v_{PVB} = v_{voxel} \sum_i \frac{(CT_i - CT_{mat})}{(CT_f - CT_{mat})},$$

onde  $v_{voxel}$  é o volume constante de um único *voxel*. O valor de  $CT_f$  é estimado como o máximo *CT number* observado para a fase de interesse em todo o volume escaneado, para o qual as partículas com o menor eixo tenham tamanho maior que  $2x$  *rPSF* e uma região central que não está desfocada. Uma vez que a matriz de amostras de rochas é heterogênea, o  $CT_{mat}$  local é calculado aplicando uma ferramenta no Blob3D que calcula a média dos *CT numbers* dos *voxels* imediatamente, além da área segmentada em uma camada circular de um *voxel* de espessura.

Uma vez que os volumes de interesse são expandidos durante a segmentação, e maiores que as partículas reais, deve-se calcular o número de voxels ( $N_f$ ) englobados pela partícula de interesse com base no volume corrigido e no volume do *voxel*:

$$N_f = \frac{v_{PVB}}{v_{voxel}}$$

Em seguida uma superfície é ajustada ao número de voxels  $N_f$  daquela partícula, utilizada então para calcular o elipsoide de melhor ajuste, esfericidade e os parâmetros de tamanho.

**4 ARTIGO: OROGENIC GOLD ORES IN THREE-DIMENSIONS: A CASE STUDY OF DISTINCT MINERALIZATION STYLES AT THE WORLD-CLASS CUIABÁ DEPOSIT, BRAZIL, USING HIGH-RESOLUTION X-RAY COMPUTED TOMOGRAPHY ON GOLD PARTICLES**



Contents lists available at [ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com)

## Ore Geology Reviews

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/oregeorev](http://www.elsevier.com/locate/oregeorev)

# Orogenic gold ores in three-dimensions: A case study of distinct mineralization styles at the world-class Cuiabá deposit, Brazil, using high-resolution X-ray computed tomography on gold particles

Marília Ferraz da Costa<sup>a,\*</sup>, J. Richard Kyle<sup>b</sup>, Lydia M. Lobato<sup>a</sup>, Richard A. Ketcham<sup>b</sup>, Rosaline C. Figueiredo e Silva<sup>a</sup>, Raphael C. Fernandes<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil

<sup>b</sup> Jackson School of Geosciences, The University of Texas at Austin, Austin, United States

<sup>c</sup> AngloGold Ashanti Córrego do Sítio Mineração S/A, Mina Cuiabá, Sabará, Brazil

## ARTICLE INFO

## Keywords:

Quadrilátero Ferrífero  
Cuiabá  
Archean  
Orogenic gold  
X-ray computed tomography  
Ore characterization  
Ore processing

## ABSTRACT

Ore studies using conventional petrographic methods have an intrinsic limitation that spatial (three-dimensional, 3-D) distribution, orientation, shape and mineral associations have to be inferred by 2-D observations and measurements. Further, developing statistically significant data sets is particularly difficult for gold ores, given the fine grain size and low gold abundance even in high-grade ores. We use high-resolution X-ray computed tomography (HRXCT) and improved processing methods to provide 3-D data of ore textures and in-situ gold particles to discern mineralization styles and improve ore recovery. This is a case study of the Archean, world-class Cuiabá orogenic gold deposit in the Quadrilátero Ferrífero province, the largest underground mine in Brazil.

Selected samples represent distinct mineralization styles at the Cuiabá mine: BIF-hosted ore from the Fonte Grande Sul (FGS) orebody, and gold-bearing quartz-carbonate veins hosted in a metamafic unit from the Veio de Quartzo (VQZ) orebody. This study characterizes shape, size, orientation and mineral associations of over 16,000 gold particles. Segmentation and quantitative measurements of gold particles are particularly challenging due to their small grain size. This issue is addressed using the recently formalized partial volume and blurring (PVB) method. Gold mineralization styles differ in 3-D textural and quantitative aspects including size and spatial distribution. Analysis of the VQZ sample shows that gold particles are mainly free in the quartz-carbonate matrix, with many particles in direct contact with a diverse sulfide mineral assemblage. Gold particles in the BIF-hosted FGS ore form bands in association with high pyrrhotite zones within iron carbonate-rich bands. PVB analysis show that the long axis of measured particles in both ore types ranges from ~25  $\mu\text{m}$  to 1.4 mm, with median values around 115  $\mu\text{m}$ . Larger particles dominantly are sub-equant to prolate spheroids, with smaller particles appearing to be dominantly sub-equant to equant grains. The HRXCT data reveal that the kinematic processes affect gold shape and orientation and indicate the influence of deformation at the grain scale.

## 1. Introduction

Conventional petrographic studies on ore materials commonly rely on two-dimensional (2-D) polished thin sections, using techniques such as optical microscopy, scanning electron microscopy (SEM), mineral liberation analysis (MLA) SEM, electron microprobe (EMP) and laser ablation-induced couple plasma-mass spectrometry (LA-ICP-MS). All of these methods have an intrinsic spatial limitation that leads to restricted interpretation of textural relationships, mineral sizes and abundances, as

three-dimensional (3-D) aspects must be inferred from 2-D observations and data from different sections.

High-resolution X-ray computed tomography (HRXCT) is a non-destructive technique that not only provides striking three-dimensional images, but allows in-situ, three-dimensional mineralogical and textural quantifications. The technique has been applied to a variety of geological investigations over the past two decades (e.g. [Ketcham and Carlson, 2001](#); [Mees et al., 2003](#); [Cnudde and Boone, 2013](#)), including metamorphic (e.g. [Denison and Carlson, 1997](#);

\* Corresponding author.

E-mail address: [mariliaferraz@gmail.com](mailto:mariliaferraz@gmail.com) (M. Ferraz da Costa).

<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104584>

Received 1 April 2021; Received in revised form 19 October 2021; Accepted 11 November 2021

Available online 18 November 2021

0169-1368/© 2021 The Authors.

Published by Elsevier B.V. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

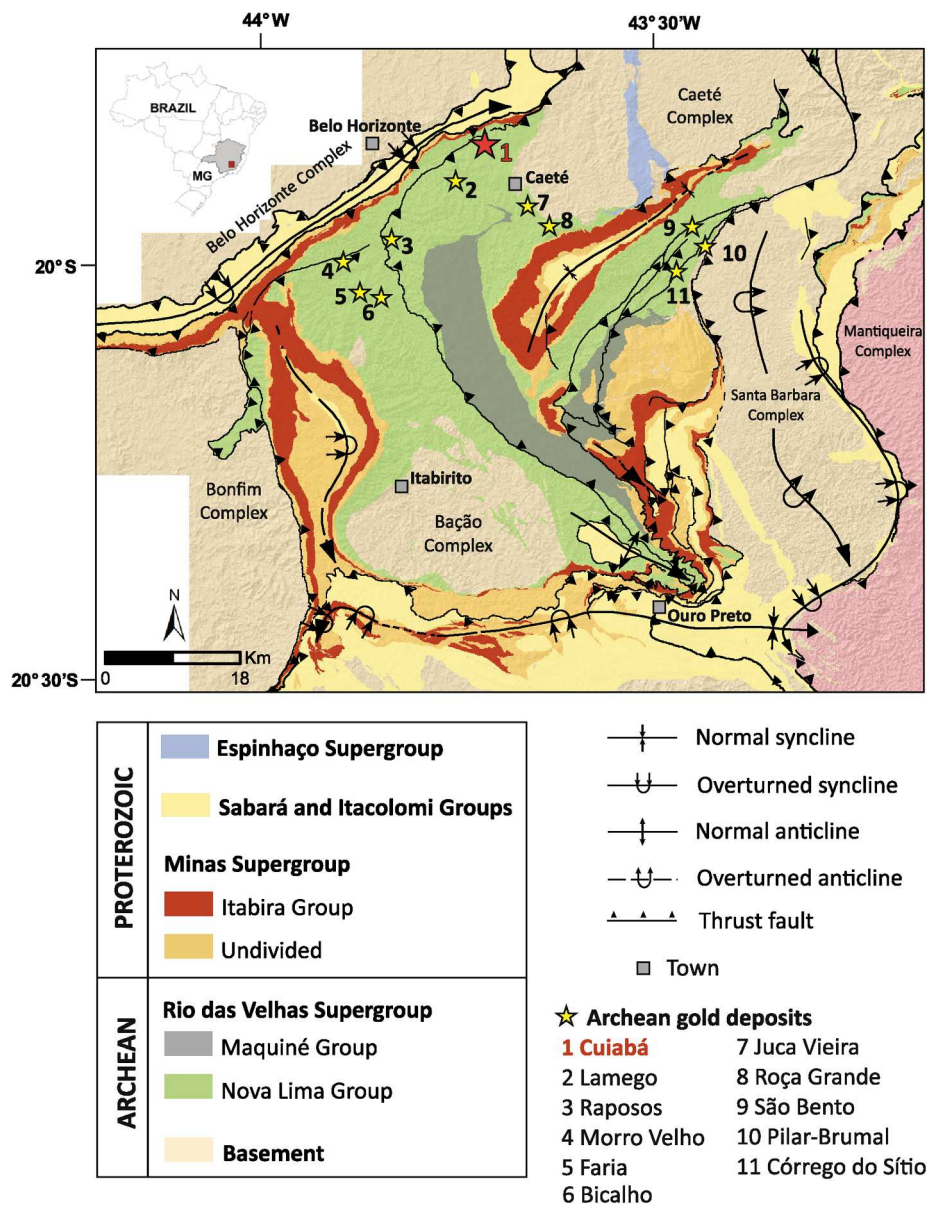


Fig. 1. Simplified geological and structural map of the Quadrilátero Ferrífero region with the main stratigraphic units (based on Dorr, 1969; Baltazar and Zucchetti, 2007; Endo et al., 2019a) and location of major Archean gold deposits (Lobato et al., 2001a).

Huddleston-Holmes and Ketcham, 2010; Denison et al., 1997; Sayab et al., 2016) and igneous petrography (e.g. Jerram et al., 2009, 2010; Godel et al., 2013a; Vukmanovic et al., 2013); meteoritics (e.g. Hezel et al., 2013, Hanna and Ketcham 2017) and petroleum engineering (e.g. Van Geet et al., 2000; Akin and Kovscek, 2003).

The application of HRXCT to economic geology is remarkably effective in the study of metallic ores, particularly precious metal-bearing minerals that typically have significant contrast even with common metallic phases (Kyle and Ketcham, 2015). More recently, HRXCT has been increasingly used as means to investigate ore samples, mainly gold (e.g. Kyle and Ketcham, 2003; Mote et al., 2005; Mauk et al., 2006; Kyle et al., 2008; Wright, 2017), including samples from an orogenic deposit (e.g. Sayab et al. 2016), and PGE ores (e.g. Godel et al., 2006, 2010; Godel, 2013), as well as Fe-Ti-V oxide (Liu et al., 2014), copper (Merinero et al., 2019), and tungsten ores (Le Roux et al., 2015). Furthermore, X-ray CT provides crucial 3-D parameters required for mineral processing (e.g. Miller et al., 2003, 2009; Dhawan et al., 2012; Reyes et al., 2017). Accurate 3-D measurement of size, shape, and orientation, however, can require specialized processing when

economic particles are small relative to the sample volume scanned (Ketcham and Mote, 2019), as is typical when studying precious metal deposits where ore concentrations are only a few grams per tonne.

In this study, samples from the world-class Cuiabá orogenic gold deposit, Brazil (e.g. Lobato et al., 2001a) were selected to represent common mineralization styles recognized in orogenic gold deposits worldwide (e.g., Phillips et al., 1984; Groves et al., 1998; Goldfarb and Groves, 2015). These encompass shear-related, quartz-carbonate veins hosted in metavolcanic rocks (Vitorino et al., 2020) and sulfide-associated, stratabound-style ore in banded iron formation (BIF).

The Cuiabá deposit is located in the Quadrilátero Ferrífero metallogenetic province (Fig. 1) and is the largest active underground mine in Brazil, with 20 levels extending to 1.4 km below surface. The 2019 ore reserves amount to 1.31 Moz with a cutoff grade at 6.04 g/t Au with estimated total resources of 5.26 Moz at 7.45 g/t Au (Resources and Reserves Evaluation Report, AngloGold Ashanti, 2019). The orebody is hosted in greenschist facies mafic metavolcanic rocks, BIF, carbonaceous and micaceous phyllites of the Nova Lima Group, Archean Rio das Velhas greenstone belt (Lobato et al., 2001b).

To analyze in-situ, grain-scale key gold characteristics of BIF- and vein-hosted ores, the samples were scanned using HRXCT and complemented by conventional petrographic studies. This contribution also investigates the influence of the deformation history at Cuiabá on particle relationships and mineral orientations, providing data to discern the gold mineralization styles and improve ore recovery.

## 2. Regional geology

The Quadrilátero Ferrífero (QF) is located in the south-central part of Minas Gerais state, in the southern São Francisco Craton (Almeida, 1967; Dorr, 1969). It is geologically well known for its gold deposits hosted in the Archean Rio das Velhas greenstone belt, as well as its Paleoproterozoic Lake Superior-type BIF-hosted iron deposits. The QF was the most important Brazilian gold-producing area from the early 18th century until the late 1970s (Lobato et al., 2001a, 2020). This province represents an Archean granite-greenstone terrane overlain by Proterozoic supracrustal sequences. Three main units (Dorr, 1969; Marshak and Alkmim, 1989) dominate: the granite-gneiss terranes; the greenstone belt of the Rio das Velhas Supergroup; and the Proterozoic sedimentary units of the Minas Supergroup. Units of the Sabará and Itacolomi groups and of the Espinhaço Supergroup are locally present (Fig. 1).

Banded trondhjemite-tonalite-granodiorite (TTG) gneisses represent the largest proportion of the crystalline basement of the QF, comprising four main litho-structural domes, e. g. Belo Horizonte to the north, Caeté to the northeast, Bação in the central portion and Bonfim to the west. These TTG gneisses are intruded by metatonalites, metandesites, metagranites, pegmatites and Proterozoic mafic dikes (Noce et al., 2007; Farina et al., 2015; Moreira et al., 2016). According to Lana et al. (2013), the magmatic evolution of the TTG crust began as early as 3200 Ma with the emplacement of the 3210 Ma Santa Bárbara Complex, and was affected by three magmatic events at ca. 2930–2900 Ma (Rio das Velhas I event), 2800–2770 Ma (Rio das Velhas II event) and 2750–2700 Ma (Mamona event).

The Rio das Velhas Supergroup (3.0–2.7 Ga; Machado and Carneiro, 1992) is formed by the basal Nova Lima and the upper Maquiné groups (Dorr, 1969). In general, rocks are regionally metamorphosed to the lower greenschist facies (Herz, 1970). The Nova Lima Group is divided into three units (Vieira, 1988, 1991a, b). The lower is composed of komatiitic to tholeiitic basic metavolcanics interlayered with clastic and chemical metasedimentary rocks. The middle unit is composed of mafic and felsic metavolcanics interlayered with carbonaceous metasedimentary rocks, BIFs and felsic metavolcanics. Clastic metasedimentary rocks interlayered with mafic and felsic metavolcaniclastics comprise the upper unit of the Nova Lima Group. These are followed by quartzites and conglomerates of the Maquiné Group.

The Paleoproterozoic Minas Supergroup (2.6–2.1 Ga, Babinski et al., 1995; 2.65 Ga, Cabral et al., 2012) consists of clastic and chemical sedimentary rocks that represent a continental margin sequence. Dorr (1969) subdivided this sequence into the Tamanduá, Caraça, Itabira and Piracicaba Groups. The Sabará and Itacolomi groups respectively represent *syn*-orogenic flysch and molasse sequences (e.g. Dorr, 1969; Endo et al., 2019a, b), with maximum depositional ages of  $2135 \pm 4$  Ma for Sabará and  $2059 \pm 58$  Ma for Itacolomi (Machado et al., 1996). The Espinhaço Supergroup is a metasedimentary sequence deposited between 1.84 and 1.71 Ga (Machado et al., 1989) and covers a small area in the northeast QF.

Baltazar and Zucchetti (2007) and Baltazar and Lobato (2020) proposed four compressional phases (D1 to D4) and one extensional phase (DE) in the QF. The first and second deformation phases (D1 and D2) are related to a progressive deformation event under ductile to ductile–brittle regimes in the Archean. Deformation phase D1 is correlated with N to S tectonic transport, resulting in E-trending reverse faults that dip to the north, sub-horizontal open flexural folds verging to the S, as well as tight to isoclinal folds with axes plunging to ENE. The second phase D2 is

characterized by NW-striking thrust faults in association with tight to isoclinal NW-trending folds, verging SW. Structural features recognized as the D3 phase are NE–SW-oriented, NW-vergent fold-thrust belts in a ductile–brittle regime, with an SE to NW tectonic transport during the Paleoproterozoic Transamazonian orogeny. The extensional structures related to DE phase are associated with the collapse of the Transamazonian orogen. Furthermore, the fourth deformation phase D4 affects all Proterozoic as well as subjacent units and is correlated to the Brasiliano orogeny in the Neoproterozoic to Early Ordovician (0.65 to 0.45 Ga), in a compressional regime with transport from E to W.

## 3. Cuiabá gold deposit

### 3.1. Local stratigraphy

The lithostratigraphy at the deposit area was first defined by Vial (1980) and is described in detail in Vieira (1992), Lobato et al. (2001) and Fernandes et al. (2016). The description that follows is based mostly on these authors.

Cuiabá is dominated by greenschist-facies metavolcanic, meta-volcaniclastic and metasedimentary rocks. This succession is related to the lower, middle and upper units of the Nova Lima Group (Vieira, 1988, 1991a, b). For purposes of clarity, the prefix meta will be omitted in this paper.

The lower unit is characterized by a thick (>400 m) succession of fine-grained mafic volcanics composed by chlorite, epidote, quartz, plagioclase and actinolite, interbedded with pelites and lenses of carbonaceous pelites. Mafic volcanics are overlain by the 15-m-thick Cuiabá banded iron formation (Cuiabá BIF), an Algoma-type carbonate-dominated iron formation. Carbonates are the dominant iron-bearing minerals of the Cuiabá BIF, although magnetite- and stibnomelane-bearing BIFs have been locally described in the mine (e. g., Sena, 2020).

The middle unit is a sequence of alternating carbonaceous pelites, composed of muscovite, quartz, carbonate, chlorite and carbonaceous matter (whole-rock organic carbon content up to 2 % wt.), and hydrothermally altered mafic volcanic with local intercalations of pelites. The top of the middle unit is comprised of unaltered mafic volcanics with estimated thickness of 150 m.

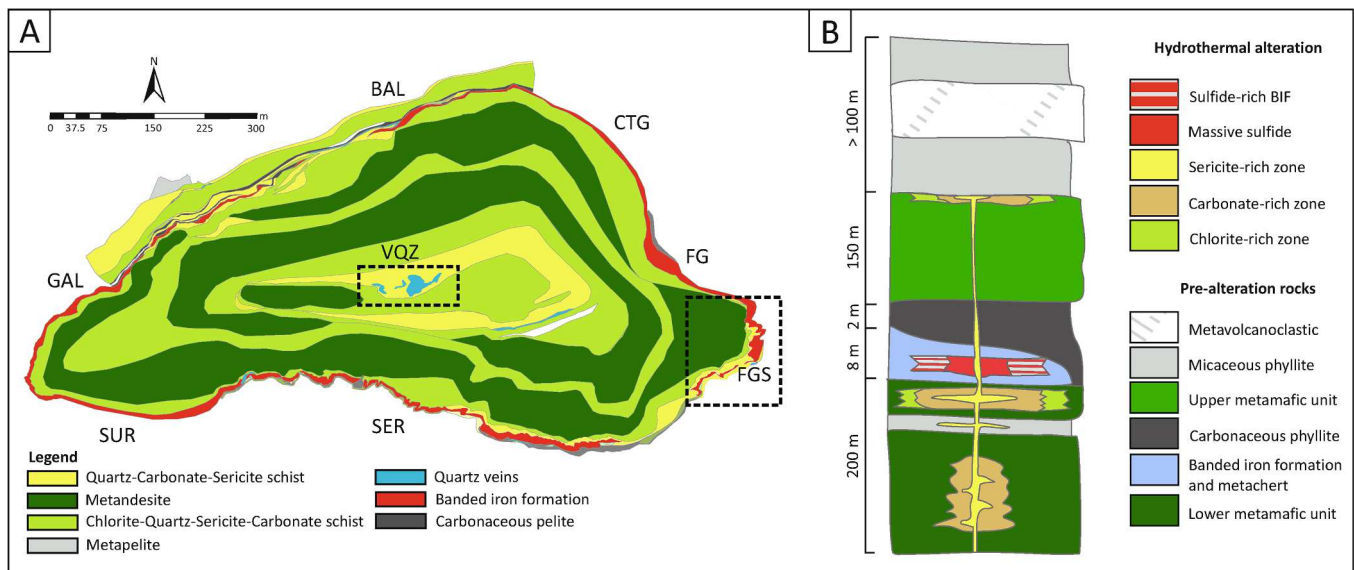
The >600-m thick upper unit is a sequence of pelites alternating with volcanoclastics of dacitic and rhyolitic composition. Pelites are both micaceous and contain carbonaceous matter, the former with a higher modal composition of carbonate. Mafic dikes up to 30 m wide crosscut all rock types and have similar composition to the mafic volcanics.

### 3.2. Structural setting

At least three deformational events are related to the structural evolution at the Cuiabá deposit: D1, D2 and D3 (Ribeiro Rodrigues et al., 2007). The first two generations, D1 and D2, are related to a progressive deformation event developed under ductile to ductile–brittle regimes, with fault zones oriented in the NW–SE direction. However, the sense of tectonic transport is object of discussion. Ribeiro-Rodrigues (2007) and Vitorino (2017) considered a frontal ramp from SE to NW, whereas Fernandes (2016) considered a lateral/oblique ramp with NE–SW direction. Generation D1 is marked by tight, reclined folds plunging to ESE with gold hosted by deformed pyrrhotite-rich BIF, whereas D2 show reclined and close folds coaxial to the D1 phase with gold mainly associated with subhedral pyrite in quartz-carbonate veins parallel to fold axial planes (Fernandes et al., 2016; Vitorino et al., 2020).

Ore bodies are concordant to D1 linear fabrics, plunging parallel to the intersection lineation and coincident with the Cuiabá fold axis ( $L_1 = 116/24-35$ ). All lithotypes reveal a pervasive axial planar foliation ( $S_n = 135/45$ , Vitorino et al., 2020) that is locally mylonitic, with a prominent mineral lineation ( $L_{min1} = 126/22-35$ ) expressed by the preferred orientation of elongated sericite, carbonates and sulfides.





**Fig. 2.** (A) Geological map of the Cuiabá mine, Level 11 and location of main orebodies omitting upper sedimentary rocks (modified from Vitorino et al., 2020). BAL: Balancão; CTG: Canta Galo; FG: Fonte Grande; FGS: Fonte Grande Sul; SER: Serrotinho; SUR: Surucu; GAL: Galinheiro; DDO: Dom Domingos; GAL FW: Galinheiro Footwall; GAL QTZ: Galinheiro Quartzo; GAL EXT: Galinheiro Extensão; SER FW: Serrotinho Footwall; FGS FW: Fonte Grande Sul Footwall; VQZ: Veio de Quartzo; VIA: Viana. (B) Schematic lithostratigraphic succession at the Cuiabá mine (Fernandes et al., 2016).

Structures recognized as D3 are fault bend folds with sub-horizontal fold axes plunging S and verging W, formed under brittle-ductile conditions by EW-shortening parallel to the foliation S1. These include a crenulation cleavage (S3 = EW-NS/subvertical) and an NS- and EW-trending crenulation lineation, which is parallel to the axes of F3 open folds.

The so-called Cuiabá fold is an overturned anticline with an inverted northern flank and a normal sequence in the southern flank (e.g. Vial, 1980; Ribeiro Rodrigues et al., 2007). This structure is a kilometer-scale, isoclinal fold marked by the contours of the Cuiabá BIF (Fig. 2; Fig. 6 in Ribeiro Rodrigues, 2007). The Cuiabá fold axis plunges 116/35° at the surface and displays a progressive shallowing plunge with depth, with dip angles that vary between 35° at the surface to 12° below level 18 (Vitorino et al., 2020). The genesis of the Cuiabá fold is still being debated (e.g. Vial, 1980; Vieira, 1992; Ribeiro Rodrigues, 1998; Ribeiro Rodrigues et al., 2007; Fernandes et al., 2016).

### 3.3. Gold mineralization

Several studies have been conducted on the geology and gold mineralization at Cuiabá (e.g. Vial, 1988a; Ribeiro Rodrigues, 1998; Lobato and Vieira, 1998; Costa, 2000; Lobato et al., 2001a, b; Vitorino et al., 2020; Kresse et al., 2018, 2020; Sena, 2020). Gold mineralization is Neoproterozoic, dated as  $2672 \pm 14$  Ma by U-Pb SHRIMP monazite (Lobato et al., 2007).

Three main mineralization styles are identified in the Cuiabá deposit: 1) stratabound-replacement in BIF; 2) disseminated, related to hydrothermal alteration in shear zones; and 3) shear-zone-related quartz-carbonate-sulfide veins (Lobato et al., 2001a; Ribeiro Rodrigues et al., 2007). These styles reveal variations in hydrothermal alteration due to variations in fluid-rock interactions (Lobato and Vieira, 1998). Cuiabá orebodies show a strong structural control concordant to the phase D1 linear fabrics, with a consistent down-plunge continuity dipping SE, parallel to the intersection lineation L<sub>1</sub> (Ribeiro Rodrigues et al., 2007).

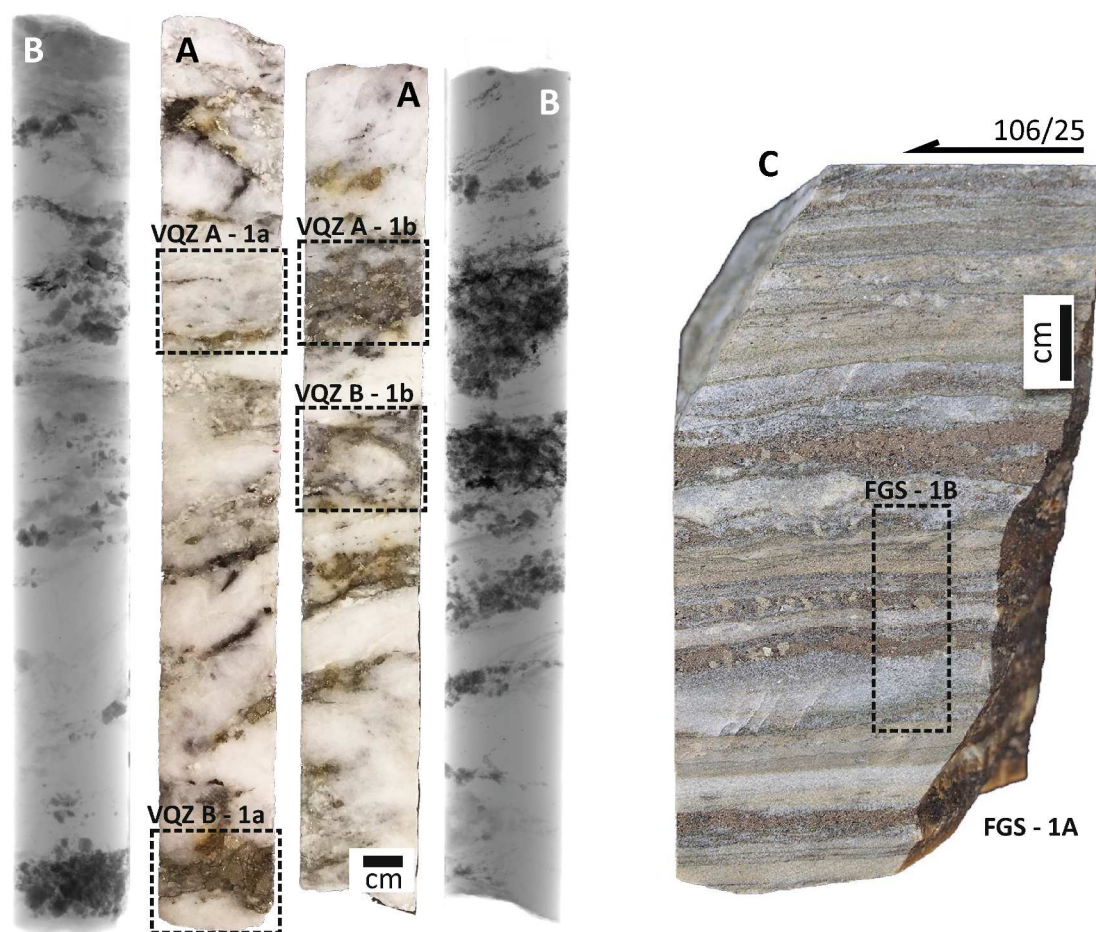
Archean gold mineralization in the QF province has been classified in three types based on the ore-associated minerals and related structures (Vieira and Oliveira, 1988): (i) Type-1, stratabound-replacement style hosted in BIF and *lapa seca*, a range of carbonate-rich hydrothermal-alteration rock products containing quartz, albite, and subordinate

muscovite (Lobato et al., 2001b; Vial et al., 2007). This type is controlled by D1 shear zones and associated folds in which pyrrhotite is dominant, with minor pyrite and arsenopyrite. (ii) Type-2, replacement style in FFB and *lapa seca*, migrating from D2 fractures and shear zones that cross-cut D1 host rock structures, in which pyrite, arsenical pyrite and arsenopyrite are typical. (iii) Type-3, a quartz-sulfide vein style in a variety of host sedimentary and volcanic rocks, typically pyrite-rich, with scattered subordinate pyrrhotite along D1 and D2 shear zones. The Cuiabá gold ore is type-2 dominated, although types-1 and -3 occur subordinately (Vieira et al., 1991).

The six main ore shoots are contained within the Cuiabá BIF horizon and grade laterally into non-economic mineralized or barren BIF: Fonte Grande Sul, Canta Galo, Balancão, Galinheiro, Galinheiro Extensão and Serrotinho orebodies. The typical sulfide assemblage of the Cuiabá BIF is pyrite-pyrrhotite-arsenopyrite, with minor chalcopyrite and sphalerite. Gold is mainly included in pyrite, pyrrhotite and arsenopyrite, varying in size between 10 and 80  $\mu\text{m}$ , and may occur as free particles along crystal boundaries or filling fractures in pyrite, as well as free particles in the quartz-carbonate matrix (Ribeiro Rodrigues et al., 2007).

The Fonte Grande Sul (FGS) orebody contains the largest Cuiabá ore resources, 1.98 Moz at an average grade of 7.68 g/t Au (Resources and Reserves Evaluation Report, AngloGold Ashanti, 2019). The orebody is situated in the SE closure of the Cuiabá fold and increases in area progressively with depth in a constant thickness of 4 to 6 m. The mineralized BIF consists of rhythmic alternation of dark, white, and ochre-colored, millimeter- to centimeter-thick bands, intensively sulfidized, rich in carbonaceous material, fine-grained quartz and carbonates (Ribeiro Rodrigues et al., 1996a, 2007). Associated country rocks show strong sericite, carbonate and chlorite alteration (e.g., Kresse et al., 2018).

Mafic volcanic-hosted orebodies associated with the upper mafic volcanic unit were locally mined in the past, e.g. Viana and Galinheiro Footwall orebodies. Three occurrences were recently discovered in quartz-carbonate veins hosted in the lower mafic volcanic unit: Veio de Quartzo, Fonte Grande Sul Footwall and Serrotinho Footwall. Vitorino et al. (2020) classify these into four different vein systems according to mineralogical and structural features: V1, V2, V3 and V4, associated with hydrothermal alteration and ductile-brittle shear zones. The same authors indicate that gold varies in size between 1 and 250  $\mu\text{m}$ , is mainly



**Fig. 3.** A) Core sample VQZ1 of the Cuiabá vein-style ore, Veio de Quartzo Orebody, showing the HRXCT studies zones. The sample is from a 1.11 m interval with average assay values of 193.46 g/t Au. B) Brightness manipulated digital radiographs from VQZ1. Highly mineralized zones appear as massive dark aggregates of higher net X-ray attenuation, suggesting regions to be scanned by computed tomography. C) Replacement-style BIF sample from Fonte Grande Sul orebody level 19, 1st left sublevel. A physical marker was attached to the surface of FGS-1A sample at the same orientation of the intersection lineation L<sub>1</sub> (106/25) measured on site; subsample FGS-1B is indicated by dashed box.

free within quartz-carbonate veins, but also disseminated in sulfide minerals in the host rock.

Located in the center of the Cuiabá fold, the Veio de Quartzo (VQZ) orebody is associated with a N70°E shear zone, dipping parallel to the main orebody plunge (116/15°). Surface and underground drilling data show that the shoot has a continuous mineralized zone up to 2 km in depth along the plunge and may achieve up to 30 m in thickness. Average grades are around 5 g/t, locally reaching up to 500 g/t due to nugget effect (Vitorino et al., 2020).

## 4. Materials and methods

### 4.1. Sample description

#### 4.1.1. Drill core VQZ orebody – VQZ1

We selected the drill core VQZBUD0063 from the Veio de Quartzo-VQZ Orebody (Fig. 3A) of approximately 3 cm in diameter and 51 cm long, with an average grade of 193.46 g/t Au in a 1.11 m interval. The ore sample corresponds to the V1 vein system, of which the longest axis of V1 veins coincides with the Lmin1 (Vitorino et al., 2020). Four 3-cm core segments were selected to be scanned in pairs (VQZ1 A-1a; VQZ1 A-1b; VQZ1 B-1a; VQZ1 B-1b).

The ore sample consists of a smoky and white quartz-carbonate matrix containing sulfide-rich portions, mostly pyrite and minor pyrrhotite, chalcopyrite, sphalerite and galena. Milky quartz veinlets and millimetric sericite and chlorite-rich films or pods are present, as well as

sparse millimetric rock fragments, possibly from mafic host rock. Gold size distribution is heterogeneous, and particles can be free in the matrix, mainly located along the boundaries of pyrite, pyrrhotite, galena, sphalerite and chalcopyrite, or enclosed in pyrite (Fig. 4A, B, C).

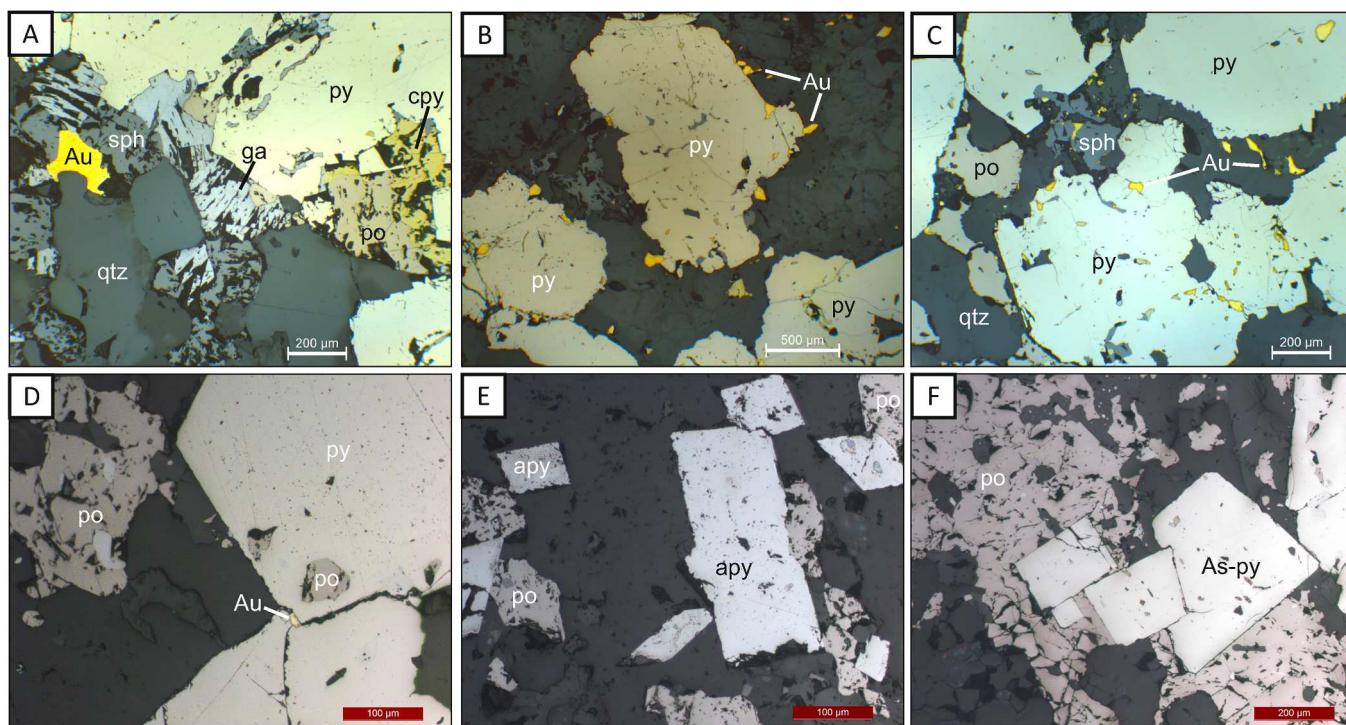
#### 4.1.2. BIF sample, FGS orebody – FGS-1

The selected BIF-ore sample from the Fonte Grande Sul orebody level 19, 1st left sublevel, is approximately 5 × 5 × 9 cm in size (FGS-1A, Fig. 3C). A sub-sample FGS-1B adjacent to –1A, of 1 × 1 × 3 cm, was also investigated. The BIF consists of rhythmic alternation of dark and ochre-colored iron carbonates and smoky and white quartz bands, with intensively sulfidized bands containing pyrrhotite and arsenopyrite, and minor pyrite. Arsenopyrite is acicular to platy, rather than rhombic, and may overgrow pyrrhotite. Gold occurs as free particles along crystal boundaries or filling fractures in pyrrhotite, pyrite or arsenopyrite, as well as free particles in the quartz-carbonate bands. A physical marker was attached to the surface of FGS-1 sample at the same orientation of the intersection lineation L<sub>1</sub> (106/25) measured on site.

### 4.2. Digital radiographs

Digital radiography (DR) has been applied as a means of identifying samples with a greater probability of containing gold particles for more detailed HRXCT analysis (Kyle et al., 2008). Vein-style mineralization typically has an erratic concentration of gold particles; thus DR was used to evaluate portions for scanning the VQZ1 sample. Digital radiographs





**Fig. 4.** Photomicrographs taken under reflected light and uncrossed nicols. A, B, C) VQZ1 sample consists of a smoky and white quartz-carbonate matrix with mostly pyrite and minor pyrrhotite, chalcopyrite, sphalerite and galena. Gold size distribution is heterogeneous and is mainly located at sulfide grain boundaries, enclosed in pyrite, or as free particles in the matrix. D, E, F) FGS-1A sample consists of iron carbonates and smoky and white quartz containing pyrrhotite, and minor pyrite and arsenopyrite. Gold occurs as filling fractures or enclosed in pyrrhotite or pyrite, as well as free particles. Arsenopyrite locally overgrows pyrrhotite (F). qtz: quartz; ga: galena; apy: arsenopyrite; py: pyrite; As-py: arsenic pyrite; po: pyrrhotite; sph: sphalerite; cpy: chalcopyrite; Au: gold.

**Table 1**

Scan parameters.

Sample	Inst. <sup>a</sup>	Scan <sup>b</sup>	kV	mA	Filter	BHC <sup>c</sup>	Voxel size (μm)	NS <sup>d</sup>	$r_{PSF}$ (pix)	$r_{PSF}$ (μm)	$CT_{th}$	$CT_{Au}$
VQZ1 A	NSI	nc	220	0.26	Brass	0.200	18.8	1670	$4.45 \pm 0.88$	84	31,000	62,439
VQZ1 B	NSI	nc	220	0.26	Brass	0.200	18.8	1739	$5.32 \pm 1.01$	100	32,000	65,462
FGS - 1A	NSI	hc	220	0.25	Brass	0.325	40.2	2342	$6.32 \pm 0.72$	243	4051	38,379
FGS - 1B	NSI	hc	140	0.22	Al foil	0.150	9.74	3223	$5.94 \pm 2.68$	58	14,336	65,024

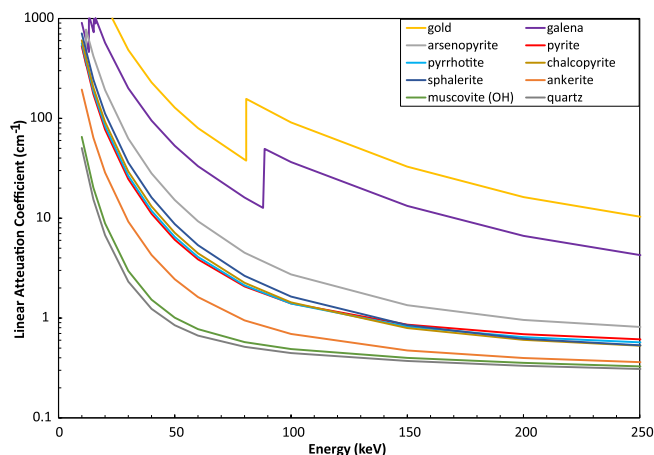
<sup>a</sup> Instrument: NSI scanner. <sup>b</sup> Scan mode: non-continuous, nc; helical continuous, hc. <sup>c</sup> Beam-hardening correction. <sup>d</sup> number of slices.

are obtained by X-ray imaging an object from a single side, and the attenuation of the X-ray beam passing through the object is represented in ranges of grayscale values. These images are typically displayed using the opposite convention as CT images, in which higher attenuation values correspond to darker grayscale values. Because of its extreme density, gold has the highest attenuation and thus the lowest grayscale values. On the other hand, rock-forming minerals in the matrix appear in general brighter than other phases, with metallic minerals being dimmer.

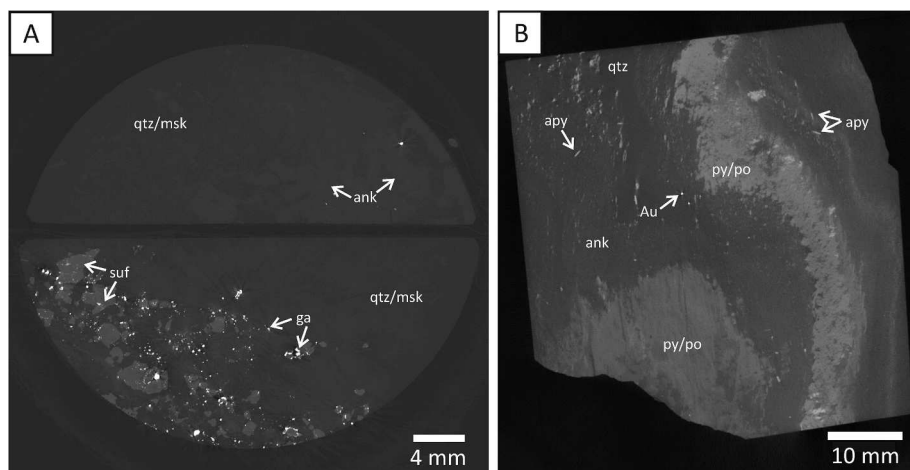
Image brightness and contrast were manipulated in the open source image processing program ImageJ ([imagej.nih.gov/ij](http://imagej.nih.gov/ij)) to aid phase differentiation. Isolated and large gold particles are easily identified in the quartz-carbonate matrix (Fig. 3B). However, in the sulfide-rich portions, associated fine and numerous gold particles are not clearly distinguished. These highly mineralized zones appear as massive aggregates of higher net X-ray attenuation, suggesting portions to be imaged by computed tomography.

#### 4.3. High resolution X-ray computed tomography

Selected samples were scanned at The University of Texas High-Resolution X-ray CT Facility under a range of conditions (Table 1). The facility, and the meaning of various scanning parameters, is



**Fig. 5.** Linear attenuation coefficients as a function of X-ray energy for common Cuiabá minerals. These curves allow prediction of the grayscale contrast between each mineral in HRXCT images. The values shown here are based on end-member compositions and densities and were calculated using the MuCalc (Hanna and Ketcham, 2017).



**Fig. 6.** Representative HRXCT slices of A) VQZ1 A and B) FGS-1A showing grayscale contrast between mineral phases. Gold particles have the higher grayscale values and thus are brighter; rock-forming matrix has the lowest grayscale values and sulfides have intermediate values. qtz: quartz; msk: muscovite; suf: sulfides; ga: galena; ank: ankerite; apy: arsenopyrite; py: pyrite; po: pyrrhotite.

described in detail by [Ketcham and Carlson \(2001\)](#), as well as the UTCT website [www.ctlab.geo.utexas.edu](http://www.ctlab.geo.utexas.edu).

The reconstructed data volumes were analyzed using Avizo ([www.fei.com/software/avizo-3d-for-materials-science/](http://www.fei.com/software/avizo-3d-for-materials-science/)), ImageJ ([www.imagej.nih.gov/ij/](http://www.imagej.nih.gov/ij/)), and Blob3D ([Ketcham 2005](#)).

#### 4.4. Phase differentiation

The X-ray attenuation in a CT scan is represented in ranges of grayscale values, in which a unique value is attributed to a voxel. The grayscale value associated with each mineral phase can be evaluated by plotting the linear attenuation coefficients of the different materials over the range of the available X-ray spectrum and comparing their attenuation at the X-ray energy applied during the scan.

Linear attenuation coefficients were calculated for the typical mineral association of the Cuiabá BIF- and vein-hosted ore ([Fig. 5](#)). At the scan energy of 220 keV and 140 keV, gold is not only distinguished from the typical rock-forming matrix, e. g., quartz and ankerite, but also from the major metallic sulfides, arsenopyrite, pyrite, pyrrhotite, and sphalerite. The attenuation coefficient spectra for these sulfide minerals are similar because of similar mass densities, making these minerals more difficult to differentiate from one another. Due to its elevated density and lead content, galena has a higher linear attenuation, intermediate between the other sulfides and gold.

In CT images, these distinctions of linear attenuation coefficients define the grayscale contrast between each mineral identified. Gold has the highest attenuation and thus the highest grayscale values, the opposite convention applied to digital radiographs. Rock-forming minerals (quartz and iron-carbonates) appear darker than other phases and sulfide minerals have intermediate values ([Fig. 6](#)).

#### 4.5. Data processing

Quantitative measurements of gold particles are particularly challenging due to the finite resolution of CT data, because most particles are small relative to the sample size. As a result, small gold particles appear dimmer than large ones. Measurements that account for this effect are based on establishing the X-ray attenuation signal associated with a particle and converting that to a volume, which requires a calibration that relates how much volume corresponds to a given X-ray attenuation in a finite number of voxels. However, the value depends not only on the X-ray source energy but also on how the bulk sample affects the spectrum, which is a function of its size, density and atomic number variation among rock constituents.

Each voxel in the scan data effectively represents a volume of the rock, so if more than one mineral occupies this voxel volume, the CT value represents a weighted average of the X-ray linear attenuation coefficients of both minerals. Referred as partial volume effects (PVE), these artifacts must be considered when quantifying accurate particle volume. The CT values are also affected by larger-scale blurring that can be characterized by a point spread-function (PSF), the effect of which is to distribute some of the signal from a single voxel among neighboring ones ([Ketcham and Mote, 2019](#)). The combination of partial-volume and blurring effects is referred to as the PVB effect ([Ketcham and Mote, 2019](#)). In the present study, these artifacts were compensated by the PVB method proposed by [Ketcham and Mote \(2019\)](#), in which features are segmented to encompass their total attenuation signal that is then converted to a corrected volume.

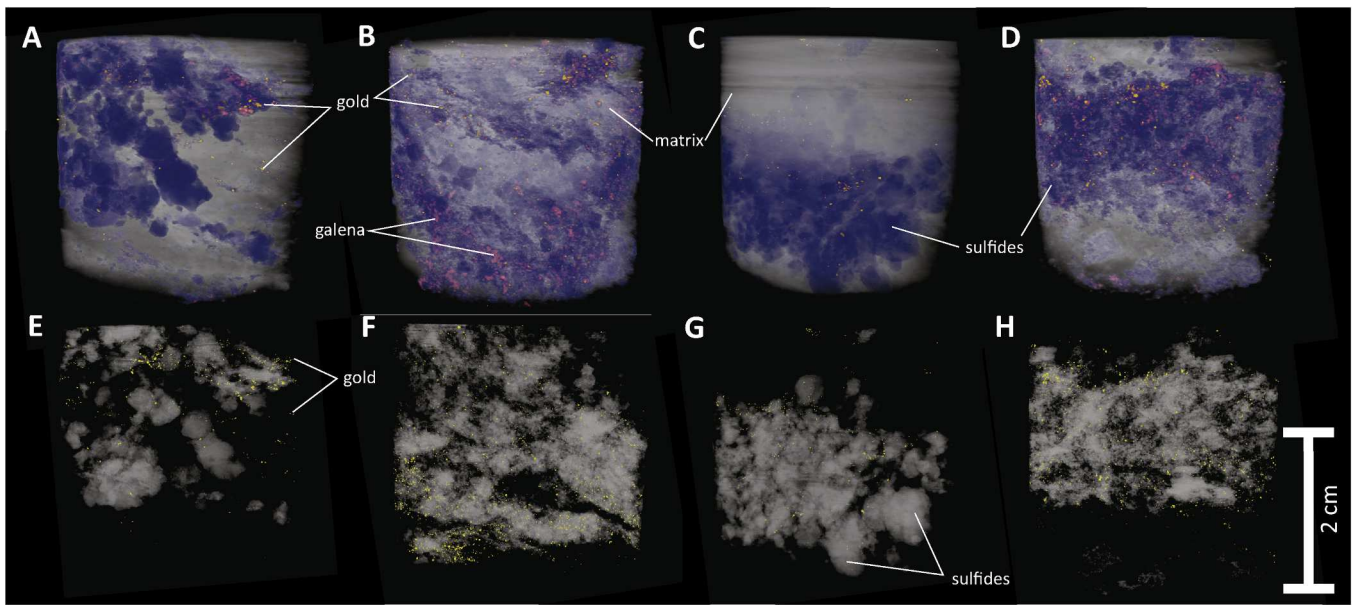
The PVB method is a formalization and expansion of methods used in previous studies for this purpose (e.g., [Mote et al., 2005](#); [Kyle and Ketcham, 2015](#)), including techniques for calibration and improved shape and orientation measurement. Using a fabricated rock consisting of gold grains suspended in quartz and epoxy, [Ketcham and Mote \(2019\)](#) demonstrated that grains volumes can be reliably measured even when they are heavily blurred (less than 1.5 voxels in true radius), and proposed resolution guidelines to ascertain when shape and orientation data are reliable. The present study is the first application of the PVB method to a natural specimen. Data were processed in the Blob3D software, a program designed to define, separate and analyze objects in three-dimensional data sets developed at the University of Texas at Austin ([Ketcham, 2005](#)).

##### 4.5.1. PSF size

The procedure for measuring the point spread-function consists of drawing a series of linear traverses in the data, normal to sharp interfaces between two materials, allowing the software to quantify the amount of blurring along a set of nine parallel lines surrounding each traverse ([Ketcham and Hildebrandt, 2014](#)). Six separate traverses were averaged to determine the scan characteristic PSF parameter ( $r_{PSF}$ ) using only measurements for which the uncertainty in the mean  $r_{PSF}$  was below 1.0 voxel. The obtained functions for each data set are presented on [Table 1](#). Generally, 95% of the attenuation signal from material within a voxel lies within a spherical region of diameter  $r_{PSF}$ .

##### 4.5.2. Segmentation

The segmentation process normally consists of attributing a range of grayscale values to a given phase of interest. In an ideal case, the histogram of CT values has a deep and sharp valley between two different



**Fig. 7.** Three-dimensional (3-D) volume renderings of X-ray CT data of sample VQZ1. Sulfide minerals assigned in purple; galena in pink; matrix in white; gold in yellow, for sections A) VQZ1 A-1a, B) VQZ1 A-1b, C) VQZ1 B-1a, D) VQZ1 B-1B. Sulfide minerals in white; matrix transparent; gold in yellow, for sections E) VQZ1 A-1a, F) VQZ1 A-1b, G) VQZ1 B-1a, H) VQZ1 B-1B. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

minerals, and thus a threshold value is established as the midpoint value between these two phases. However, there is no single threshold value that allows accurate volume measurement if particle sizes approach the PSF. Thus, the most accurate measurements for each particle are obtained using the PVB method. The PVB method interprets each voxel associated with a particle as having a partial signal from the phase of interest, but also affected by blurring from surrounding material. By combining the voxels associated with a single particle and extracting the portion of signal from that particle, accurate volumes, shapes, and orientations can be obtained that are resistant to the effects of limited spatial resolution.

Segmentation for PVB processing consists of selecting the entire set of voxels influenced by each particle, which due to blurring is inevitably larger than the particle itself. First, the data are processed using standard thresholding using a value that successfully selects the particles of interest and leaves out other material. Selected threshold values ( $CT_{th}$ ) are shown in Table 1. Using the Blob3D “Segment” module, each selected area, or “blob”, is then dilated by an additional 1 to 3 voxels in 3D, depending on the degree of blurring (i.e.  $r_{PSF}$ ) and the amount of material captured in the initial threshold, until its entire attenuation anomaly is encompassed.

#### 4.5.3. Volume measurements

Volume measurements are obtained by converting the entire CT signal associated with the mineral particle of interest to a PVB-corrected volume, using a simple linear function that relates the CT number of each voxel  $i$  encompassed by the particle ( $CT_i$ ) with the ideal or end-member CT numbers of the phase of interest ( $CT_{Au}$ ) and the CT numbers of the surrounding matrix adjacent to the voxels of interest ( $CT_{mat}$ ):

$$v_{PVB} = v_{voxel} \sum_i \frac{(CT_i - CT_{mat})}{(CT_{Au} - CT_{mat})}$$

where  $v_{voxel}$  is the constant volume of a single data voxel.

The  $CT_{Au}$  is estimated as the maximum CT number observed for gold across the entire scanned volume, for which the brightest particles with a short axis larger than  $2x r_{PSF}$  (Ketcham and Mote, 2019) should have a central region that is not blurred (Table 1). For FGS-1A and 1B, the  $CT_{Au}$

was defined by the maximum CT numbers gold particles that came close to this criterion, but may have been slightly too small, which would result in a slight overestimate of gold volumes.

In the case of VQZ1 sample the segmented particles were not large enough to precisely determine  $CT_{Au}$ , thus the value was defined as the maximum CT number of the largest particle with all three axes larger than  $r_{PSF}$ . This procedure may result in a slight over-estimation of particle volumes, which would result in the actual gold particles being smaller than the measurements by a uniform factor.

Because the sample matrix is heterogeneous, and thus has a wide range of CT values, local  $CT_{mat}$  is computed for each particle by averaging the CT values in a one-voxel-thick annular shell immediately beyond the selected area.

#### 4.5.4. Shape measurements

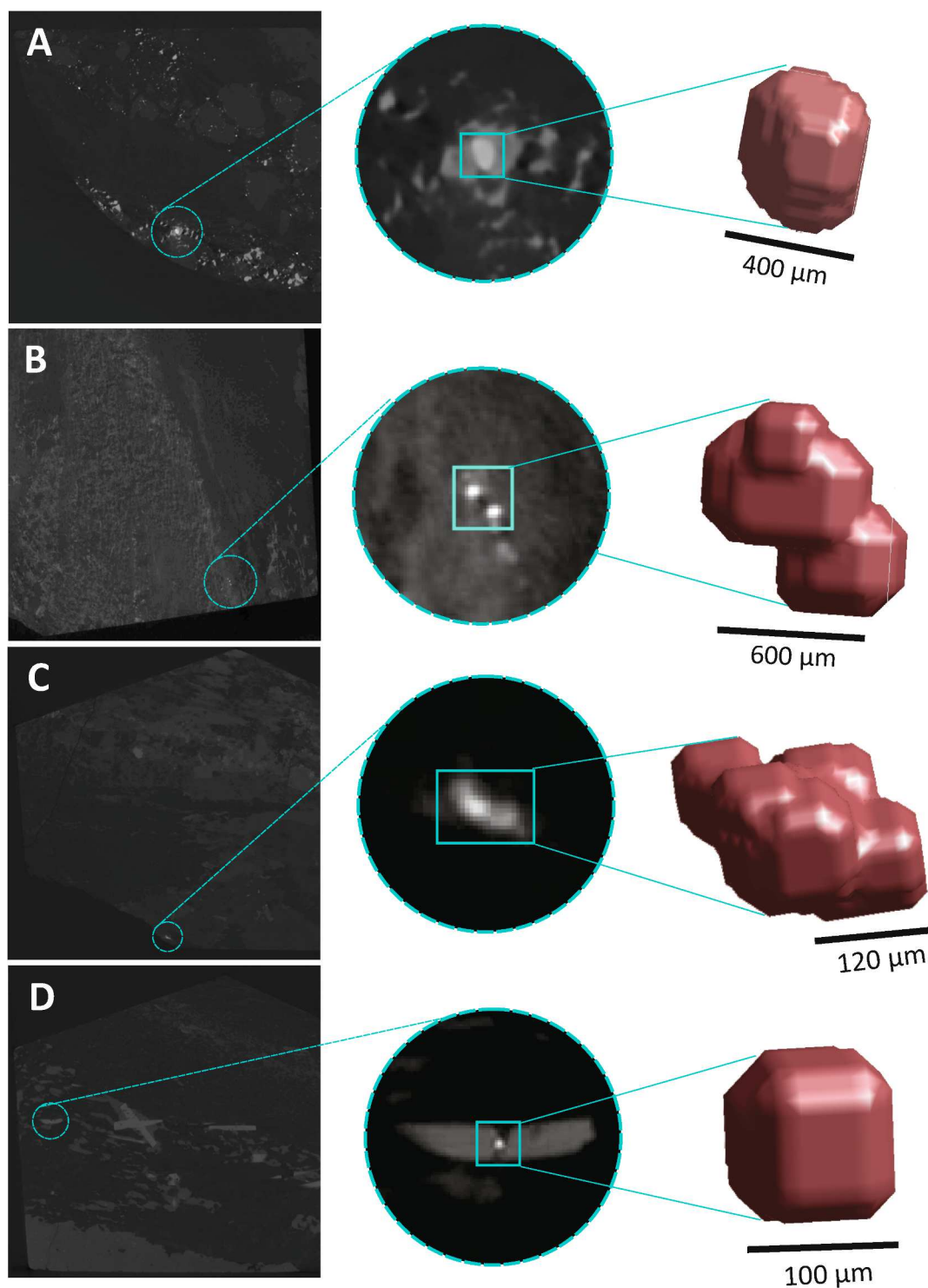
Once the selected region during segmentation is expanded, and is larger than the actual particle, the number of voxels ( $N_f$ ) truly encompassed by the gold particle must be calculated based on the corrected volume and the voxel volume:

$$N_f = \frac{v_{PVB}}{v_{voxel}}$$

An isosurface is fitted to the  $N_f$  voxels with the highest CT numbers and then used to calculate a best-fit ellipsoid, sphericity and caliper parameters. Sphericity is calculated as the ratio of the surface area of the equivalent-volume sphere to that of the isosurface surrounding the  $N_f$  voxels. The caliper dimensions are defined by the minimum bounding box that fits the particle:  $BoxC$ ,  $BoxB$  and  $BoxA$  are the respective dimensions of the shortest caliper length, the shortest caliper length orthogonal to it and then the caliper length orthogonal to the first two (Blott and Pye, 2008).

Quantifying the PSF of the CT data also allows us to define when shape measurements are in danger of being affected by resolution limitations. Ketcham and Mote (2019) advise that shape determinations are reliable if both  $BoxC$  and the difference between  $BoxB$  and  $BoxC$  both exceed  $r_{PSF}$ . Points that do not pass these criteria are plotted in gray in the diagrams below.





**Fig. 8.** Examples of grayscale HRXCT slices showing the segmented and extracted gold particle. A) VQZ1: Gold particle enclosed in galena; B) FGS-1A: Gold enclosed in pyrite or pyrrhotite; C) FGS-1B: free gold particle; D) FGS-1B: Gold filling arsenopyrite fracture.

#### 4.5.5. Structural measurements

Extracting structural data from a CT dataset require that the scanned sample is oriented in space. Before scanning, a physical marker was attached to the surface of sample FGS-1A at the same orientation of the intersection lineation  $L_1$  (106/25) measured on site. The lineation direction is faithfully recovered, but there is an unknown rotation around that vector because the orientation was not preserved during sampling. During data processing we defined a coordinate system using the Blob3D “Extract” tool that captures the lineation direction, but suffers from the

unknown rotation around this vector, to determine if gold particles are oriented along a preferential direction. Each segmented particle is fitted to an ellipsoid, and the three axes are rotated into the defined coordinate system.

As with shape measurements, the reliability of orientation determinations can be impacted by resolution effects. [Ketcham and Mote \(2019\)](#) found that maximum and/or minimum axis orientations are optimally repeatable when their respective lengths differ from the intermediate axis length by a factor of  $\sim 2$ ; the closer these axes are to the

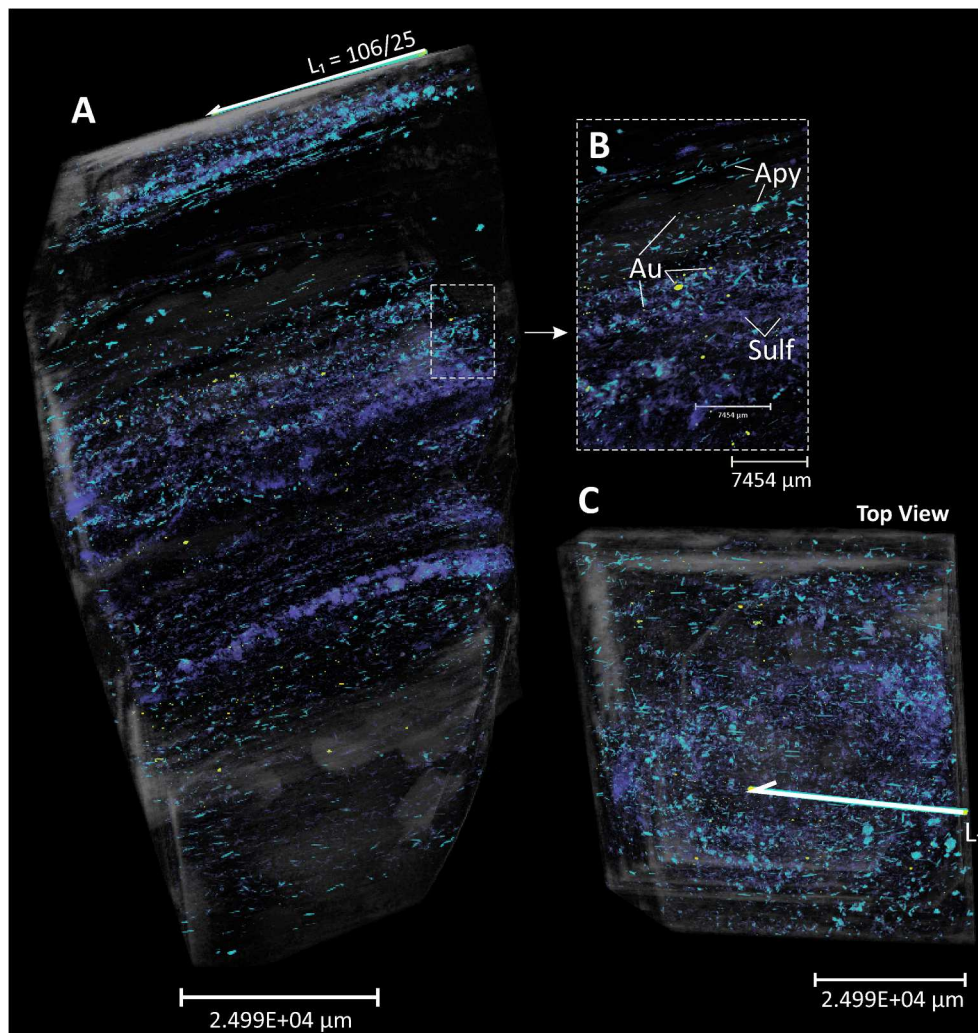


Fig. 9. 3-D volume rendering of sample FGS-1A. Sulfide minerals assigned in purple; arsenopyrite in blue; matrix transparent; gold in yellow. A) Side view; B) Close-up of sulfide-associated gold particles; C) Top view. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

intermediate, the more noisy their orientations become. As before, grains that meet this criterion are plotted in color, and those that do not are plotted in gray.

## 5. Results

### 5.1. Gold characterization

The 3-D rendered sections from the vein-hosted ore sample VQZ1 show that gold particles are mainly free in the quartz-carbonate matrix, although many particles are in direct contact with sulfide minerals (Fig. 7; Video 1) and also enclosed in them (e.g. galena, Fig. 8A). Pyrite, chalcopyrite, sphalerite, galena and pyrrhotite are indicated as the same phase due to close linear attenuation coefficients in this X-ray CT study. Sulfide crystals are sub-euhedral to euhedral, slightly oriented, and unevenly distributed throughout the scanned core sample (Fig. 7); galena-rich sections display a higher number of gold particles (Fig. 7C, D, G, H; Video 2).

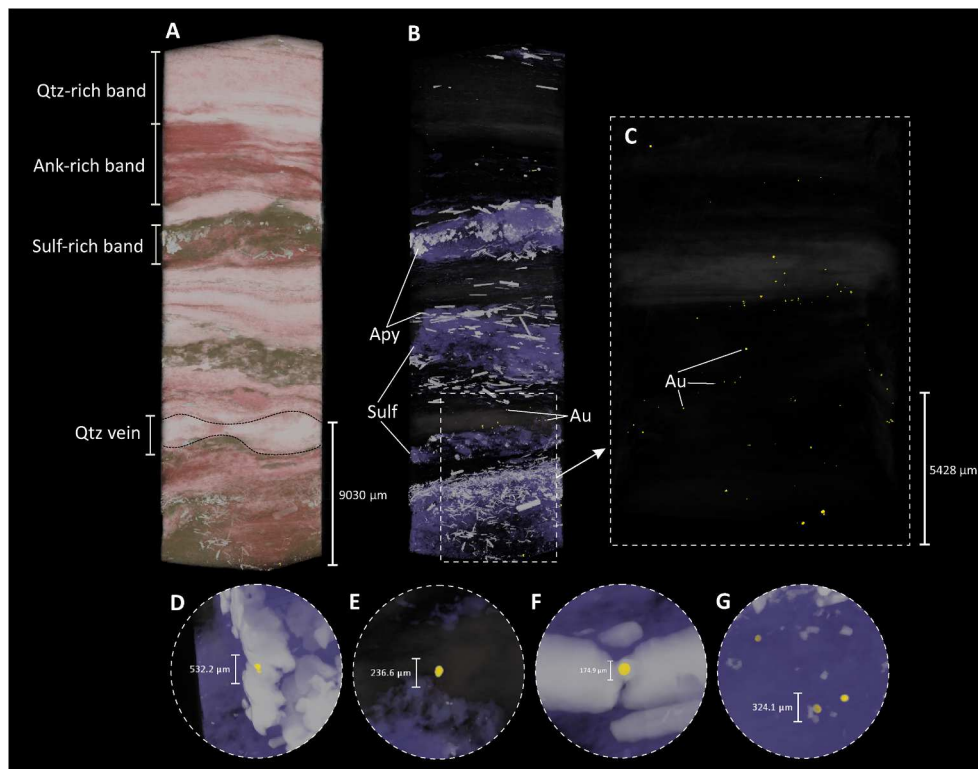
Three-dimensional images from the BIF-hosted ore sample FGS-1 reveal that gold particles form bands (Fig. 9A, C; Video 3) in association with high sulfide zones in iron carbonate-rich bands (Fig. 10A, B; Video 4). Pyrite and pyrrhotite are assigned as the same phase due to scan limitations, but ore petrography revealed that pyrrhotite is the dominant iron sulfide. Gold particles are enclosed in arsenopyrite

(Fig. 10D), filling fine fractures (Fig. 10F, Fig. 8D) or enclosed in massive pyrrhotite or pyrite (Fig. 10G, Fig. 8B), and occur as well free in quartz veins in BIF (Fig. 8C, 10E).

A summary of measurements of gold particles at the Cuiabá deposit regarding size and volume is provided in Table 2; shape statistics are shown in Table 3. Because the segmented gold particles are not large enough to accurately define the end-member CT number for gold ( $CT_{Au}$ ) in the vein-hosted VQZ1 sample, the identified gold particles are smaller than the indicated measurements by a uniform factor.

In the CT data of the VQZ1 core sections, 15,231 gold particles are identified. Particle volumes span from  $8.31E-07$  to  $2.77E-02$  mm<sup>3</sup> and the long axes of measured particles range from 56 μm to 1.4 mm, with most from 50 to 150 μm (Fig. 11A). Short axes range from 37 to 418 μm, with most between less than 50 to 100 μm long (Fig. 11B). However, as the minimum size that can be detected and its shape accurately quantified is a function of the CT resolution, the smaller measured axes may not represent the dimension of the finest particles.

The CT data point-spread function ( $r_{PSF}$ ), which defines true resolution, has a size of respectively 100 and 105 μm for scans VQZ1 A and VQZ1 B. Thus, particles with dimensions approaching this limit have axis and shape measurements affected by blurring. The criterion used in the present study indicates particles for which shape measurements are most accurate where the short axis, or the difference between the intermediate and the short axis, is larger than the absolute  $r_{PSF}$  value;



**Fig. 10.** 3-D volume rendering of sample FGS-1B. A) Banded iron formation rendering. B) Sulfide minerals assigned in purple; arsenopyrite in gray; matrix transparent; gold in yellow. C) Sulfide minerals and matrix transparent; gold in yellow. D) Gold enclosed in arsenopyrite. E) Free gold. F) Gold filling arsenopyrite fracture. G) Gold enclosed in sulfides. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

particles not meeting these criteria appear more equidimensional than they really are.

The data are plotted on Blott and Pye (2008) diagrams, utilized to classify particle shapes. Gold particles above the  $r_{PSF}$  limit are dominantly sub-equant to prolate spheroid, and the minority is roller or oblate spheroid, whereas particles below this limit appear to be more sub-equant to equant spheroid (Fig. 12A, B, C, D). Sphericity parameters support shape results, in which equant particles approach 1.0 and particles with distinct axes length deviate from 1.0 (Table 2).

A total of 663 gold particles have been measured in the FGS – 1A, and 124 in subsample FGS – 1B (BIF). In FGS – 1A, gold volumes range from 1.46E to 04 to 2.98E-02 mm<sup>3</sup>. Long axes range from 71 μm to 1.298 mm and short axes from 46 to 328 μm; most particles have long axes ranging from 100 to 150 μm (Fig. 11C) and short axes between 75 and 125 μm (Fig. 11D). The CT data point-spread function,  $r_{PSF}$ , is 243 μm for scan FGS – 1A, revealing that most particles are below the  $r_{PSF}$  limit and are mainly sub-equant to equant spheroids, though some particles have prolate and roller shapes (Fig. 12E).

The FGS – 1B sample data show particle volumes ranging from 4.35E to 06 and 3.21E-04 mm<sup>3</sup>. Long axes span from 23 to 268 μm, and of these most are dominantly from 50 to 150 μm (Fig. 11C); the short axis ranges from 18 to 79 μm, mainly between 18 and 50 μm (Fig. 11D). Gold particles are mainly below the  $r_{PSF}$  limit, revealing a dominant equant to sub-equant shape except a few prolate-spheroid- and roller-shaped particles (Fig. 12F). The differences in size and volume distributions between samples FGS-1A and –1B are expected, because the FGS-1B data were obtained at higher resolution and thus able to reveal finer particles.

## 5.2. Structural analysis

Results from the BIF sample FGS-1A show that acicular arsenopyrite are highly aligned with the indicated mineral and intersection lineation

L1 and are strongly associated with gold-rich portions (Fig. 9B; Video 4).

The bubble charts of long (Fig. 13A) and short axis orientation (Fig. 13B), with bubble sizes regarding particle volumes on equal-angle upper hemisphere projections, reveal that larger particles display consistent clustering, whereas finer particles are dispersed. Considering the resolution of the scans and associated PVB effect, finer particles tend to appear equant to sub-equant and the resulting orientation data are much noisier.

Major and minor axis distributions were further analyzed on equal-area lower hemisphere projections (OpenStereo, 2010). As mentioned previously, long axis orientations are more reliable if they are twice as long as the intermediate axis, and short axis orientations are more reliable if they are half the intermediate axis length. This criterion is met in the FGS-1A scan for the long axis of 28 particles and for the short axis of 1 particle out of a total of 663 segmented particles, indicating that the measurements are mostly noisy in this dataset, but still able to form a recognizable pattern that can be linked to the regional structure.

Considering all particles, the long axis orientations establish a uniaxial girdle (Fig. 14A). The obtained measurements are not fully oriented according to true geological coordinates, but this preferential alignment indicates that grains are indeed oriented along a plane that contains the intersection lineation L1. A slight concentration observed from contours in the northwest sector is likely a result of several small particles with the exact same orientation overlapped, reflecting the tendency of these particles to be along the orthogonal voxel grid in the scans. Thus, they do not show a true orientation with regards to the sample. The overall fabric is planar, as defined by the great circle, despite the particles being more elongated than flattened. The short axis orientations display a maximum density at the pole of the long axis girdle and scattered points, again justified by the noisy orientations of particles whose short axes are not strongly different from their intermediate ones (Fig. 14B).



**Table 2**  
Gold particles measurements from the Cuiabá deposit samples.

Sample	Measured gold particles		Long Axis Length (μm)	Short Axis Length (μm)	Volume (mm <sup>3</sup> )	Sphericity
VQZ A – 1a	1271	Min	65	47	1.20E-04	0.4590
		Max	1077	368	2.06E-02	0.9732
		Mean	157	82	7.72E-04	0.8900
		Median	115	71	3.35E-04	0.9321
		SD	117	34	1.43E-03	0.0946
VQZ A – 1b	7470	Min	56	37	8.31E-07	0.4874
		Max	1191	285	1.74E-02	0.9747
		Mean	135	78	6.12E-04	0.9115
		Median	112	72	3.41E-04	0.9379
		SD	76	27	8.79E-04	0.0704
VQZ B – 1a	1445	Min	64	49	1.06E-04	0.4753
		Max	1400	598	1.74E-02	0.9712
		Mean	141	95	5.54E-04	0.8960
		Median	108	82	2.94E-04	0.9316
		SD	96	44	9.23E-04	0.0837
VQZ B – 1b	5045	Min	63	42	8.47E-05	0.4641
		Max	1135	418	2.77E-02	0.9774
		Mean	146	80	9.36E-04	0.9042
		Median	116	73	3.72E-04	0.9340
		SD	94	29	1.41E-02	0.0749
FGS – 1A	663	Min	71	46	1.46E-04	0.5601
		Max	1298	328	2.98E-02	0.9699
		Mean	142	93	8.57E-04	0.8910
		Median	118	82	4.58E-04	0.9116
		SD	99	25	1.98E-03	0.0641
FGS – 1B	124	Min	23	18	4.35E-06	0.7500
		Max	268	79	3.21E-04	0.9445
		Mean	47	30	3.00E-05	0.9220
		Median	38	27	1.38E-05	0.9314
		SD	32	11	4.31E-05	0.0312

## 6. Discussion

### 6.1. Gold characterization and metallurgical implications

Most of the gold in Cuiabá historically has been recovered by leaching after sulfide oxidation (Vitorino, 2017). The particle size distribution is a critical factor in leaching operations, which determines ultimate recovery and must be established based on the extent of mineral exposure and transport phenomena. As the major ore type in the

Cuiabá deposit is dominated by gold-bearing sulfide minerals hosted in BIF, exploiting vein-hosted occurrences such as the Veio de Quartzo (VQZ) orebody requires optimizations on ore recovery.

In the case of the mafic-hosted, vein-style ore sample, gold particles are mainly free in the quartz-carbonate matrix, though many particles are in direct contact or enclosed within diverse sulfide minerals, e. g. pyrite, chalcopyrite, sphalerite, galena and pyrrhotite. Vitorino (2017) suggested that although gold is mostly liberated during crushing of these vein-hosted ores, gold recovery would not be efficient using only gravimetric concentration because of the presence of small particles. On the other hand, the BIF-hosted ore sample FGS-1 reveals that gold is preferentially included in pyrrhotite, arsenopyrite and minor pyrite and/or filling fine fractures in these sulfide minerals in stratabound replacement of iron carbonate layers. This relationship, along with the diversity of sulfides (e. g. galena, sphalerite) identified in the vein-hosted ore, shows that different ore types require different processing protocols to optimize gold recovery.

Because the data resolution is different for both samples under evaluation, it is not possible to compare mineralization styles regarding minimum gold size, volumes and size distributions. The in-situ volumetric information reveals the relationship between the cumulative percentage of grains from the largest (at 0%) to the smallest (at 100%), and the percentage of the total gold grade in both samples (Fig. 15). Approximately 40% of the largest particles account for 80% of the total gold volume of each case, with a minor percentage reflected by the numerous finer-grained particles. Given the exponential distribution of grain sizes, it is likely that there are particles smaller than the minimum size detected. However, as finer particles only account for a minor amount of the total gold volume, undetected particles are unlikely to have a major impact on ore grade (e.g. Kyle et al., 2008). In the finer-resolution scan (FGS-1B, Fig. 15B), the distribution is skewed toward smaller particles representing less volume in comparison to sample FGS-1A. This effect is probably because the higher-resolution scan allowed more finer particles to be detected, increasing their representation but diminishing their volumetric importance, demonstrating the resolution-dependence of these curves.

The HRXCT results from the VQZ1 sample reveal the in-situ particle size distribution and 3-D mineral associations with various sulfide minerals, and thus represent supplementary information to geo-metallurgical processing. It has been shown that 3-D mineral liberation analysis based on X-ray Micro Tomography (XMT) is preferred over 2-D section analysis, which overestimates the extent of liberation (Miller et al., 2009). Additional HRXCT data processing and other studies are required to better assess gold liberation.

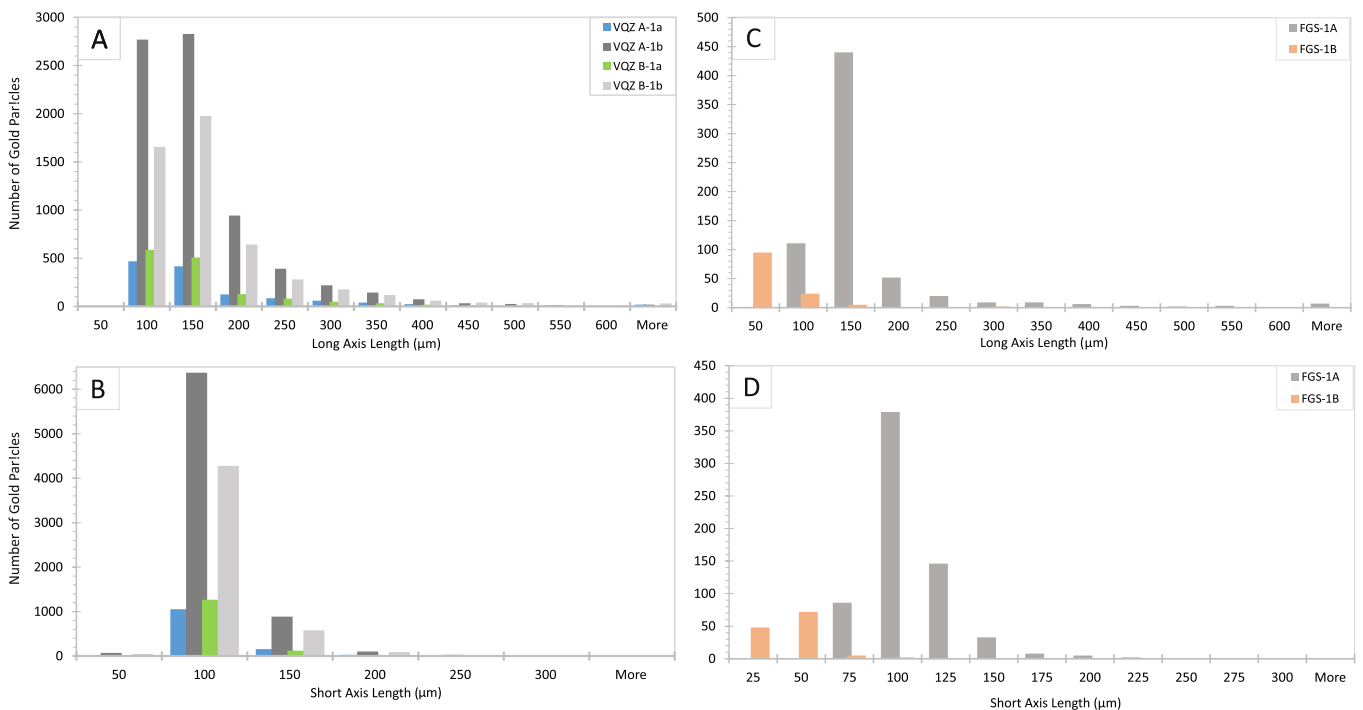
### 6.2. Structural analysis and implications to gold exploration

Gold in the vein-hosted, VQZ orebody sample occurs in shapes in which one shape factor (elongation or flatness) is larger than the other, as bladed, roller, oblate- and prolate-spheroid particles may be a result of preferential grain growth influenced by local strain. Although the identified particles in this sample are not geologically oriented, the dominant anisometric particles may be evidence of shearing of the fault-fill V1 vein system in the VQZ orebody. These veins are interpreted to have been emplaced during D1 shearing, considered as the main pathway for the gold-mineralizing hydrothermal fluids at Cuiabá by Vitorino et al. (2020).

The BIF-hosted FGS-1 sample reveals gold particles to be mainly associated with arsenopyrite and pyrrhotite and minor pyrite. Gold particles are located at arsenopyrite margins and filling its fractures (Fig. 10F). Some authors (e.g., Morey et al., 2008; Cook et al., 2013) suggest that during deformation gold incorporated within the structure of sulfide minerals may be remobilized and occupy such sites rather than being supplied at this time. These observations are consistent with those of Sayab et al. (2016), who also observed evidence in arsenopyrite for cycles of gold remobilization through 3-D data from HRXCT. The

**Table 3**  
Gold shape statistics from the Cuiabá deposit samples concerning  $r_{PSF}$  bigger than the particles' short axis.

Sample	Bladed	Discoid	Very oblate spheroid	Oblate spheroid	Sub-equant spheroid	Equant Spheroid	Prolate spheroid	Roller	Total of gold grains
VQZ A – 1a	> 16 $r_{PSF}$ 4.4%	0 0.0%	5 1.4%	29 8.0%	148 40.9%	51 14.1%	82 22.7%	31 8.6%	362
	< 10 $r_{PSF}$ 1.1%	0 0.0%	0 0.0%	17 1.9%	424 46.6%	335 36.9%	106 11.7%	17 1.9%	909
VQZ A – 1b	> 24 $r_{PSF}$ 1.3%	0 0.0%	3 0.2%	83 4.4%	1056 56.0%	482 25.6%	186 9.9%	52 2.8%	1886
	< 29 $r_{PSF}$ 0.6%	0 0.0%	3 0.1%	102 2.0%	2577 49.7%	2131 41.1%	44 5.8%	44 0.8%	5188
VQZ B – 1a	> 11 $r_{PSF}$ 7.3%	0 0.0%	3 2.0%	10 6.7%	53 35.3%	12 8.0%	46 30.7%	15 10.0%	150
	< 12 $r_{PSF}$ 0.9%	0 0.0%	3 0.2%	25 1.9%	630 48.6%	430 33.2%	157 12.1%	38 2.9%	1295
VQZ B – 1b	> 28 $r_{PSF}$ 3.9%	0 0.0%	5 0.7%	39 5.4%	326 45.3%	96 13.3%	192 26.7%	34 4.7%	720
	< 26 $r_{PSF}$ 0.6%	0 0.0%	2 0.0%	118 2.7%	2226 51.5%	1417 32.8%	457 10.6%	79 1.8%	4325
FGS – 1A	> 1 $r_{PSF}$ 33.3%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	1 33.3%	1 33.3%	0 0.0%	0 0.0%	3
	< 3 $r_{PSF}$ 0.5%	0 0.0%	0 0.0%	1 0.2%	277 42.0%	343 52.0%	20 3.0%	17 2.6%	661
FGS – 1B	> 0 $r_{PSF}$ 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	1 0.8%	1 0.8%	0 0.0%	0 0.0%	2
	< 0 $r_{PSF}$ 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	1 0.8%	38 30.6%	67 54.0%	11 8.9%	5 4.0%	122



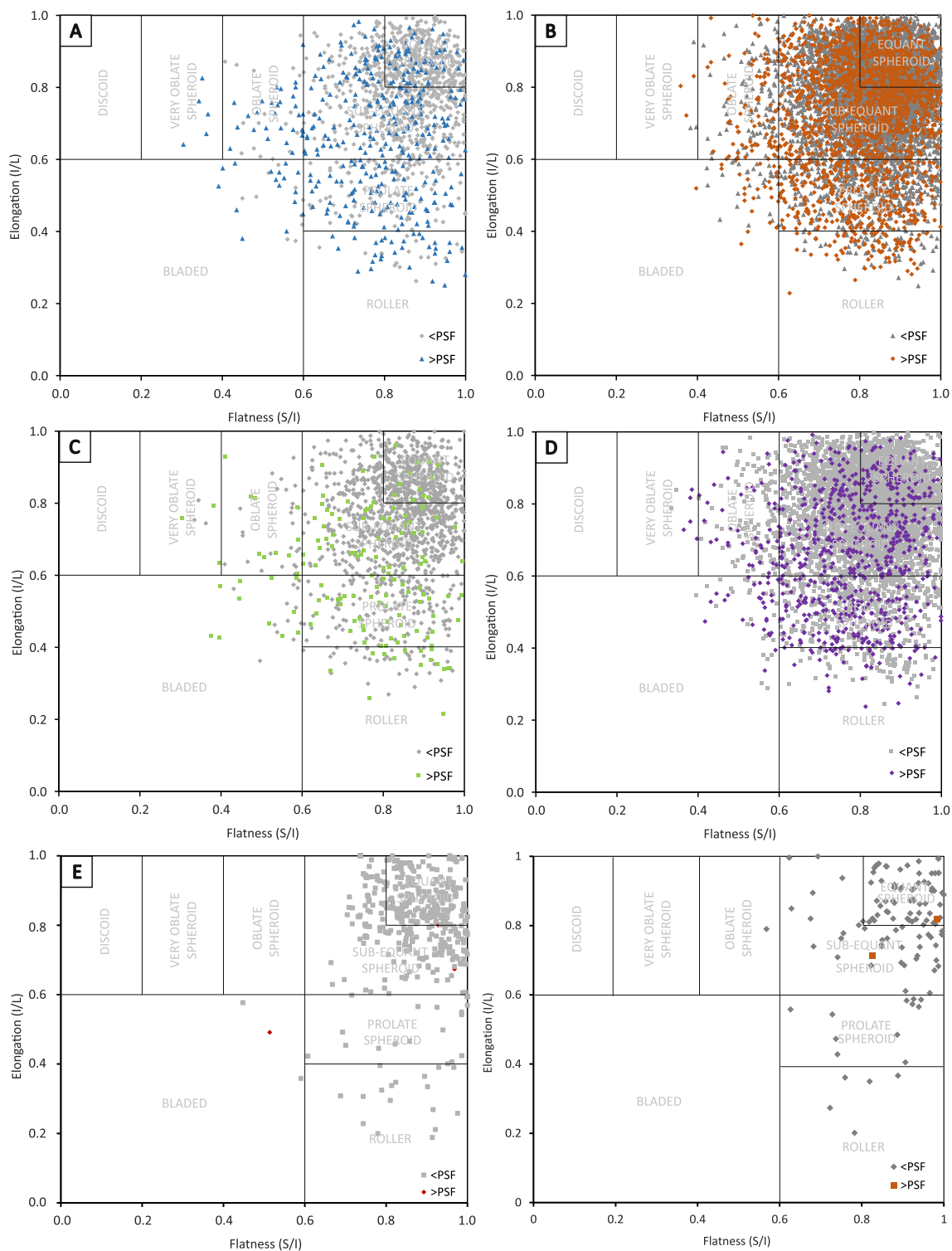
**Fig. 11.** Vein-hosted gold distribution of A) Long axis length, B) Short axis length, C) Volume; and BIF-hosted gold distribution of D) Long axis length, E) Short axis length, F) Volume.

preferred alignment of arsenopyrite, concordant to  $L_1$  (Fig. 9), could suggest its formation during D1 following structural criteria established by Vitorino et al. (2020).

The in-situ measurements of gold particles within the BIF-ore sample also indicate a preferential distribution of major and minor axis orientations. The major axis girdle (Fig. 14A) may indicate that gold particles are located on a foliation plane that also contains  $L_1$ , so a careful evaluation of structural orientations should be performed in a high-resolution scan of an oriented sample in order to better relate gold features to the structural controls at the Cuiabá deposit.

It is interesting to note that although gold is crystallized in the isometric system and its deformation takes place by dislocation, i. e. sliding of crystal planes over each other through movement along lattice defects (Hough et al., 2009), these results demonstrate that deformations D1 and D2 (Vitorino et al. 2020) may have a direct influence over the SE-trending gold particles.

Further studies on pyrrhotite-dominated ores are of great importance to provide additional evidence, as well as studies on gold remobilization mechanisms. These results provide valuable information on gold continuity and structural controls for mine-site exploration.



**Fig. 12.** Bivariate diagram (after Blott and Pye, 2008) for segmented gold particles regarding the particles with short axis below (gray) or above (colored) the  $r_{PSF}$  parameter resolution cutoff for reliable shape determination; see text for further explanation. Shape classification uses the combination of long (L), intermediate (I), and short (S) axial dimensions, with axes for particle elongation (I/L) and flatness (S/I). Particles may be bladed, discoid, roller, very prolate spheroid, prolate spheroid, oblate spheroid, sub-equant spheroid or equant spheroid. A) VQZ1 A-1a; B) VQZ1 A-1b; C) VQZ1 B-1a; D) VQZ1 B-1b; E) FGS-1A; F) FGS-1B.

### 7. Conclusions

High-resolution X-ray computed tomography and PVB analysis provides unique three-dimensional data to characterize the in-situ nature of gold particles and associated minerals, revealing particle sizes, volumes, shapes, orientations, and textural relationships. In this paper, we have

discussed the metallurgical and exploration implications of this information at the world-class Archean Cuiabá orogenic gold deposit of the Quadrilátero Ferrífero province, comparing the differences between BIF-hosted and vein-hosted gold ores. The major findings can be summarized as:

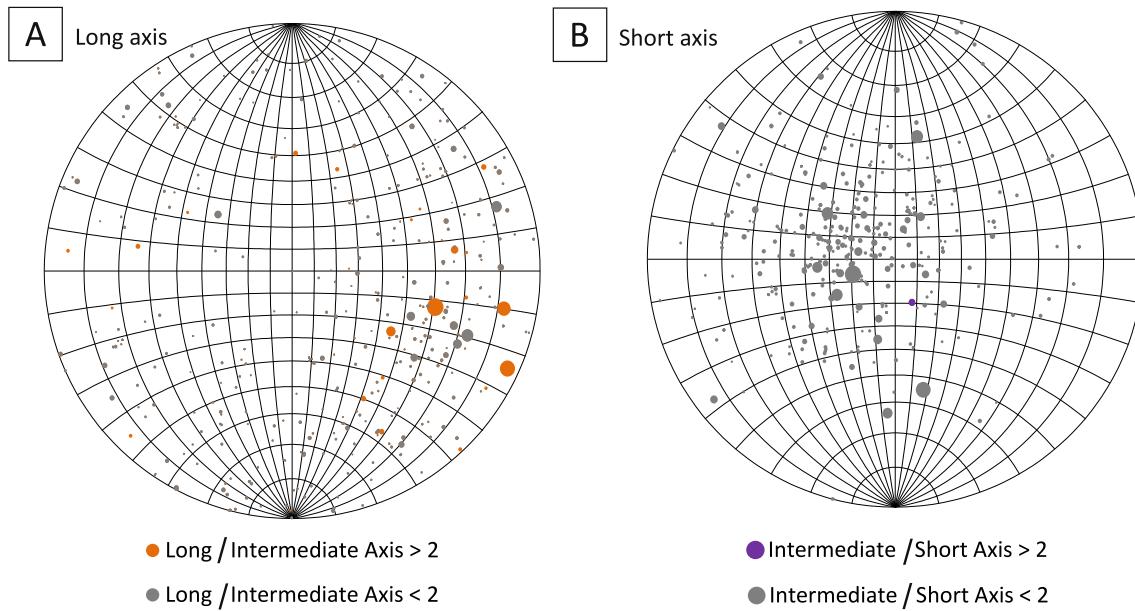


Fig. 13. Bubble charts on equal-angle lower hemisphere projections of long (A) and short axis orientations (B) in sample FGS-1A, with colors according to criteria for reliable (colored) or unreliable (gray) orientation determination and bubble sizes scaled according to gold particle volumes. Coarse particles display consistent clustering, whereas finer particles are dispersed.

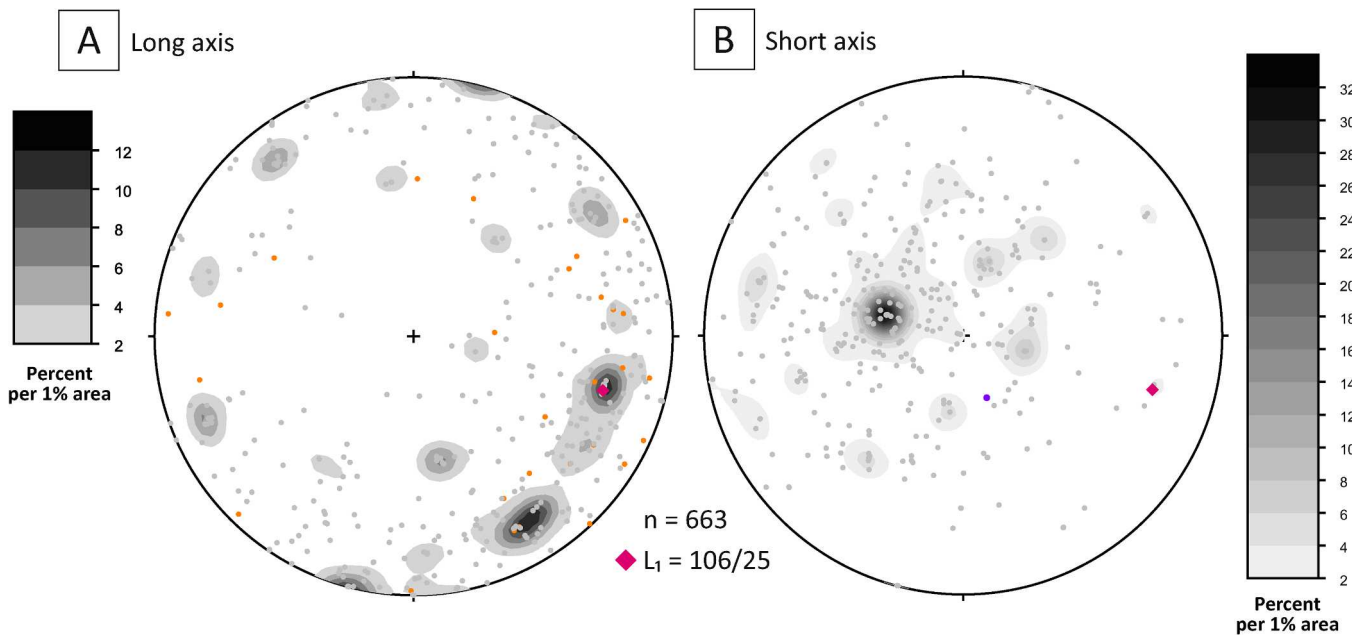


Fig. 14. Equal-area lower hemisphere projections of (A) long axis orientations, (B) short axis orientations in sample FGS-1A with colors according to criteria for reliable (colored) or unreliable (gray) orientation determination. Contours calculated through 1% Area method. Orientations do not correspond to true geological coordinates. The intersection lineation  $L_1$  (106/25) is marked as a red diamond. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

- i. *Gold occurrence*: Gold particles in the mafic-hosted, vein-style ore, are mainly free in the quartz-carbonate matrix, although many particles are in direct contact or enclosed in diverse sulfide minerals, whereas the BIF-hosted ore reveals that gold is preferentially included in pyrrhotite, arsenopyrite and minor pyrite and/or filling fine fractures in these sulfide minerals.
- ii. *Gold particle shape, size, and distribution*: For both mineralization styles, finer gold particles appear to be more equant due to blurring effects. In addition, for both samples the largest particles

- account for the greatest amount of gold volume, so that finer particles are likely to have a minor impact on ore grade.
- iii. *Vein-hosted (VQZ1) particle shape*: The dominant anisometric gold particles in VQZ1, vein-style ore, may be a result of preferential grain growth influenced by local strain. Although the sample is not geologically oriented, the dominant anisometry may be evidence of shearing of the fault-fill V1 vein system in the VQZ orebody.
- iv. *BIF-hosted (FGS-1) mineral orientations*: The preferred alignment of arsenopyrite in the FGS-1, BIF-hosted ore, is concordant to the

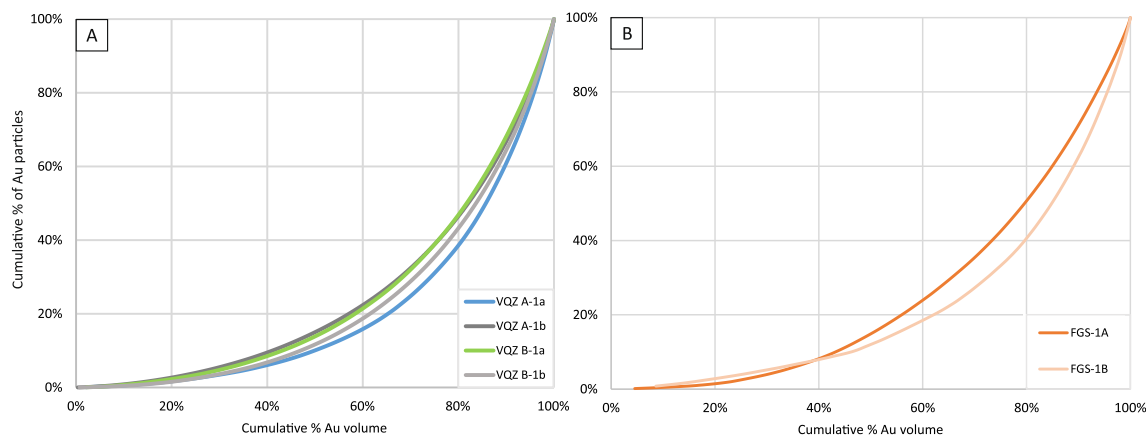


Fig. 15. Cumulative percentage of gold particles from the largest (at 0%) to the smallest (at 100%) contributing to the cumulative gold concentration on samples (A) VQZ1 A-1a, VQZ1 A-1b, VQZ1 B-1a, VQZ1 B-1b, and (B) FGS-1A and FGS-1B.

intersection and mineral lineation  $L_1$  and must be related to D1 or D2 tectonic foliation planes. The location of gold in arsenopyrite fractures may be evidence that gold has been exsolved from the crystal structure and remobilized along secondary crystal fractures. Also, gold particles' long axis orientations indicate that the particles are oriented along a plane that contains the intersection lineation  $L_1$ .

#### Declaration of Competing Interest

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

#### Acknowledgments

This study was made possible by the Minas Mundi program, an exchange partnership of the Federal University of Minas Gerais with The University of Texas at Austin that allowed the first author to take part of her undergraduate studies at the latter. We are grateful for the support by AngloGold Ashanti Brazil (AGA) in providing samples, and all other research expenditures and support, especially R.F. Cota, J.H.C. Canela and P.D. Barroso, along with the former AGA's geologists A.L. Vitorino and F.L.S.P. Villanova. Thanks to G.A. Silveira for the discussions on structural geology. Our thanks are also due to The University of Texas at Austin HRXCT Facility (UTCT), especially M. Colbert, and to the Geosciences Institute at the Federal University of Minas Gerais. UTCT is supported by National Science Foundation grant EAR-1762458 to R.A.K; L.M.L. is a recipient of a research grant by the Conselho Nacional de Pesquisa Científica e Tecnológica-CNPq, Brazil.

#### Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104584>.

#### References

- Akin, S., Kovscek, A.R., 2003, Computed tomography in petroleum engineering research: Geological Society London, Special Publication, v. 215, p. 23–38.
- Almeida, F.F.M., 1967. Evolução tectônica do centro-oeste brasileiro no Proterozoico Superior. *Annaes Academia Brasileira de Geociências* 7, 349–364.
- Babinski, M., Chemale Jr., F., Van Schmus, W.R., 1995, The Pb/Pb age of the Minas Supergroup carbonate rocks, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: *Precambrian Research*, v. 72, p. 235–245.
- Baltazar, O.F., Lobato, L.M., 2020, Structural evolution of the Rio das Velhas Greenstone Belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: Influence of Proterozoic orogenies on its Western Archean Gold Deposits: *Minerals*, 10, v. 983, p. 1–38.

- 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 Geol. Rev.* 32 (3–4), 471–499.
- Cabral, A.R., Zeh, A., Koglin, N., Seabra Gomes, A.A., Viana, D.J., Lehmann, B., 2012. Dating the Itabira iron formation, Quadrilátero Ferrífero of Minas Gerais, Brazil, at 2.65 Ga: depositional U-Pb age of zircon from a metavolcanic layer. *Precamb. Res.* 204–205, 40–45.
- Cnudde, V., Boone, M.N., 2013. High-resolution X-ray computed tomography in geosciences: a review of the current technology and applications. *Earth Sci. Rev.* 123, 1–17.
- Cook, N.J., Ciobanu, C.L., Meria, D., Silcock, D., Wade, B., 2013. Arsenopyrite-pyrite association in an orogenic gold ore: Tracing mineralization history from textures and trace elements. *Econ. Geol.* 108 (6), 1273–1283.
- Costa, M., 2000. Estudo de isótopos de carbono e oxigênio e caracterização petrográfica do minério da Mina Cuiabá: Unpublished M. Sc. thesis. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brazil.
- Denison, C., Carlson, W.D., 1997. Three-dimensional quantitative textural analysis of metamorphic rocks using high-resolution computed X-ray tomography: Application to natural samples. *J. Metamorph. Geol.* 15, 45–57.
- Denison, C., Carlson, W.D., Ketcham, R.A., 1997. Three-dimensional quantitative textural analysis of metamorphic rocks using high-resolution computed X-ray tomography. *J. Metamorph. Geol.* 15, 29–44.
- Dhawan, N., Safarzadeh, M.S., Miller, J.D., Moats, M.S., Rajamani, R.K., Lin, C.-L., 2012. Recent advances in the application of X-ray computed tomography in the analysis of heap leaching systems. *Miner. Eng.* 35, 75–86.
- Dorr, J.V.N., 1969, Physiographic, stratigraphic, and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil: U.S. Geological Survey, v. 614 (A), p. 110.
- Endo I., Galbiatti H. F., Delgado C. E. R., Oliveira M. M. F. de, Zapparoli A. de C., Moura L. G. B. de, Peres G. G., Oliveira A. H. de, Zavaglia G., Danderfer F. A., Gomes C. J. S., Carneiro M. A., Nalini Jr. H. A., Castro P. de T. A., Suita M. T. de F., Seixas L. A. R., Tazava E., Lana C. de C., Martins-Neto M. A., Martins M. de S., Ferreira F. F. A., Franco A. P., Almeida L. G., Rossi D. Q., Angeli G., Madeira T. J. A., Piassa L. R. A., Mariano D. F., Carlos D. U., 2019a, Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil, Escala 1:150.000: Ouro Preto, Departamento de Geologia, Escola de Minas – UFOP – Centro de Estudos Avançados do Quadrilátero Ferrífero.
- Endo I., Delgado C. E. R. Oliveira M. M. F. de, Zapparoli A. de C., Carlos D. U., Galbiatti H. F., Castro P. de T. A., Suita M. T. de F., Barbosa M. S. C., Lana C. E., Moura L. G. B. de., 2019b, Estratigrafia e Arcabouço Estrutural do Quadrilátero Ferrífero: Nota Explicativa do Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil, Escala 1:150.000: Ouro Preto, Departamento de Geologia da Escola de Minas – UFOP – Centro de Estudos Avançados do Quadrilátero Ferrífero.
- Farina, F., Albert, C., Lana, C., 2015. The Neoproterozoic transition between medium- and high-K granitoids: clues from the Southern São Francisco Craton (Brazil). *Precamb. Res.* 266, 375–394.
- Fernandes, R.C., Endo, I., Pereira, R.M.P., Rivarola, I., Souza, J.C., 2016, Geologia e Evolução Estrutural do Depósito Aurífero Cuiabá: Novas Perspectivas para a Exploração Mineral, Seção Pôster: VII Simpósio Brasileiro de Exploração Mineral, SIMEXMIN, Ouro Preto, Brazil.
- Godel, B., 2013. High-resolution X-ray computed tomography and its application to ore deposits: from data acquisition to quantitative three-dimensional measurements with case studies from Ni–Cu–PGE deposits. *Econ. Geol.* 108 (8), 2005–2019.
- Godel, B., Barnes, S.-J., Maier, W.D., 2006, 3D distribution of sulphide minerals in the Merensky reef (Bushveld Complex, South Africa) and the J-M reef (Stillwater Complex, USA) and their relationship to microstructures using X-Ray computed tomography: *Journal of Petrology*, v. 47, p. 1853–1872.
- Godel, B., Barnes, S.J., Austin, P., Güler, D.M., Fiorentini, M.L., 2013. Chromite in komatiites: 3D morphologies and sizes with implications for crystallization mechanisms: Contribution to. *Mineral. Petrol.* 165, 173–189.
- Godel, B., Barnes, S.J., Barnes, S.-J., Maier, W.D., 2010. Platinum ore in 3D: Insights from high-resolution X-ray computed tomography. *Geology* 38, 1127–1130.



- Goldfarb, R.J., Groves, D.I., 2015. Orogenic gold: common or evolving fluid and metal sources through time. *Lithos* 233, 2–26.
- 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 (1–5), 7–27.
- Hanna, R.D., Ketcham, R.A., 2017. X-ray computed tomography of planetary materials: a primer and review of recent studies. *Chemie der Erde Geochemistry* 77 (4), 547–572.
- Herz, N., 1970. Gneissic and igneous rocks of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil: United States Geological Survey Professional Paper, v. 641-B, 58p.
- Hezel, D.C., Elangovan, P., Viehmann, S., Howard, L., Abel, R.L., Armstrong, R., 2013. Visualization and quantification of CV chondrite petrography using micro-tomography. *Geochim. Cosmochim. Acta* 116, 33–40.
- Hough, R.M., Butt, C.R.M., Fischer-Bühner, J., 2009. The crystallography, metallography and composition of gold. *Elements* 5 (5), 297–302.
- Huddleston-Holmes, C.R., Ketcham, R.A., 2010. An X-ray computed tomography study of inclusion trail orientation in multiple porphyroblasts from a single sample. *Tectonophysics* 480, 305–320.
- Jerram, D.A., Davis, G.R., Mock, A., Charrier, A., Marsh, B.D., 2010. Quantifying 3D crystal populations, packing and layering in shallow intrusions: a case study from the basement sill, Dry Valleys, Antarctica. *Geosphere*, v. 6, p. 537–548.
- Jerram, D.A., Mock, A., Davis, G.R., Field, M., Brown, R.J., 2009. 3D crystal size distributions: a case study on quantifying olivine populations in kimberlites. *Lithos* 112, 223–235.
- Ketcham, R.A., 2005. Computational methods for quantitative analysis of three-dimensional features in geological specimens. *Geosphere* 1 (1), 32–41.
- Ketcham, R.A., Carlson, W.D., 2001. Acquisition, optimization and interpretation of X-ray computed tomographic imagery: applications to the geosciences. *Comput. Geosci.* 27 (4), 381–400.
- Ketcham, R.A., Hildebrandt, J., 2014. Characterizing, measuring, and utilizing the resolution of CT imagery for improved quantification of fine-scale features. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* 324, 80–87.
- Ketcham, R.A., Mote, A.S., 2019. Accurate measurement of small features in X-ray CT data volumes, demonstrated using gold grains: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 124 (4), 3508–3529.
- Kresse, C., Lobato, L.M., Hagemann, S.G., Figueiredo e Silva, R.C., 2018. Sulfur isotope and metal variations in sulfides in the BIF-hosted orogenic Cuiabá gold deposit, Brazil: implications for the hydrothermal fluid evolution. *Ore Geol. Rev.* 98, 1–27.
- Kresse, C., Lobato, L.M., Figueiredo e Silva, R.C., Hagemann, S.G., Banks, D., Vitorino, A.L.A., 2020. Fluid signature of the shear zone-controlled Veio de Quartzo ore body in the world-class BIF-hosted Cuiabá gold deposit, Archaean Rio das Velhas greenstone belt, Brazil: a fluid inclusion study. *Mineralium Deposita* 55 (7), 1441–1466.
- Kyle, J.R., Ketcham, R.A., 2003. In-situ distribution of gold in ores using high resolution X-ray computed tomography. *Economic Geology*, v. 98, p. 1697–1701.
- Kyle, J.R., Ketcham, R.A., 2015. Application of high resolution X-ray computed tomography to mineral deposit origin, evaluation, and processing. *Ore Geol. Rev.* 65, 821–839.
- Kyle, J.R., Mote, A.S., Ketcham, R.A., 2008. High resolution X-ray computed tomography studies of Grasberg porphyry Cu–Au ores. *Miner. Deposita* 43, 519–532.
- Lana, C., Alkmin, F.F., Armstrong, R., Scholz, R., Romano, R., Nalini Jr., H.A., 2013. The ancestry and magmatic evolution of Archaean TTG rocks of the Quadrilátero Ferrífero province, southeast Brazil. *Precamb. Res.* 231, 157–173.
- Le Roux, S.G., Plessis, A.D., Rozendaal, A., 2015. The quantitative analysis of tungsten ore using X-ray micro CT: Case study. *Comput. Geosci.* 85, 75–80.
- Liu, P.-P., Zhou, M.-F., Chen, W.T., Boone, M., Cnudde, V., 2014. Using multiphase solid inclusions to constrain the origin of the Baima Fe–Ti–(V) oxide deposit, SW China. *J. Petrol.*, v. 55, p. 951–976.
- 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 Archaean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero. *Mineralium Deposita*, v. 36, p. 249–277.
- Lobato, L.M., Ribeiro Rodrigues, L.C., Zucchetti, M., Noce, C.M., Baltazar, O.F., da Silva, L., Pinto, C., 2001b. Brazil's premier gold province, part I: the tectonic, magmatic, and structural setting of the Archaean Rio das Velhas greenstone belt. *Quadrilátero Ferrífero: Mineralium Deposita* 36 (3–4), 228–248.
- 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 Geol. Rev.* 32 (3–4), 674–680.
- Lobato, L.M., Vieira, F.W.R., 1998. Styles of hydrothermal alteration and gold mineralization associated with the Nova Lima Group, Quadrilátero Ferrífero: Part II, the Archaean mesothermal gold-bearing hydrothermal system: Brazilian. *J. Geol.* 28, 355–366.
- Machado, N., Carneiro, M., 1992. U–Pb evidence of late Archaean tectono-thermal activity in the southern São Francisco shield, Brazil. *Can. J. Earth Sci.* 29 (11), 2341–2346.
- 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. In: *Anais do V Simp. Geol. Minas Gerais, Belo Horizonte*, p. 171–174.
- Machado, N., Schrank, A., Noce, C.M., Gauthier, G., 1996. Ages of detrital zircon from Archaean-Paleoproterozoic sequences: Implications for Green-stone Belt setting evolution of a Transamazonian foreland basin in Quadrilátero Ferrífero, southeast Brazil. *Earth Planet. Sci. Lett.* v. 141, 259–276.
- Marshak, S., Alkmin, F.F., 1989. Proterozoic contraction/extension tectonics of the Southern São Francisco Region. *Minas Gerais, Brazil: Tectonics* 8 (3), 555–571.
- Mauk, J.L., Kyle, J.R., Simpson, M.P., Atkinson, P., 2006. Ore mineralogy of the BM37 shoot of the Karangahake deposit, New Zealand: *Proceedings, 39th Annual Conference of the New Zealand Branch of the Australian Institute of Mining and Metallurgy*, p. 233–242.
- Mees, F., Swennen, R., VanGeet, M., Jacobs, P., 2003. Applications of X-ray computed tomography in the geosciences: Geological Society London, Special Publication 215.
- Merinero, R., Ortega, L., Lunar, R., Piña, R., Cárdenas, V., 2019. Framboidal chalcocopyrite and bornite constrain redox conditions during formation of their host rocks in the copper stratabound mineralization of Pichacos, north-central Chile. *Ore Geol. Rev.* 112, 103037. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103037>.
- Miller, J.D., Lin, C.L., Garcia, C., Arias, H., 2003. Ultimate recovery in heap leaching operations as established from mineral exposure analysis by X-ray micro-tomography. *Int. J. Miner. Process.* 72 (1–4), 331–340.
- Miller, J.D., Lin, C.L., Hupka, L., Al-Wakeel, M.I., 2009. Liberation-limited grade/recovery curves from X-ray micro CT analysis of feed material for the evaluation of separation efficiency. *Int. J. Miner. Process.* 93 (1), 48–53.
- Moreira, H., Lana, C., Nalini, H.A., 2016. The detrital zircon record of an Archaean convergent basin in the southern São Francisco Craton, Brazil. *Precamb. Res.* 275, 84–99.
- Morey, A.A., Tomkins, A.G., Bierlein, F.P., Weinberg, R.F., Davidson, G.J., 2008. Bimodal distribution of gold in pyrite and arsenopyrite: Example from the Archaean Boorara and Bardoc shear systems, Yilgarn craton, western Australia. *Econ. Geol.* 103, 599–614.
- Mote, A.S., Kyle, J.R., Ketcham, R.A., Melker, M.D., Jahraus, M.J., Brown, T.R., Wawrzyniec, T.F., 2005. High resolution X-ray computed tomography investigations of high-grade gold ore zones in the Cripple Creek District, Colorado. In: Rhoden, H. N., et al. (Eds.), *Geological Society of Nevada Symposium 2005: Window to the World Symposium*, Reno, Nevada, p. 1169–1175.
- Noce, C.M., Tassinari, C., Lobato, L.M., 2007. Geochronological framework of the Quadrilátero Ferrífero, with emphasis on the age of gold mineralization hosted in Archaean greenstone belts. *Ore Geol. Rev.* 32, 500–510.
- Open Stereo, 2010: <http://igc.usp.br/openstereo/>. Accessed 15 June 2020.
- Phillips, G.N., Groves, D.I., Martyn, J.E., 1984. An epigenetic origin for Archaean banded iron-formation-hosted gold deposits. *Econ. Geol.* 79, 162–171.
- Reyes, F., Lin, Q., Udoudo, O., Dodds, C., Lee, P.D., Neethling, S.J., 2017. Calibrated X-ray micro-tomography for mineral ore quantification. *Miner. Eng.* 110, 122–130.
- Ribeiro Rodrigues, L.C., 1998. Gold in Archaean banded iron formation of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil – The Cuiabá Mine: Unpublished Ph.D. thesis, Aachen University of Technology. Augustinus Verlag, Aachen. *Geowissenschaftliche Beiträge*, Band 27, 264 p.
- Ribeiro Rodrigues, L.C., de Oliveira, C.G., Friedrich, G., 2007. The Archaean BIF-hosted Cuiabá Gold deposit Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Ore Geol. Rev.* 32, 543–570.
- Ribeiro Rodrigues, L.C., Friedrich, G., Oliveira, C.G., Vieira, F.W.R., Callegari, L.A., Biasi, E.E., 1996a. Ore textures and structures of the Archaean banded iron formation Cuiabá gold deposit, Iron Quadrangle, Minas Gerais, Brazil: *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie Teil, v. I*, p. 627–642.
- Sayab, M., Suuronen, J.-P., Aerdens, D., Lahtinen, R., Kallonen, A.K., 2016. High resolution X-ray computed microtomography: A holistic approach to metamorphic fabric analyses. *Geology* 43, 55–58.
- Sena, N. C., 2020. Modelo genético e paleoambiental de formações ferríferas, metacherts e rochas metavulcânicas, depósito Cuiabá, greenstone belt Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil: Unpublished M.Sc. thesis, Belo Horizonte, Brazil, Universidade Federal de Minas Gerais, 125 p.
- Van Geet, M., Swennen, R., Wevers, M., 2000. Quantitative analysis of reservoir rocks by micro focus X-ray computerized tomography. *Sed. Geol.* 132 (1–2), 25–36.
- Vial, D.S., 1980. Mapeamento Geológico do Nível 3 da mina de Cuiabá: Internal Report. *Mineração Morro Velho S. A, Nova Lima, Brazil*.
- Vial, D.S., 1988a. Mina de ouro de Cuiabá, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. In: Schobenhau-Filho, C., Coelho, C.E.S. *Metais básicos não ferrosos, ouro e alumínio: Departamento Nacional da Produção Mineral/Campanha, Vale Rio Doce, Brasília*, p. 413–419.
- Vial, D.S., DeWitt, E., Lobato, L.M., Thorman, C.H., 2007. The geology of the Morro Velho gold deposit in the Archaean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil. *Ore Geol. Rev.* 32, 511–542.
- Vieira, F.W.R., 1992. Geologia da Mina de Cuiabá, Níveis 03 e 04: Internal Report. *Mineração Morro Velho S. A, Nova Lima, Brazil*, p. 23.
- Vieira, F.W.R., 1988. Caracterização petrográfica e mineralógica do minério do corpo galinheiro extensão, open pit Cuiabá: Internal Report. *Mineração Morro Velho S. A, Nova Lima, Brazil*, p. 6.
- Vieira, F.W.R., 1991a. Textures and processes of hydrothermal alteration and mineralization in the Nova Lima Group, Minas Gerais, Brazil: In: Ladeira, E.A. (Ed.), *Brazil Gold's, Balkema, Rotterdam*, p. 319–327.
- Vieira, F.W.R., 1991b. Petrologia e litogeoquímica do Setor W do “Greenstone belt” Rio das Velhas, MG: Simpósio internacional de Geologia do Grupo AMSA, Nova Lima, *Mineração Morro Velho Internal Report*. 24 p.
- Vitorino, A.L.A., 2017. Mineralização aurífera associada aos veios quartzo-carbonáticos hospedados na unidade máfica basal da Jazida Cuiabá, Greenstone Belt Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil: Unpublished M.Sc. thesis, Belo Horizonte, Brazil, Universidade Federal de Minas Gerais.
- Vitorino, A.L.A., 2020. Shear-zone-related gold mineralization in quartz-carbonate veins from metamafic rocks of the BIF-hosted world-class Cuiabá deposit, Rio das Velhas

- greenstone belt, Quadrilatero Ferrifero, Brazil: Vein classification and structural control. *Ore Geol. Rev.* 127, 103789.
- Vukmanovic, Z., Barnes, S.J., Reddy, S., Godel, B., Fiorentini, M.L., 2013. Microstructure in chromite crystals of the Merensky reef (Bushveld Complex, South Africa). *Contrib. Miner. Petrol.* 165, 1031–1050.
- Wright, K.A., 2017. Correlating Cu-Fe sulfides and Au mineralization in the Ertsberg-Grasberg District of Papua, Indonesia using volumetric analysis and trace element geochemistry: Unpublished M.Sc. thesis, Austin, United States of America, University of Texas at Austin, 273 p.

## **5 ESTUDO PETROGRÁFICO**

Uma das etapas críticas da aplicação da tomografia de raios-X, para estudos petrográficos, é a seleção da melhor configuração analítica para acentuar o contraste de atenuação entre minerais. A melhor estratégia para definir a atenuação esperada durante o imageamento de uma amostra geológica, é plotar os coeficientes de atenuação linear dos minerais que compõem a amostra ao longo do espectro de energia de raios-X (Kyle e Ketcham, 2015). Dessa forma, é essencial identificar a mineralogia da amostra antes da definição de parâmetros para obtenção de um processamento mais acurado.

A fim de suplementar o estudo das amostras da jazida Cuiabá que foram submetidos ao escaneamento por tomografia computadorizada de raios-X, foram confeccionadas nove lâminas delgadas polidas de amostras de rochas mineralizadas e encaixantes para estudo petrográfico microscópico, além daquelas escaneadas. O objetivo dessa seção é a identificação da mineralogia principal e relações de contato entre minerais, de modo a suportar a definição da configuração analítica e interpretação dos dados gerados pela tomografia.

### **4.1 Amostragem**

A amostragem (Tabela 2) foi realizada pela equipe de Geologia e Exploração da AngloGold Ashanti em conjunto com a autora do trabalho, buscando selecionar furos que adjacentes às amostras escaneadas.

Tabela 2 - Amostras selecionadas para confecção de lâminas delgadas polidas.

<b>Corpo mineral <sup>[1]</sup></b>	<b>Testemunho de sondagem</b>	<b>Profundidade (m)</b>	<b>Amostra</b>	<b>Litologia<sup>[2]</sup></b>	<b>Teor (g/t Au)<sup>[3]</sup></b>
FGS	FGSBUD0597	159.00	FGS97-S-159	Sulfeto maciço	18.32
VQZ	VQZBUD0373	56.70	VQZ73-VQC-1	Veio de quartzo com ouro	176.19
VQZ	VQZBUD0373	59.65	VQZ73-X2-1	Metandesito com sericitização	0.51
VQZ	VQZBUD0373	64.50	VQZ73-VQC-3	Veio de quartzo	0.73
VQZ	VQZBUD0373	71.00	VQZ73-X2-2	Metandesito com sericitização	3.01
VQZ	VQZBUD0373	81.20	VQZ73-MANX	Metandesito com cloritização	NA
VQZ	VQZBUD0374	25.90	VQZ74-X2	Metandesito com sericitização	1.41
VQZ	VQZBUD0374	28.00	VQZ74-VQCAPY	Veio de quartzo	3.09
VQZ	VQZBUD0374	28.70	VQZ74-VQC	Veio de quartzo com arsenopirita	28.38

[1] FGS: Fonte Grande Sul; VQZ: Veio de Quartzo

[2] Classificação litológica com nomenclatura interna da AngloGold Ashanti.

[3] Dados de teor de ouro fornecidos pela AngloGold Ashanti.

Uma amostra foi selecionada do testemunho de sondagem diamantada FGSBUD0597 (Figura 13) na zona proximal do minério. Cinco amostras foram selecionadas do testemunho de sondagem diamantada VQZBUD0373 e três amostras foram selecionadas no testemunho VQZBUD0374 (Tabela 2, Figura 14), nas zonas de veio mineralizado.

Figura 13 - Localização do furo de sondagem FGSBUD0597 no modelo de blocos do corpo de minério Fonte Grande Sul (FGS), sem escala, com teores de ouro por bloco (Fonte: AngloGold Ashanti)

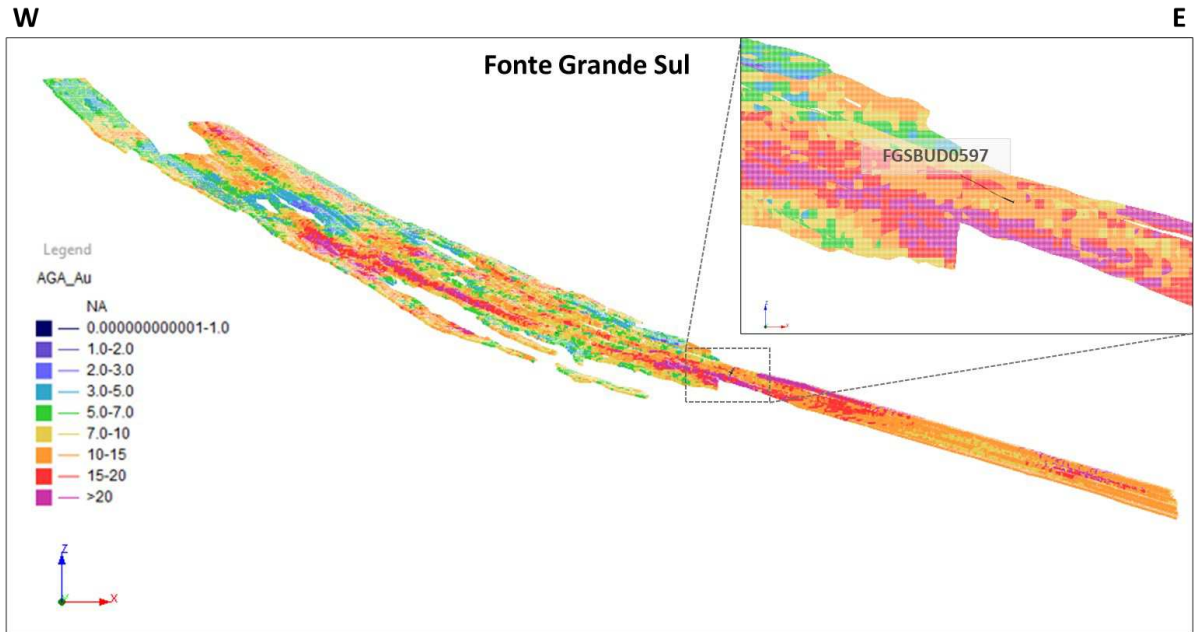
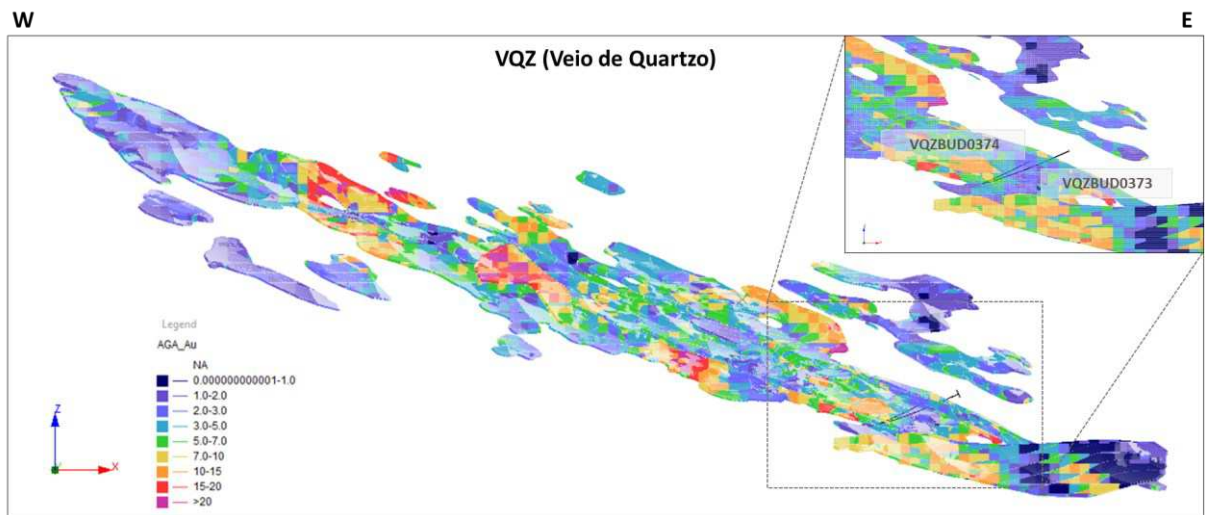


Figura 14 - Localização dos furos de sondagem VQZBUD0373 e VQZBUD0374 no modelo de blocos do corpo de minério VQZ (Veio de Quartzo), sem escala, com teores de ouro por bloco (Fonte: AngloGold Ashanti)



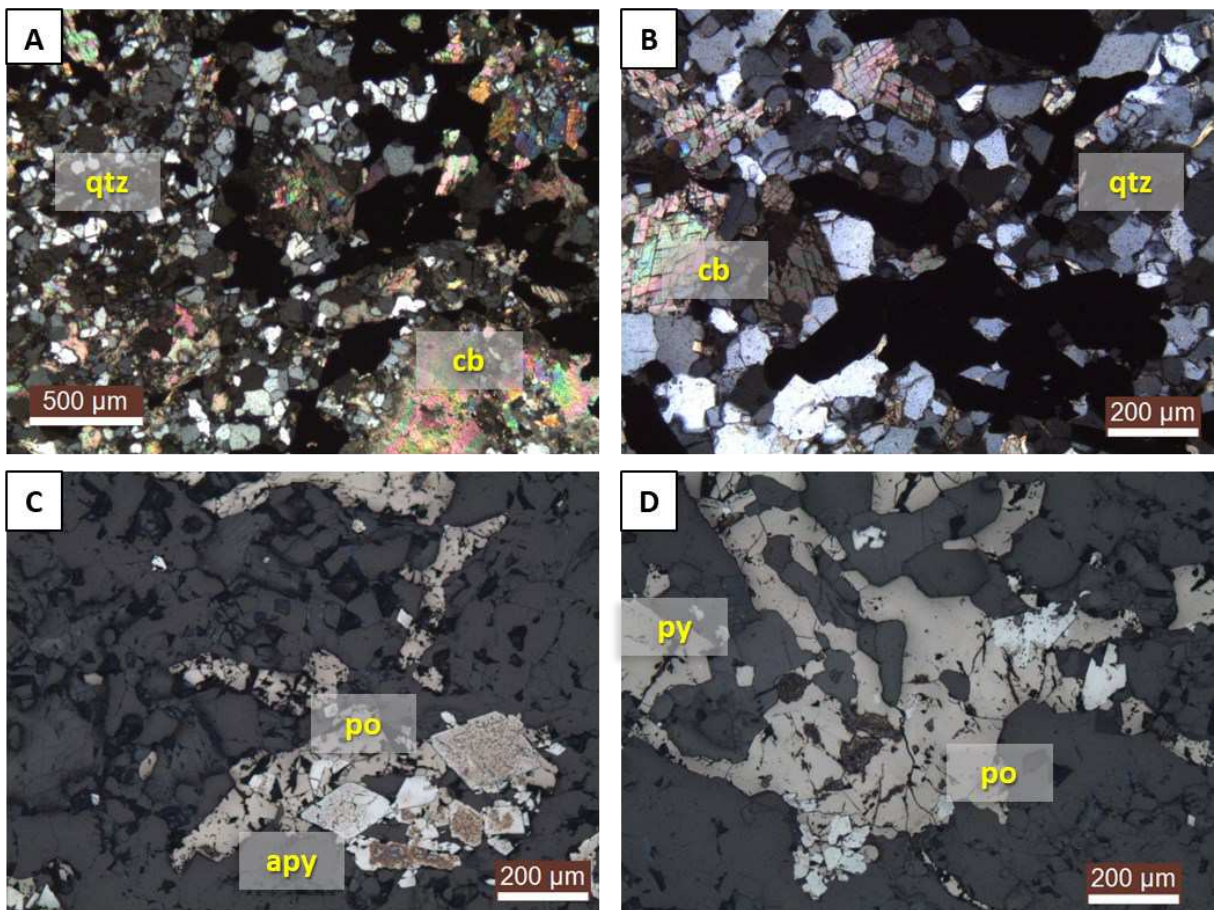


## 4.2 Estudos petrográficos

As descrições de todas as amostras estão localizadas no APÊNDICE I - FICHAS DE DESCRIÇÃO PETROGRÁFICA. De modo sucinto, são apresentadas nessa seção a caracterização geral das litologias analisadas.

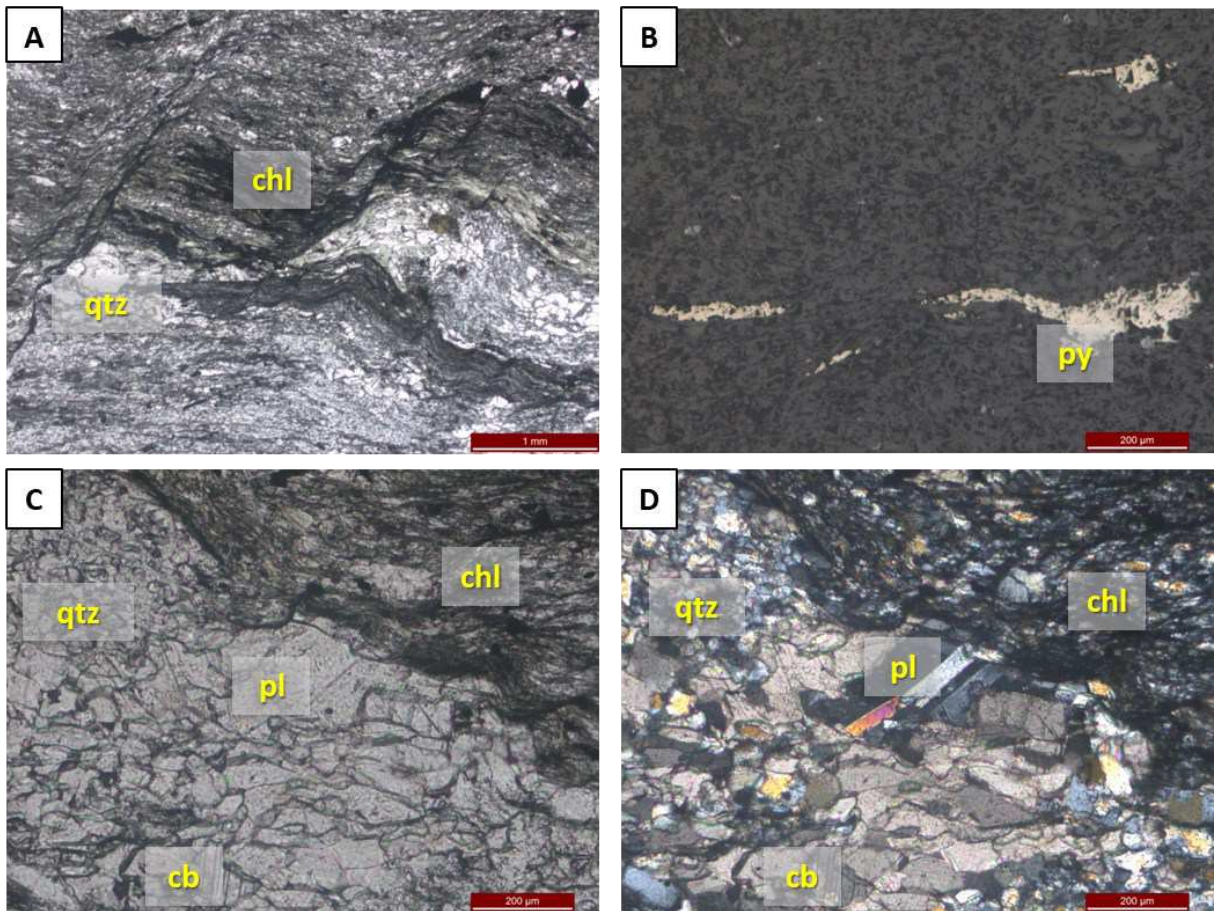
A amostra FGS97-S-159 (Figura 15) amostra representa a zona de sulfetação do corpo Fonte Grande Sul. É composta por 50% sulfetos (pirrotita, po; pirita, py; arsenopirita, apy), com dominância de pirrotita sobre pirita, 25% quartzo (qtz), 25% carbonato (cb), e <1% de sericita.

Figura 15 - Fotomicrografias da amostra FGS97-S-159: A) Luz transmitida, nicóis cruzados; B) Luz transmitida, nicóis cruzados; C) Luz refletida, nicóis descruzados; D) Luz refletida, nicóis descruzados



A amostra VQZ-73-MANX (Figura 16) corresponde a um quartzo-sericita-carbonato-clorita xisto e é constituída por 60% de clorita (chl), 30% de carbonato (cb), 5% de sericita (ser), 5% de quartzo (qtz), <5% de plagioclásio (pl), <1% de pirrotita e pirita (po, py). Predomínio de cloritização.

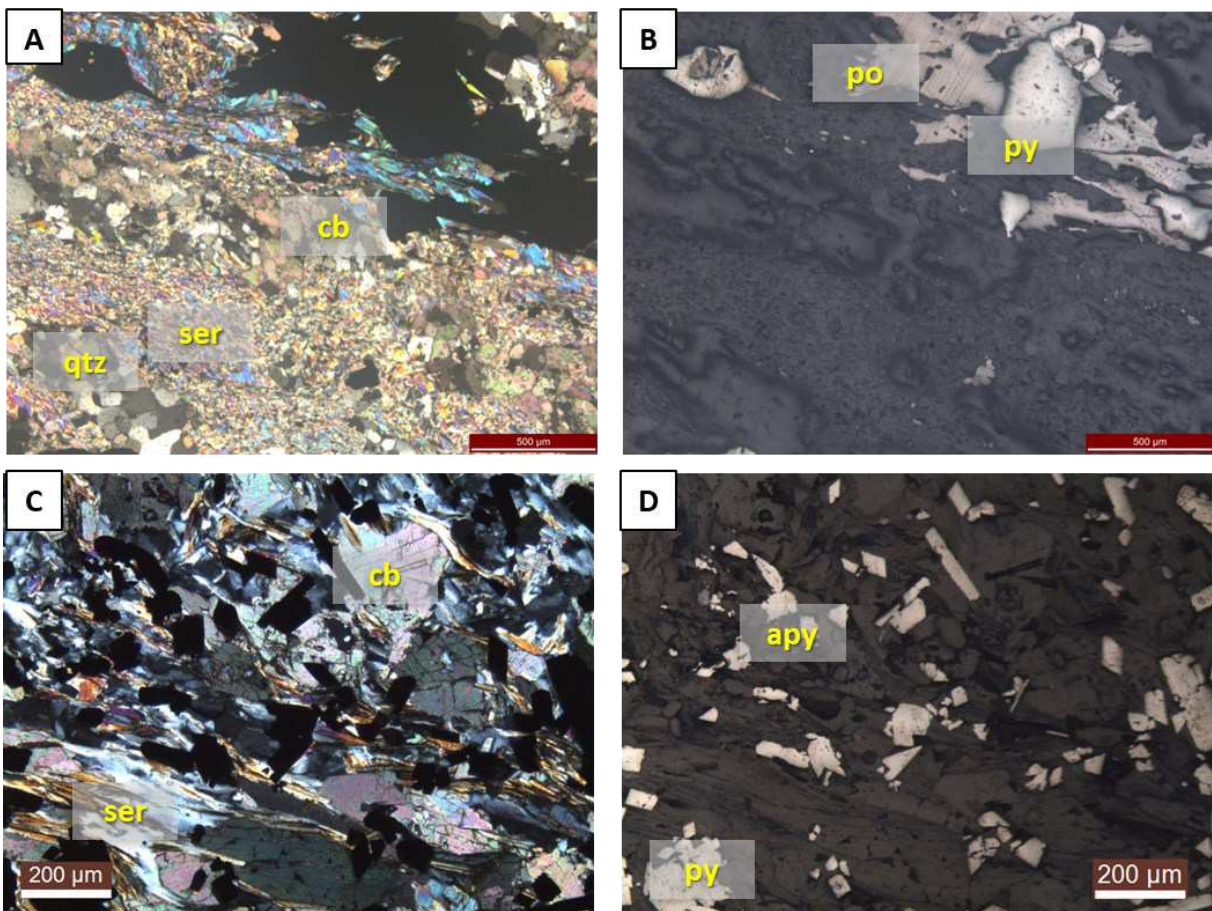
Figura 16 - Fotomicrografias da amostra VQZ-74-MANX: A) Luz transmitida, nicóis descruzados; B) Luz refletida, nicóis descruzados; C) Luz transmitida, nicóis descruzados; D) Luz transmitida, nicóis cruzados





As amostras VQZ73-X2-1, VQZ73-X2-2, VQZ74-X2 e VQZ74-VQCAPY (Figura 17) são constituídas por carbonato (40%, cb), sericita (30%, ser), quartzo (20%, qtz), e clorita (10%, chl) em menor proporção, com venulação de quartzo-carbonato moderada a intensa. Essas amostras distinguem-se pela proporção de quartzo, carbonato, sericita e clorita, sendo classificadas como: (i) VQZ73-X2-1, carbonato-sericita xisto; (ii) VQZ73-X2-2, sericita-carbonato xisto; (iii) VQZ74-X2, quartzo-sericita-carbonato xisto; (iv) VQZ74-VQCAPY, quartzo-sericita-carbonato xisto; (v) e VQZ73-VQC-1, clorita-quartzo-carbonato xisto.

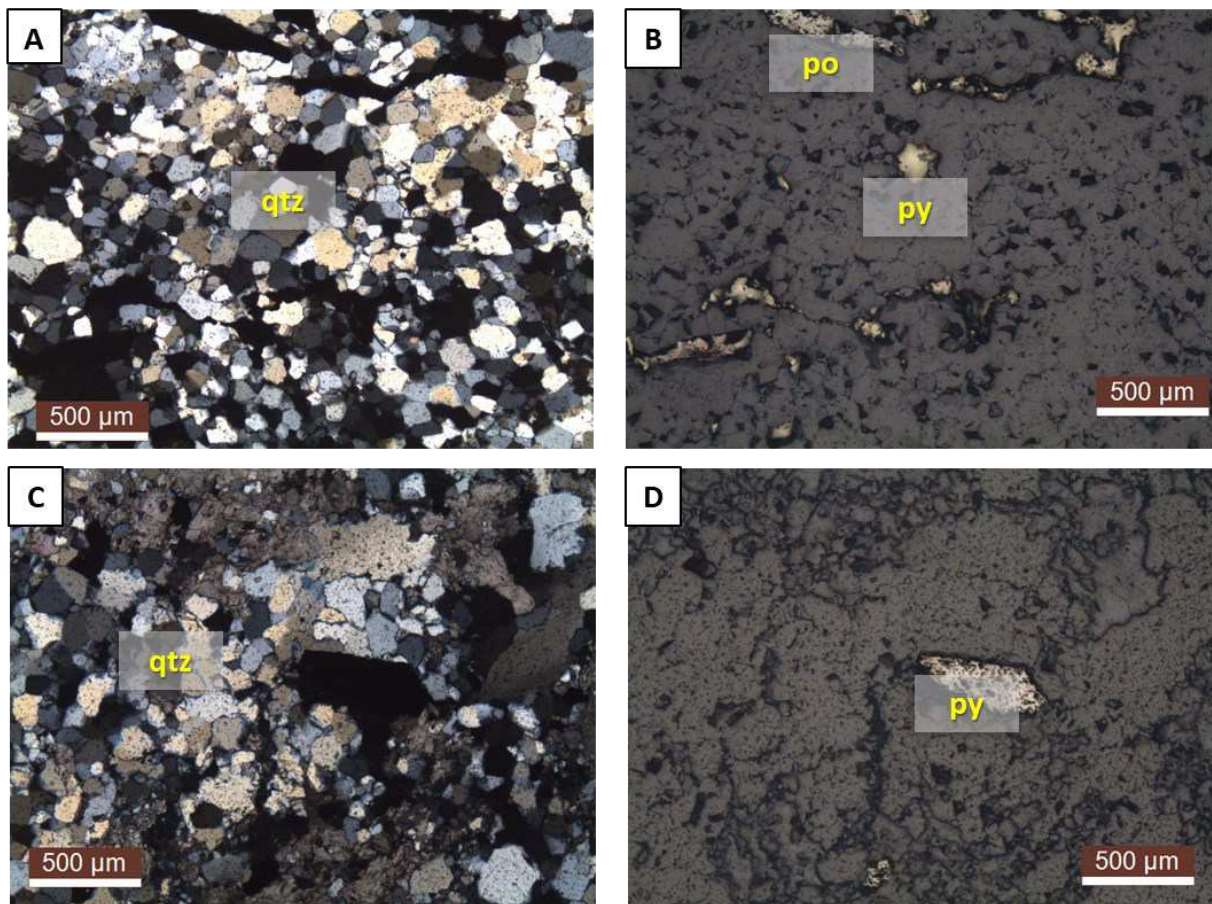
Figura 17 - Fotomicrografias da amostra VQZ-73-X2-2: A) Luz transmitida, nicóis cruzados; B) Luz refletida, nicóis descruzados; Amostra VQZ-74-VQCAPY: C) Luz transmitida, nicóis cruzados; D) Luz refletida, nicóis descruzados





As amostras VQZ74-VQC e VQZ73-VQC-3 são caracterizadas como veio de quartzo (60%, qtz) e carbonato (50%, cb), com ocorrência de quartzo leitoso e fumê, e correspondem à zona de silicificação. Sulfetos (<10%, sul) ocorrem de modo esparsos e em granulação muito fina a fina (Figura 18).

Figura 18 - Fotomicrografias da amostra VQZ-74-VQC: A) Luz transmitida, nicóis cruzados; B) Luz refletida, nicóis descruzados; Amostra VQZ-73-VQC-3: C) Luz transmitida, nicóis cruzados; D) Luz refletida, nicóis descruzados

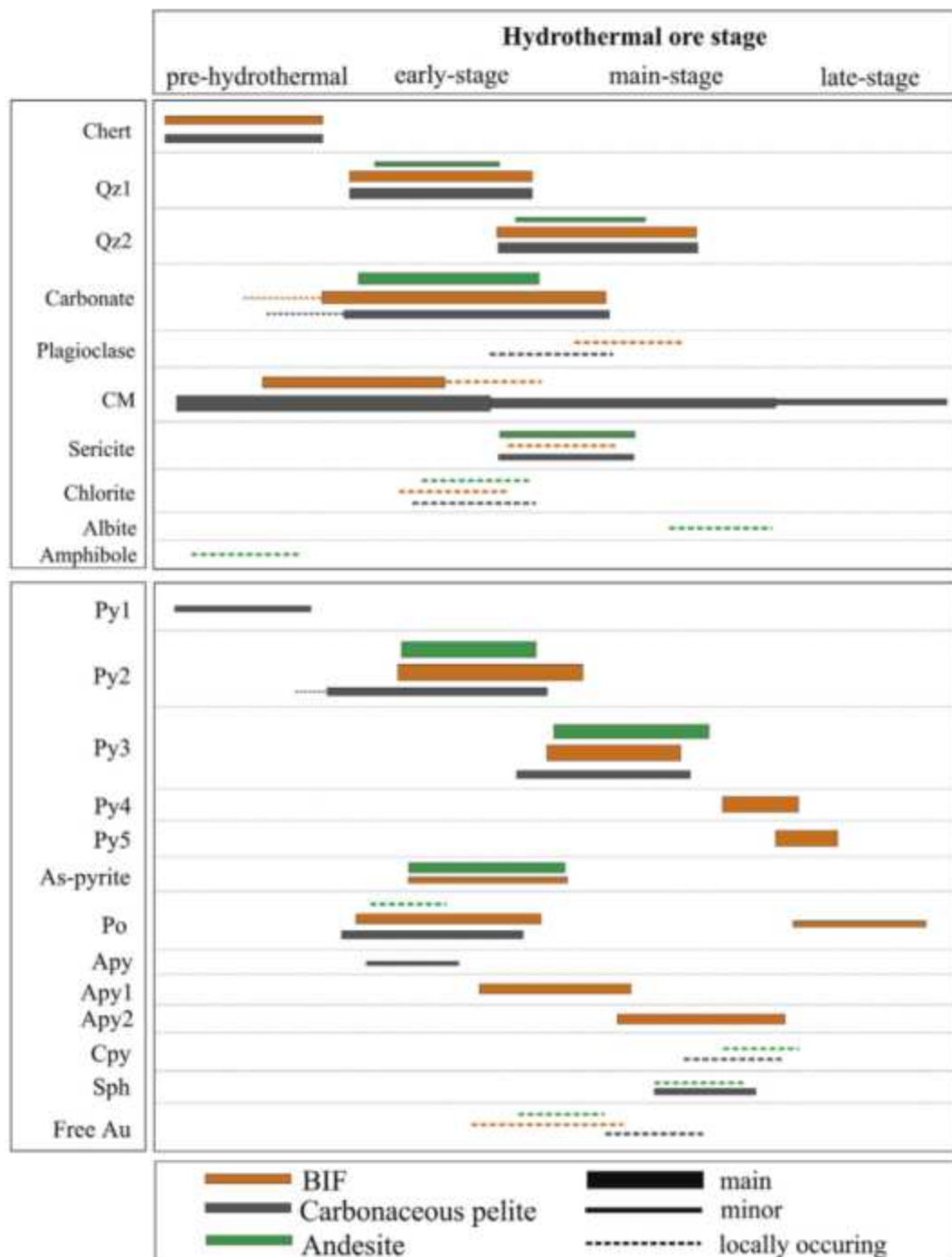


### 4.3 Contexto da alteração hidrotermal nas amostras estudadas

Vários estudos foram realizados sobre a mineralização de ouro em Cuiabá, sendo que Kresse et al. (2020) atesta a origem metamórfica dos fluidos mineralizadores nos corpos de minério da jazida Cuiabá e propõe um modelo hidrotermal em dois pulsos de fluido durante o Arqueano: um cedo-hidrotermal aquo-carbônico, de temperatura relativamente alta; e um fluido evoluído, também aquo-carbônico, de mais baixa temperatura. A Figura 19 apresenta a paragênese mineral dos principais minerais de ganga e minério nas rochas da jazida Cuiabá,

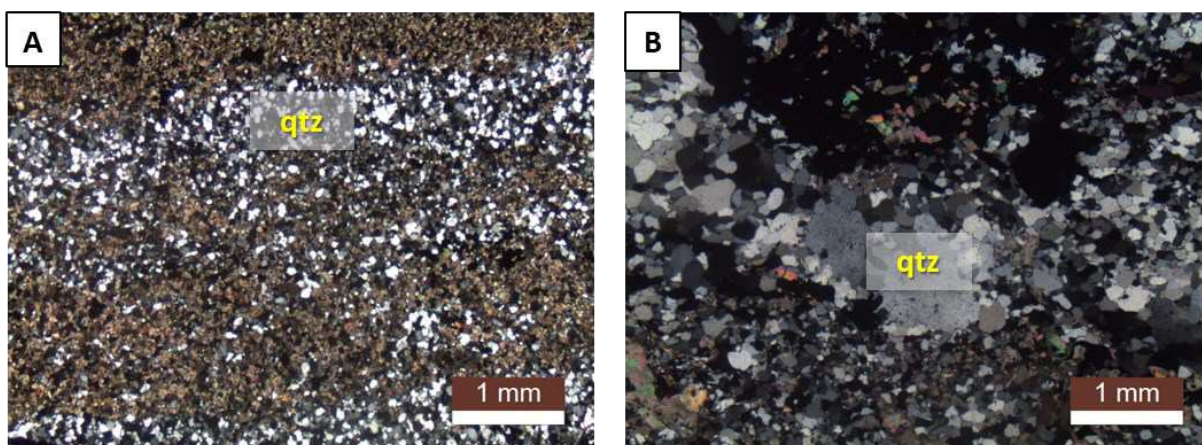
sendo hospedado em formação ferrífera bandada, pelito carbonoso e andesito. Vitorino (2020) estuda com detalhe a mineralização hospedada em andesito.

Figura 19 - Paragênese mineral dos principais minerais de ganga e minério nas rochas da jazida Cuiabá (Modificado de Kresse et al. 2018)



O corpo Fonte Grande Sul corresponde a um corpo de minério de substituição em formação ferrífera bandada, enquanto o corpo Veio de Quartzo é um minério constituído por veios de quartzo-carbonato hospedados em andesito. A amostra do corpo Fonte Grande Sul (FGS97-S-159) representa uma zona de sulfetação de uma formação ferrífera bandada, cujas características originais não foram preservadas. Observa-se que o tamanho médio dos grãos de quartzo é grosso, com zonas de veio, o que é uma indicação de alteração hidrotermal. A Figura 20 mostra uma comparação entre: (i) amostra de formação ferrífera bandada com quartzo primário, de uma lâmina descrita por Kresse (2020), e (ii) amostra FGS97-S-159, com quartzo de granulação grossa. Além disso, distinguem-se massas de carbonato entremeadas com os sulfetos. A dominância de pirrotita sobre pirita indica que essa amostra pode representar um estágio cedo-hidrotermal (Figura 19).

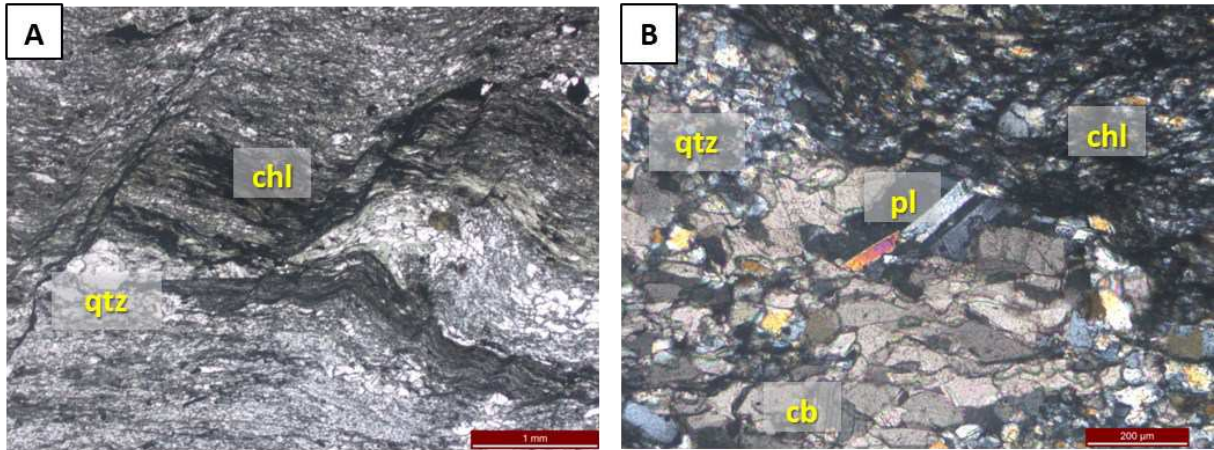
*Figura 20 – Comparação entre A) Formação ferrífera bandada, retirada de Kresse (2020), luz transmitida, nicóis cruzados; e B) amostra FGS97-S-159, luz refletida, nicóis descruzados; qtz: quartzo*



A amostra VQZ-73-MANX (Figura 21) corresponde a um quartzo-sericita-carbonato-clorita xisto, com clivagem de crenulação intensa, e evidencia a alteração clorítica no andesito na zona mais distal do corpo Veio de Quartzo. Observa-se que a granulação do quartzo é mais fina, uma vez que o protólito é vulcânico. Assim, mesmo sendo hidrotermal, o quartzo apresenta menor granulação.

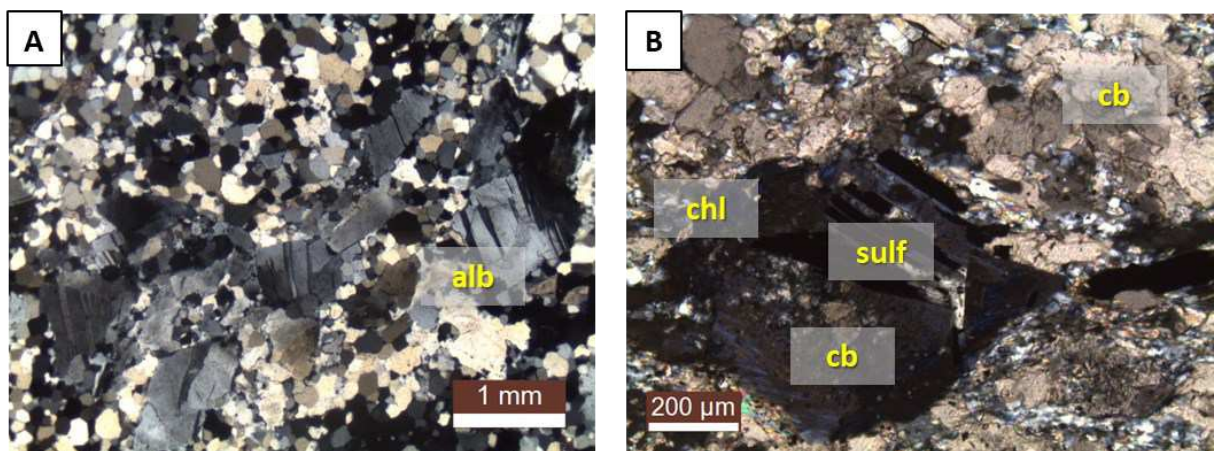


Figura 21 - Fotomicrografias da amostra VQZ-74-MANX: A) Luz transmitida, nicóis descruzados; B) Luz transmitida, nicóis cruzados; chl: clorita, qtz: quartzo, pl: plagioclásio, cb: carbonato



As amostras VQZ73-X2-1, VQZ73-X2-2, VQZ74-X2 e VQZ74-VQCAPY representam a zona de alteração hidrotermal mais proximal, com alteração à carbonato, sericita e sílica. A variação da proporção entre esses minerais indica o aumento da proximidade com a zona de minério pelo aumento da quantidade de sericita e sulfetos, conforme indicado na Figura 19. Destacam-se alguns aspectos, como a presença de albita hidrotermal com maclas típicas (Figura 22A), e a ocorrência de carbonato e sulfetos substituindo a clorita (Figura 22B).

Figura 22 - Fotomicrografias das amostras A) VQZ-73-X2-X, Luz transmitida, nicóis cruzados; B) VQZ-73-VQC-1 Luz transmitida, nicóis cruzados; chl: clorita, qtz: quartzo, alb: albita, cb: carbonato



As amostras VQZ74-VQC e VQZ73-VQC-3 representam a zona de silificação e mostram a ocorrência de quartzo leitoso e fumê, e carbonato, de granulação grossa a muito

grossa. A ocorrência de sulfetos é de modo esparsa e em granulação muito fina a fina, porém os teores de ouro nessas amostras é um indicativo da proximidade com o minério (Tabela 2).

## 6 CONCLUSÕES

A tomografia computadorizada de raios-X em alta resolução produz dados tridimensionais únicos para a in situ, de partículas minerais. Por meio da aplicação do método PVB foi possível obter dados de tamanho, volume, forma, orientação e relações mineralógicas e discutir suas implicações para a geologia de exploração e geometalurgia no depósito de ouro orogênico Cuiabá, na província do Quadrilátero Ferrífero (MG, Brasil). As amostras selecionadas foram de minério formado a partir de FFB e metandesito.

As principais conclusões podem ser assim sumarizadas:

- (i) **Ocorrência das partículas de ouro:** para o minério em veios de quartzo-carbonato (corpo Veio de Quartzo, VQZ), as partículas de ouro estão principalmente livres na matriz, embora muitas estejam em contato direto ou inclusas em sulfetos diversos. Para o caso do minério de substituição em formação ferrífera bandada (corpo Fonte Grande Sul, FGS) a, o ouro está preferencialmente incluso em pirrotita, arsenopirita e pirita. Ressalta-se que a amostra selecionada do corpo Fonte Grande Sul não representa uma amostra típica do minério desse corpo, uma vez que pirrotita é o sulfeto dominante sobre o minério típico rico em pirita.
- (ii) **Forma, tamanho e distribuição das partículas:** para ambos os estilos de mineralização, as partículas de ouro mais finas parecem ter as três dimensões de tamanho equivalente devido aos efeitos de *blurring*. As partículas maiores representam a maior quantidade de volume de ouro em ambas as amostras, de modo que as partículas mais finas provavelmente devem representar um impacto menor no volume de minério recuperado. Para que esses dados sejam representativos e utilizados no dimensionamento do processo mineral, é necessário que mais amostras sejam analisadas com diferentes características.
- (iii) **Orientação mineral:** na amostra do corpo VQZ, não orientada, as partículas de ouro anisométricas podem ser resultado do crescimento preferencial do grão influenciado pela deformação local. Para a amostra do corpo FGS, orientada, a orientação das arsenopirritas aciculares é concordante com a lineação mineral

principal desse corpo. Além disso, as orientações do eixo longo das partículas de ouro indicam que as partículas são orientadas ao longo de um plano que contém essa mesma lineação. É interessante notar que embora o ouro seja cristalizado no sistema isométrico e sua deformação ocorra por deslocamento, i. e. deslizamento de planos cristalinos um sobre o outro através do movimento ao longo dos defeitos da rede, esses resultados demonstram que as deformações D1 e D2 pode ter influência direta sobre as partículas.

- (iv) **Exsolução do ouro:** para a amostra do corpo FGS, foi observado que a localização do ouro nas fraturas de arsenopirita pode ser uma evidência de que o ouro foi exsolvido da estrutura cristalina e remobilizado ao longo das fraturas secundárias do cristal. Alguns autores sugerem que, durante a deformação, o ouro incorporado à estrutura dos minerais sulfetados pode ser remobilizado e ocupar essas fraturas, ao invés de ser precipitado no momento ou após a formação das fraturas.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação da tomografia computadorizada de raios-X em alta resolução, em conjunto com um método de processamento quantitativo, desde que minimize os artefatos inerentes ao escaneamento e os limites de resolução espacial, demonstra que é possível a caracterização 3D, in situ, de partículas minerais por meio de dados de tamanho, volume, forma, orientação e relações mineralógicas. Entre as principais observações desse estudo, nota-se que a utilização dessa técnica ainda é embrionária para obtenção de dados quantitativos de partículas pequenas em relação a matriz, como o ouro, e que outros estudos de caso devem ser desenvolvidos a fim de consolidar a metodologia.

Nesse trabalho, buscou-se expandir o potencial da aplicação dessa técnica como um instrumento para contribuir para a compreensão geológica de depósitos minerais. A influência de aspectos da deformação regional, em escala de partículas, evidencia que estudos petrográficos tridimensionais precisam ser complementares aos estudos petrográficos tradicionais. Dessa forma, recomenda-se também o desenvolvimento de estudos de caso com um maior número de amostras orientadas, de modo que análises comparativas possam ser realizadas.

Os resultados também indicaram que a técnica pode contribuir com a caracterização mineral para a geometurgia. Para aplicações nesse campo, é necessário que o processamento de dados seja focado na obtenção de parâmetros que contribuam com a definição do processo mineral, tais como grau de liberação mineral.

Por fim, a inerente limitação do tempo e custo de escaneamento de amostras pela tomografia, bem como o complexo processamento de dados, justifica a baixa aplicação dessa técnica em escala industrial até o presente momento. No entanto, o desenvolvimento recente de *scanners* com múltiplos sensores para o escaneamento de testemunhos de sondagem abre fronteiras para que a obtenção de dados 3-D por tomografia de raios-X também seja desenvolvida.

## REFERÊNCIAS

- Akin, S., Kovscek, A.R., 2003, **Computed tomography in petroleum engineering research**: Geological Society London, Special Publication, v. 215, p. 23–38.
- Alkmim, F.F., Marshak, S., 1998, **Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton, Minas Gerais, Brazil**: Evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, v. 90, p. 29-58.
- Alkmim, F. F., 2020, **Histórico das investigações estratigráficas, estruturais e geotectônicas do Quadrilátero Ferrífero**. In: Endo I., Delgado C. E. R. Oliveira M. M. F. de, Zapparoli A. de C., Carlos D. U., Galbiatti H. F., Castro P. de T. A., Suita M. T. de F., Barbosa M. S. C., Lana C. E., Moura L. G. B. de., 2019b, *Estratigrafia e Arcabouço Estrutural do Quadrilátero Ferrífero: Nota Explicativa do Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil, Escala 1:150.000: Ouro Preto, Departamento de Geologia da Escola de Minas – UFOP - Centro de Estudos Avançados do Quadrilátero Ferrífero*, p. 18-69.
- Alkmim, F. F., Noce, C. M., 2006, **The Paleoproterozoic Record of the São Francisco Craton**. In: Alkmim, F. F., Noce, C. M. (Editors), *International Geoscience Programme (IGCP)*.
- Almeida, F.F.M., 1967, **Evolução tectônica do centro-oeste brasileiro no Proterozoico Superior**: *Annaes Academia Brasileira de Geociências*, v. 7, p. 349-364.
- Almeida, F.F.M., 1977, **O Cráton do São Francisco**. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 7, p. 349-364.
- Araújo, J.C.S., Ferreira, R.C.R., Freitas, F.M, Magalhães, J.R., 2020, **The Archean Rio das Velhas greenstone belt revisited: new insights into the stratigraphy**. *Journal of the Geological Survey of Brazil*, 3, p. 113-149.
- Aremu, A.O., Brennan-Craddock, J.P.J., Panesar, A., Ashcroft, I.A., Hague, R.J.M., Wildman, R.D., Tuck, C., 2017, **A voxel-based method of constructing and skinning conformal and functionally graded lattice structures suitable for additive manufacturing**, *Additive Manufacturing*, v. 13, p. 1-13.
- Babinski, M., Chemale Jr., F., Van Schmus, W.R., 1995, **The Pb/Pb age of the Minas Supergroup carbonate rocks, Quadrilátero Ferrífero, Brazil**: *Precambrian Research*, v. 72, p. 235–245.
- Baltazar, O., 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*, v. 32, p. 471–499.
- Baltazar, O.F., Lobato, L.M., 2020, **Structural evolution of the Rio das Velhas Greenstone Belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: Influence of Proterozoic orogenies on its Western Archean Gold Deposits**: *Minerals*, 10, v. 983, p. 1-38.
- Cabral, A.R., Zeh, A., Koglin Jr, N., Gomes, A.A.S., Viana, D.J., Lehmann, B., 2012, **Dating the Itabira iron formation, Quadrilátero Ferrífero of Minas Gerais, Brazil, at 2.65 Ga: depositional U-Pb age of zircon from a metavolcanic layer**: *Precambrian Research*, v. 204–205, p. 40–45.



Carlson, W., Denison, C., Ketcham, R., 2000, **High-resolution X-ray computed tomography as a tool for visualization and quantitative analysis of igneous textures in three dimensions**, *Visual Geosciences*, v. 4, p. 1–14.

Carneiro, M.A., 1992, **O Complexo Metamórfico do Bonfim Setentrional**. *Rev. Escola de Minas*, v. 45(1/2), p. 155-156.

Cnudde, V., Boone, M.N., 2013, **High-resolution X-ray computed tomography in geosciences: a review of the current technology and applications**: *Earth-Science Reviews*, v. 123, p. 1–17.

Conroy, G.C., Vannier, M.W., 1984, **Noninvasive three-dimensional computer imaging of matrix-filled fossil skulls by high-resolution computed tomography**, *Science*, v. 226, p. 456–458.

Costa, M., 2000, **Estudo de isótopos de carbono e oxigênio e caracterização petrográfica do minério da Mina Cuiabá**: Unpublished M. Sc. thesis, Belo Horizonte, Brazil, Universidade Federal de Minas Gerais.

Denison, C., Carlson, W.D., 1997, **Three-dimensional quantitative textural analysis of metamorphic rocks using high-resolution computed X-ray tomography: Application to natural samples**: *Journal of Metamorphic Geology*, v. 15, p. 45–57.

Denison, C., Carlson, W.D., Ketcham, R.A., 1997, **Three-dimensional quantitative textural analysis of metamorphic rocks using high-resolution computed X-ray tomography**: *Journal of Metamorphic Geology*, v. 15, p. 29–44.

Dhawan, N., Safarzadeh, M.S., Miller, J.D., Moats, M.S., Rajamani, R.K., Lin, C.-L., 2012, **Recent advances in the application of X-ray computed tomography in the analysis of heap leaching systems**: *Minerals Engineering*, v. 35, p. 75–86.

Dorr, J.V.N., 1969, **Physiographic, stratigraphic, and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil**: U.S. Geological Survey, v. 614 (A), p. 110.

Endo, I., 1997, **Regimes tectônicos do Arqueano e Proterozoico no interior da Placa Sanfranciscana: Quadrilátero Ferrífero e áreas adjacentes, Minas Gerais**. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 382 p.

Farina, F., Albert, C., Lana, C., 2015, **The Neoproterozoic transition between medium- and high-K granitoids: clues from the Southern São Francisco Craton (Brazil)**: *Precambrian Research*, v. 266, p. 375–394.

Farina, F., Albert, C., Martínez Dopico, C., Aguilar Gil, C., Moreira, H., Hippertt, J.P., Cutts, K., Alkmim, F.F., Lana C., 2016, **The Archean-Paleoproterozoic evolution of the Quadrilátero Ferrífero (Brazil): current models and open questions**. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 68, p. 4-21.

Fernandes, R.C., Endo, I., Pereira, R.M.P., Rivarola, I., Souza, J.C., 2016, **Geologia e Evolução Estrutural do Depósito Aurífero Cuiabá: Novas Perspectivas para a Exploração Mineral**, Seção Pôster: VII Simpósio Brasileiro de Exploração Mineral, SIMEXMIN, Ouro Preto, Brazil.

Godel, B., 2013, **High-resolution X-ray computed tomography and its application to ore deposits: from data acquisition to quantitative three-dimensional measurements with case studies from Ni–Cu–PGE deposits**: *Economic Geology*, v. 108, p. 2005–2019.

Godel, B., Barnes, S.J., Austin, P., Gürer, D.M., Fiorentini, M.L., 2013a, **Chromite in komatiites: 3D morphologies and sizes with implications for crystallization mechanisms**: *Contribution to Mineralogy and Petrology*, v. 165, p. 173–189.

Godel, B., Barnes, S.J., Barnes, S.-J., Maier, W.D., 2010, **Platinum ore in 3D: Insights from high-resolution X-ray computed tomography**: *Geology*, v. 38, p. 1127–1130.

Godel, B., Barnes, S.-J., Maier, W.D., 2006, **3D distribution of sulphide minerals in the Merensky reef (Bushveld Complex, South Africa) and the J-M reef (Stillwater Complex, USA) and their relationship to microstructures using X-Ray computed tomography**: *Journal of Petrology*, v. 47, p. 1853–1872.

Goldfarb, R.J., Groves, D.I., 2015, **Orogenic gold: common or evolving fluid and metal sources through time**: *Lithos* v. 233, p. 2–26.

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 Geology Reviews*, v. 13, p. 7–27.

Hanna, R.D., Ketcham, R.A., 2017, **X-ray computed tomography of planetary materials: A primer and review of recent studies**: *Chemie der Erde Geochemistry*, v. 77, p. 547–572.

Haubitz, B., Prokop, M., Dohring, W., Ostrom, J.H., Wellnhofer, P., 1988, **Computed tomography of Archaeopteryx**, *Paleobiology*, v. 14 (2), p. 206–213.

Herz, N., 1970, **Gneissic and igneous rocks of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil**: United States Geological Survey Professional Paper, v. 641-B, 58p.

Herz, N., 1978, **Metamorphic rocks of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil**, USGS Professional Paper, 641-C, C1-C81.

Hezel, D.C., Elangovan, P., Viehmann, S., Howard, L., Abel, R.L., Armstrong, R., 2013, **Visualization and quantification of CV chondrite petrography using micro-tomography**: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 116, p. 33–40.

Hough, R.M., Butt, C.R.M., Fischer-Bühner, J., 2009, **The Crystallography, Metallography and Composition of Gold**: *Elements*, v.5, p. 297–302.

Huddleston-Holmes, C.R., Ketcham, R.A., 2010, **An X-ray computed tomography study of inclusion trail orientation in multiple porphyroblasts from a single sample**: *Tectonophysics*, v. 480, p. 305–320.

Jerram, D.A., Davis, G.R., Mock, A., Charrier, A., Marsh, B.D., 2010, **Quantifying 3D crystal populations, packing and layering in shallow intrusions: A case study from the basement sill, Dry Valleys, Antarctica**: *Geosphere*, v. 6, p. 537–548.

Jerram, D.A., Mock, A., Davis, G.R., Field, M., Brown, R.J., 2009, **3D crystal size distributions: A case study on quantifying olivine populations in kimberlites**: *Lithos*, v. 112, p. 223–235.

Ketcham, R.A., Carlson, W.D., 2001, **Acquisition, optimization and interpretation of X-ray computed tomographic imagery: applications to the geosciences**: *Computational Geosciences*, v. 27, p. 381–400.

Ketcham, R.A., Mote, A.S., 2019, **Accurate measurement of small features in X-ray CT data volumes, demonstrated using gold grains**: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, v. 124, p. 3508–3529.

Kresse, C., Lobato L.M., Hagemann S.G., Figueiredo e Silva, R.C., 2018, **Sulfur isotope and metal variations in sulfides in the BIF-hosted orogenic Cuiabá gold deposit, Brazil: implications for the hydrothermal fluid evolution**: *Ore Geology Reviews*, v. 98, p. 1–27

Kresse, C., Lobato, L.M., Figueiredo e Silva, R.C., Hagemann, S.G., Banks, D., Vitorino, A.L.A., 2020, **Fluid signature of the shear zone–controlled Veio de Quartzito ore body in the world-class BIF-hosted Cuiabá gold deposit, Archaean Rio das Velhas greenstone belt, Brazil: a fluid inclusion study**: *Mineralium Deposita*, v. 55, p. 1441–1466.

Kyle, J.R., Ketcham, R.A., 2003, **In-situ distribution of gold in ores using high resolution X-ray computed tomography**: *Economic Geology*, v. 98, p. 1697–1701.

Kyle, J.R., Ketcham, R.A., 2015, **Application of high resolution X-ray computed tomography to mineral deposit origin, evaluation, and processing**: *Ore Geology Reviews*, v. 65, p. 821–839.

Kyle, J.R., Mote, A.S., Ketcham, R.A., 2008, **High resolution X-ray computed tomography studies of Grasberg porphyry Cu–Au ores**: *Mineralium Deposita*, v. 43, p. 519–532.

Lana, C., Alkmin, F.F., Armstrong, R., Scholz, R., Romano, R., Nalini Jr., H.A., 2013, **The ancestry and magmatic evolution of Archaean TTG rocks of the Quadrilátero Ferrífero province, southeast Brazil**: *Precambrian Research*, v. 231, p. 157–173.

Le Roux, S.G., Plessis, A. D., Rozendaal, A., 2015, **The quantitative analysis of tungsten ore using X-ray micro CT: Case study**: *Computational Geosciences*, v. 85, p. 75–80.

Liu, P.-P., Zhou, M.-F., Chen, W.T., Boone, M., Cnudde, V., 2014, **Using multiphase solid inclusions to constrain the origin of the Baima Fe–Ti–(V) oxide deposit, SW China**: *Journal of Petrology*, v. 55, p. 951–976.

Lobato, L.M., Figueiredo e Silva, R.C., Costa, M.A., 2020, **Ouro no Quadrilátero Ferrífero**. In: Endo I., Delgado C. E. R. Oliveira M. M. F. de, Zapparoli A. de C., Carlos D. U., Galbiatti H. F., Castro P. de T. A., Suita M. T. de F., Barbosa M. S. C., Lana C. E., Moura L. G. B. de., 2019b, *Estratigrafia e Arcabouço Estrutural do Quadrilátero Ferrífero: Nota Explicativa do Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil, Escala 1:150.000*: Ouro Preto, Departamento de Geologia da Escola de Minas – UFOP - Centro de Estudos Avançados do Quadrilátero Ferrífero, p. 264–287.

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*, v. 36, p. 249–277.

Lobato, L.M., Ribeiro Rodrigues, L.C., Zucchetti, M., Noce, C.M., Baltazar, O.F., da Silva, L., Pinto, C., 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*, v. 36, p. 228–248.

Lobato, L.M., Santos, J.O.S., McNaughton, N.K., 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.

Lobato, L.M., Vieira, F.W.R., 1998, **Styles of hydrothermal alteration and gold mineralization associated with the Nova Lima Group, Quadrilátero Ferrífero: Part II, the Archean mesothermal gold-bearing hydrothermal system**: *Brazilian Journal of Geology*, v. 28, p. 355–366.

Machado, N., Carneiro, M., 1992, **U–Pb evidence of late Archean tectono-thermal activity in the southern São Francisco shield, Brazil**: *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 29, p. 2341–2346.

Marshak, S., Alkmim, F.F., 1989, **Proterozoic contraction/extension tectonics of the Southern São Francisco Region, Minas Gerais, Brazil**: *Tectonics*, v. 3, p. 555–571.

Mauk, J.L., Kyle, J.R., Simpson, M.P., Atkinson, P., 2006, **Ore mineralogy of the BM37 shoot of the Karangahake deposit, New Zealand**: *Proceedings, 39th Annual Conference of the New Zealand Branch of the Australian Institute of Mining and Metallurgy*, p. 233–242.

Mees, F., Swennen, R., VanGeet, M., Jacobs, P., 2003, **Applications of X-ray computed tomography in the geosciences**: Geological Society London, Special Publication 215.

Mendes, M.C.O., Lobato, L.M., Suckau, V., Lana, C., 2014, **Datação U–Pb in situ por LA-ICPMS em zircões detríticos da Formação Cercadinho, Supergrupo Minas**. *Geologia USP. Série Científica*, v. 14 (1), p. 55–68.

Merinero, R., Ortega, L., Lunar, R., Pinã, R., Cárdenes, V., 2019, **Framboidal chalcopyrite and bornite constrain redox conditions during formation of their host rocks in the copper stratabound mineralization of Picachos, north-central Chile**: *Ore Geology Reviews*, v. 112, p. 103037.

Miller, J.D., Lin, C.L., Garcia, C., Arias, H., 2003, **Ultimate recovery in heap leaching operations as established from mineral exposure analysis by X-ray micro-tomography**: *International Journal of Mineral Processing*, v. 72(1–4), p. 331–340.

Miller, J.D., Lin, C.L., Hupka, L., Al-Wakeel, M.I., 2009, **Liberation-limited grade/recovery curves from X-ray micro CT analysis of feed material for the evaluation of separation efficiency**: *International Journal of Mineral Processing*, v. 93(1), p. 48–53.

Moreira, H., Lana, C., Nalini, H.A., 2016, **The detrital zircon record of an Archean convergent basin in the southern São Francisco Craton, Brazil**: *Precambrian Research*, v. 275, p. 84–99.

Morey, A.A., Tomkins, A.G., Bierlein, F.P., Weinberg, R.F., Davidson, G.J., 2008, **Bimodal distribution of gold in pyrite and arsenopyrite: Example from the Archean Boorara and Bardoc shear systems, Yilgarn craton, western Australia**: *Economic Geology*, v. 103, p. 599–614.

Mote, A.S., Kyle, J.R., Ketcham, R.A., Melker, M.D., Jahraus, M.J., Brown, T.R., Wawrzyniec, T.F., 2005, **High resolution X-ray computed tomography investigations of high-grade gold ore zones in the Cripple Creek District, Colorado**. In: Rhoden, H.N., et al. (Eds.), *Geological Society of Nevada Symposium 2005: Window to the World Symposium*, Reno, Nevada, p. 1169–1175.

Noce, C. M., 1995. **Geocronologia dos Eventos Magmáticos, Sedimentares e Metamórficos na Região do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais**. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. São Paulo, 128 p.

Noce, C.M., Tassinari, C., 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*, v. 32, p. 500–510.

Pedrosa-Soares A. C., Noce C. M., Alkmim F. F. de, Silva L. C. da, Babinski M., Cordani U., Castañeda C., 2007, **Orógeno Araçuaí: Síntese do conhecimento 30 anos após Almeida 1977**, *Geonomos*, v. 15(1), p. 1-16;

Phillips, G.N., Groves, D.I., Martyn, J.E., 1984, **An epigenetic origin for Archean banded iron-formation-hosted gold deposits**: *Economic Geology*, v. 79, p. 162-171.

**Relatório de Recursos e Reservas Minerais**, AngloGold Ashanti, 2022, Disponível em: <https://reports.anglogoldashanti.com/22/wp-content/uploads/2023/04/AGA-RR22.pdf>. Acesso em: 12/04/2023.

Reyes, F., Lin, Q., Udoudo, O., Dodds, C., Lee, P.D., Neethling, S.J., 2017, **Calibrated X-ray micro-tomography for mineral ore quantification**: *Minerals Engineering*, v. 110, p. 122-130.

Ribeiro Rodrigues, L.C., 1998, **Gold in Archaen banded iron formation of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil - The Cuiabá Mine**: Unpublished Ph.D. thesis, Aachen University of Technology. Augustinus Verlag, Aachener Geowissenschaftliche Beiträge, Band 27, 264 p.

Ribeiro Rodrigues, L.C., de 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.

Rosière C.A., Siemes H., Quade H., Brokmeier H.G., Jansen E.M., 2001, **Microstructure, texture and deformation mechanisms in hematite**, *Journal of Structural Geology*, v. 23, p. 1429-1440.

- Sayab, M., Suuronen, J.-P., Hölttä, Molnár, F., Villanova, J., Kallonen, A., O'Brien, H., P., Lahtinen, R., Lehtonen, M., 2016, **Three-dimensional textural and quantitative analyses of orogenic gold at the nanoscale**, *Geology*, v. 44 (9), p. 739-742.
- Sayab, M., Suuronen, J.-P., Hölttä, P., Aerden, D., Lahtinen, R., Kallonen, A.K., 2015, **High resolution X-ray computed microtomography: A holistic approach to metamorphic fabric analyses**, *Geology*, v. 43, p. 55–58.
- Schorscher, H.D., 1978, **Komatiitos na estrutura “Greenstone Belt” Série Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil**. 30º Congresso Brasileiro de Geologia, Sociedade Brasileira de Geologia, Recife, Boletim de Resumos, p. 292-293.
- Sena, N. C., 2020, **Modelo genético e paleoambiental de formações ferríferas, metacherts e rochas metavulcânicas, depósito Cuiabá, greenstone belt Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil**: Unpublished M.Sc. thesis, Belo Horizonte, Brazil, Universidade Federal de Minas Gerais, 125 p.
- Teixeira, W., Ávila, C.A., Dussin, I.A., Neto, A.C., Bongiorno, E.M., Santos, J.O., Barbosa, N.S., 2015, **A juvenile accretion episode (2.35–2.32 Ga) in the Mineiro belt and its role to the Minas accretionary orogeny: Zircon U–Pb–Hf and geochemical evidences**. *Precambrian Research*, v. 256, p. 148-169.
- Van Geet, M., Swennen, R., Wevers, M., 2000, **Quantitative analysis of reservoir rocks by micro focus X-ray computerized tomography**: *Sedimentary Geology*, v. 132(1–2), p. 25–36.
- Vial, D.S., 1980, **Mapeamento Geológico do Nivel 3 da mina de Cuiabá**: Internal Report, Mineração Morro Velho S. A., Nova Lima, Brazil.
- Vial, D.S., 1988a, **Mina de ouro de Cuiabá, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais**. In: **Schobenhau-Filho, C., Coelho, C.E.S. Metais básicos não ferrosos, ouro e alumínio**: Departamento Nacional da Produção Mineral/Campanha, Vale Rio Doce, Brasília, p. 413–419.
- Vieira, F.W.R., 1988, **Caracterização petrográfica e mineralógica do minério do corpo galinheiro extensão, open pit Cuiabá**: Internal Report, Mineração Morro Velho S. A., Nova Lima, Brazil, 6 p.
- Vieira, F.W.R., 1991a, **Textures and processes of hydrothermal alteration and mineralization in the Nova Lima Group, Minas Gerais, Brazil**: In: Ladeira, E.A. (Ed.), *Brazil Gold's*, Balkema, Rotterdam, p. 319–327.
- Vieira, F.W.R., 1991b, **Petrologia e litogeoquímica do Setor W do “Greenstone belt” Rio das Velhas, MG**: Simpósio internacional de Geologia do Grupo AMSA, Nova Lima, Mineração Morro Velho Internal Report. 24 p.
- Vieira, F.W.R., 1992, **Geologia da Mina de Cuiabá, Níveis 03 e 04**: Internal Report, Mineração Morro Velho S. A., Nova Lima, Brazil, 23 p.
- Vitorino, A.L.A., 2017, **Mineralização aurífera associada aos veios quartzo-carbonáticos hospedados na unidade máfica basal da Jazida Cuiabá, Greenstone Belt Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil**: Unpublished M.Sc. thesis, Belo Horizonte, Brazil, Universidade Federal de Minas Gerais.



Vitorino, A.L.A., 2020, **Shear-zone-related gold mineralization in quartz-carbonate veins from metamafic rocks of the BIF-hosted world-class Cuiaba deposit, Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: Vein classification and structural control:** *Ore Geology Reviews*, v. 127, 103789.

Vukmanovic, Z., Barnes, S.J., Reddy, S., Godel, B., Fiorentini, M.L., 2013, **Microstructure in chromite crystals of the Merensky reef (Bushveld Complex, South Africa):** *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 165, p. 1031–1050.

Wright, K.A., 2017, **Correlating Cu-Fe sulfides and Au mineralization in the Ertsberg-Grasberg District of Papua, Indonesia using volumetric analysis and trace element geochemistry:** Unpublished M.Sc. thesis, Austin, United States of America, University of Texas at Austin, 273 p.

Zucchetti, M., Lobato, L.M., Baltazar, O.F., 2000, **Volcanic and volcanoclastic features in Archean rocks and their tectonic environment, Rio das Velhas Greenstone Belt, Quadrilátero Ferrífero, MG. Brazil.** *Revista Brasileira de Geociências*, v. 30, p. 388–392.

## APÊNDICE A – Fichas de descrição petrográfica

FICHA DE DESCRIÇÃO PETROGRÁFICA	
Amostra: FGS97-S-159	Furo: FGSBUD0597
Profundidade: 159,00m	Teor: 18,32 g/t
Descrição macroscópica: Formação ferrífera bandada com sulfetação intensa	
	
DESCRIÇÃO MICROSCÓPICA	
Mineralogia identificada (ordem decrescente de abundância)	
<b>Minerais principais</b>	Carbonato (40%), sulfetos (30%) quartzo (30%)
<b>Minerais acessórios</b>	Sericita (<1%)
<b>Alteração</b>	Sulfetação
Descrição microscópica	
<p>Amostra composta por 40% de carbonato (cb), 30% de sulfetos (pirrotita, po; pirita, py; arsenopirita, apy), 30% de quartzo (qtz) e &lt;1% de sericita. Apresenta textura nematoblástica e lepidoblástica com clivagem espaçada, com alternância de zonas ricas em carbonato e sulfetos, e zonas ricas em quartzo. O carbonato possui granulação fina a média, é comumente estirado e orientado oblíquo a foliação, pode possuir textura nematoblástica ou granoblástica com hábito subédrico a euédrico e bordas poligonais. O quartzo possui granulação fina a média, ocorre associado ao carbonato com contatos interlobados ou poligonais, hábito anédrico a subédrico. Os opacos são principalmente pirrotita, localmente substituída por pirita, e arsenopirita. A pirrotita possui granulação fina a média e localmente pode ocorrer em granulação grossa, com hábito euédrico a subédrico, porosas, com bordas irregulares e ocorrem associadas as faixas com carbonato orientadas segundo a foliação. A pirita ocorre substituindo a pirrotita localmente, com hábito euédrico e granulação média a grossa. Arsenopirita ocorre em granulação muito fina a fina em contato predominante com pirrotita.</p>	
Classificação da rocha: Formação ferrífera bandada sulfetada	
Fotomicrografias	
	



### FICHA DE DESCRIÇÃO PETROGRÁFICA

Amostra: VQZ-73-VQC-1

Furo: VQZBUD0373

Profundidade: 56,70 m

Teor: 176,19 g/t

Descrição macroscópica: Clorita-quartzo-carbonato xisto com venulação quartzo-carbonática intensa. Sulfetação intensa com pirita e pirrotita fina a média.



### DESCRIÇÃO MICROSCÓPICA

#### Mineralogia identificada (ordem decrescente de abundância)

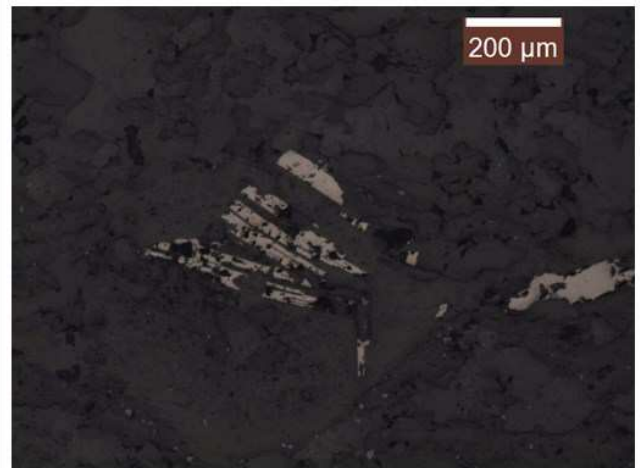
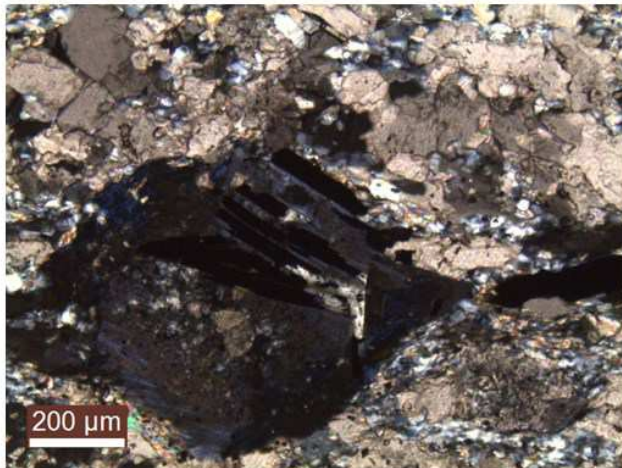
<b>Minerais principais</b>	Carbonato (50%), quartzo (30%), clorita (15%)
<b>Minerais acessórios</b>	Pirrotita, pirita (5%)
<b>Alteração</b>	Silicificação e sulfetação

#### Descrição microscópica

Amostra constituída por 50% de carbonato (cb), 30% de quartzo (qtz), 15% de clorita (chl), 5% de pirrotita e pirita (po, py). Apresenta textura nematoblástica e lepidoblástica com clivagem espaçada, marcadas pela clorita. A clorita ocorre principalmente no domínio da clivagem, possui granulação muito fina a fina, hábito lamelar e na matriz envolve os blastos de quartzo, carbonato e sulfetos. O carbonato possui granulação fina a média, é comumente estirado e orientado oblíquo a foliação, pode possuir textura nematoblástica ou granoblástica com hábito subédrico a euédrico e bordas poligonais. O quartzo possui granulação fina a média, ocorre associado ao carbonato com contatos interlobados ou poligonais, hábito anédrico a subédrico. Os opacos são principalmente pirrotita, locamente substituída por pirita. A pirrotita possui granulação fina a média e locamente pode ocorrer em granulação grossa, com hábito euédrico a subédrico, porosas, com bordas irregulares e ocorrem associadas as faixas com carbonato orientadas segundo a foliação. A pirita ocorre substituindo a pirrotita localmente, com hábito euédrico e granulação média a grossa.

Classificação da rocha: Clorita-quartzo-carbonato xisto silicificado

#### Fotomicrografias





### FICHA DE DESCRIÇÃO PETROGRÁFICA

Amostra: VQZ-73-X2-1

Furo: VQZBUD0373

Profundidade: 59,65 m

Teor: 0,51 g/t

Descrição macroscópica: Quartzo-carbonato-sericita xisto cinza-claro a bege. Venulação quartzo-carbonática intensa, sulfetação moderada com agregados de pirrotita e pirita disseminada.



### DESCRIÇÃO MICROSCÓPICA

#### Mineralogia identificada (ordem decrescente de abundância)

**Minerais principais**

Sericita (60%), carbonato (30%), quartzo (5%)

**Minerais acessórios**

Pirrotita (&lt; 5%), pirita (&lt; 1%), plagioclásio (&lt;1%)

**Alteração**

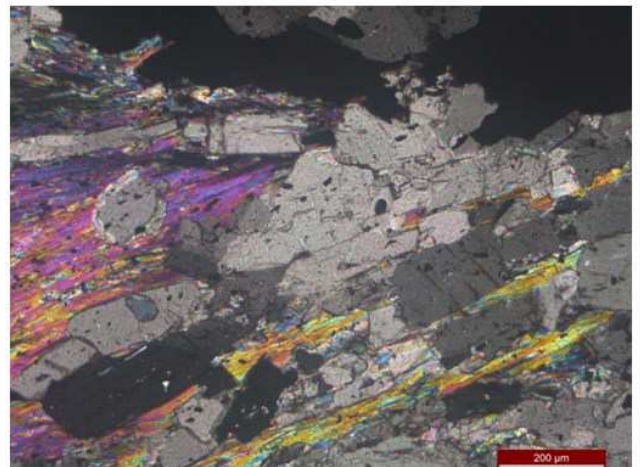
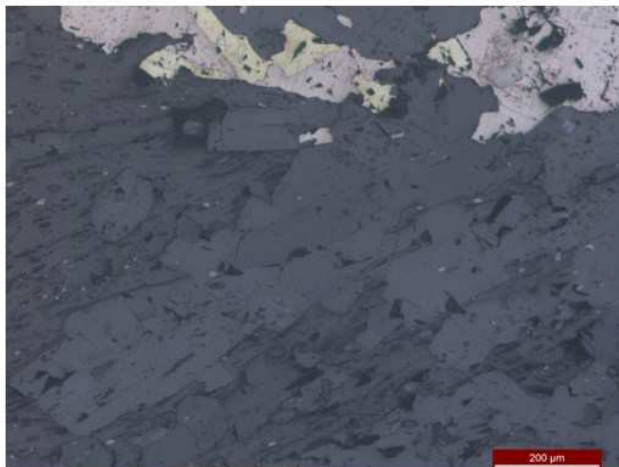
Sericitização

#### Descrição microscópica

Amostra composta por 60% de sericita (ser), 30% de carbonato (cb), 5% de quartzo (qtz) e <5% de pirrotita (po), <1% de pirita (py) e <1% de plagioclásio (pl). Apresenta textura lepidoblástica e nematoblástica com clivagem espaçada e clivagem de crenulação marcada pela sericita. A sericita ocorre principalmente no domínio da clivagem, possui granulação muito fina a fina, hábito lamelar e na matriz envolve os blastos de quartzo e carbonato. O carbonato possui granulação fina a média, é comumente estirado e orientado paralelo a foliação, pode possuir textura nematoblástica ou granoblástica com hábito subédrico a euédrico e bordas poligonais. O quartzo possui granulação fina a média, ocorre associado ao carbonato com contatos interlobados ou poligonais, hábito anédrico a subédrico. Ocorrem vênulas de quartzo-carbonato truncando a foliação. Os opacos são principalmente pirrotita, localmente substituída por pirita. A pirrotita possui granulação fina a média e localmente pode ocorrer em granulação grossa, com hábito euédrico a subédrico, porosas, com bordas irregulares e ocorrem associadas as faixas com carbonato orientadas segundo a foliação. A pirita ocorre substituindo a pirrotita localmente, com hábito euédrico e granulação média a grossa.

Classificação da rocha: Quartzo-sericita-carbonato xisto com vênulas de quartzo

#### Fotomicrografias



### FICHA DE DESCRIÇÃO PETROGRÁFICA

Amostra: VQZ-73-VQC-3

Furo: VQZBUD0373

Profundidade: 64,50 m

Teor: 0,73 g/t

Descrição macroscópica: Clorita-quartzo-carbonato xisto com venulação quartzo-carbonática intensa



### DESCRIÇÃO MICROSCÓPICA

#### Mineralogia identificada (ordem decrescente de abundância)

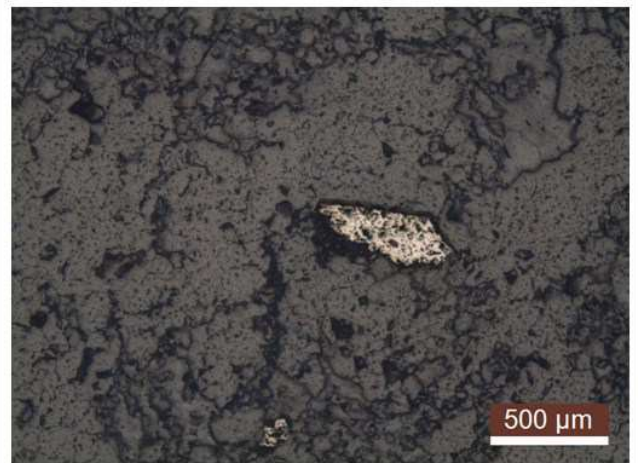
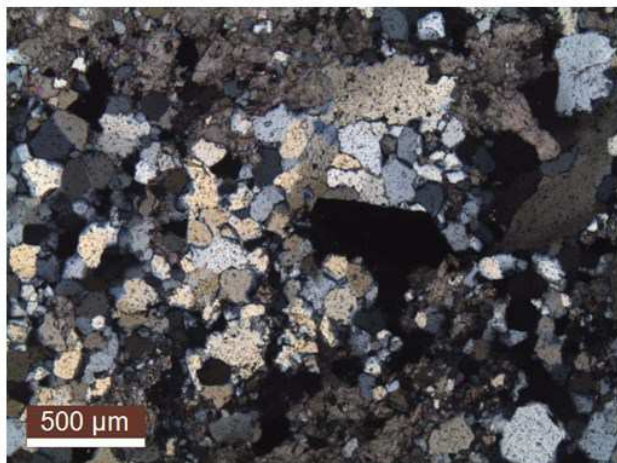
<b>Minerais principais</b>	Quartzo (80%), carbonato (20%)
<b>Minerais acessórios</b>	Pirrotita, pirita (<1%)
<b>Alteração</b>	Silicificação

#### Descrição microscópica

Amostra de veio constituída por 80% de quartzo (qtz), 20% de carbonato (cb) e <1% de pirrotita e pirita (po, py). Apresenta textura granoblástica e nematoblástica sem foliação aparente. O carbonato possui granulação fina a média, pode possuir textura nematoblástica ou granoblástica com hábito subédrico a euédrico e bordas poligonais. O quartzo possui granulação fina a média, ocorre associado ao carbonato com contatos interlobados ou poligonais, hábito anédrico a subédrico. Os opacos são principalmente pirita e pirrotita, ocorrendo de modo disperso em grãos subédricos na matriz em contato com o quartzo e carbonato.

Classificação da rocha: Veio de quartzo e carbonato

#### Fotomicrografias





### FICHA DE DESCRIÇÃO PETROGRÁFICA

Amostra: VQZ-73-X2-2

Furo: VQZBUD0373

Profundidade: 71,00 m

Teor: 3,01 g/t

Descrição macroscópica: Quartzo-carbonato-sericita xisto cinza-claro a bege. Venulação quartzo-carbonática intensa, sulfetação moderada com agregados de pirrotita e pirita disseminada.



### DESCRIÇÃO MICROSCÓPICA

#### Mineralogia identificada (ordem decrescente de abundância)

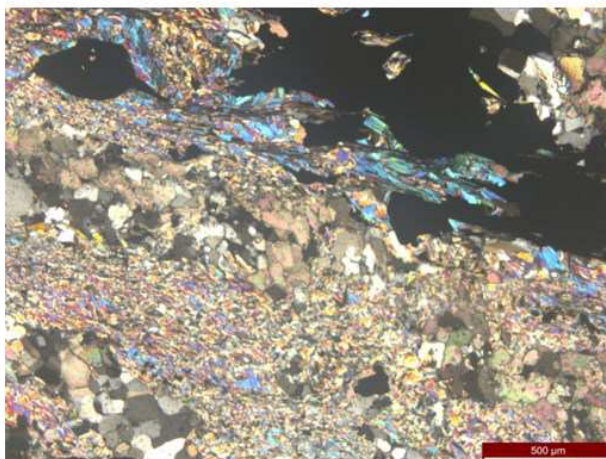
<b>Minerais principais</b>	Quartzo (60%), carbonato (20%), sericita (15%)
<b>Minerais acessórios</b>	Plagioclásio, pirrotita e pirita (< 5%)
<b>Alteração</b>	Silicificação

#### Descrição microscópica

Amostra composta por 60% de quartzo (qtz), 20% de carbonato (cb), 15% de sericita (ser), <5% de pirrotita (po) e pirita (py). Apresenta textura predominantemente granoblástica e localmente lepidoblástica com foliação moderada pela orientação da sericita. O quartzo possui granulação fina a média e ocorre associado ao carbonato na matriz com contatos interlobados ou poligonais, hábito anédrico a subédrico. Em algumas zonas silicificadas o quartzo ocorre com granulação grossa a muito grossa, variedade fumê, hábito euédrico a subédrico em contatos poligonais com outros grãos de quartzo, e contato serrilhado com a matriz. O carbonato possui granulação fina a média, é comumente euédrico, localmente estirado, e pode possuir textura nematoblástica ou granoblástica com hábito subédrico a euédrico e bordas poligonais. Localmente apresenta-se sendo substituído por quartzo, em granulação média a grossa, com contatos serrilhados. A sericita ocorre principalmente no domínio da clivagem, possui granulação muito fina a fina, hábito lamelar e na matriz envolve os blastos de quartzo e carbonato. Os opacos são principalmente pirrotita, localmente substituída por pirita. A pirrotita possui granulação fina a média e em menor predominância ocorre em granulação grossa, com hábito euédricas a subédricas, porosas, com bordas irregulares e ocorrem associadas as faixas com sericita e carbonato. A pirita ocorre substituindo a pirrotita localmente, com hábito euédrico e granulação média a grossa.

Classificação da rocha: Quartzo-carbonato-sericita xisto

#### Fotomicrografias





### FICHA DE DESCRIÇÃO PETROGRÁFICA

Amostra: VQZ-74-MANX

Furo: VQZBUD0374

Profundidade: 81,20 m

Teor: NA

Descrição macroscópica: Quartzo-carbonato-plagioclásio-clorita xisto, coloração esverdeada, cristais de carbonato estirados concordantes com a foliação. Venulação quartzo-carbonática moderada a fraca. Sulfetação moderada com pirita e pirrotita fina a grossa.



### DESCRIÇÃO MICROSCÓPICA

#### Mineralogia identificada (ordem decrescente de abundância)

<b>Minerais principais</b>	Clorita (60%), carbonato (30%), sericita (5%), quartzo (5%)
<b>Minerais acessórios</b>	Plagioclásio (<5%), pirrotita, pirita (< 1%)
<b>Alteração</b>	Clorizitização

#### Descrição microscópica

Amostra constituída por 60% de clorita (chl), 30% de carbonato (cb), 5% de sericita (ser), 5% de quartzo (qtz), <5% de plagioclásio (pl), <1% de pirrotita e pirita (po, py). Apresenta textura lepidoblástica e nematoblástica com clivagem espaçada e clivagem de crenulação marcada pela clorita. A clorita é fina a muito fina, ocorre formando clivagem de crenulação e anastomosada, contornando o carbonato (cb). O carbonato ocorre em granulação fina a média com hábito anédrico a subédrico, localmente ocorre como poiquiloblastos de granulação grossa envoltos por clorita em hábito subédrico a euédricos. O quartzo é granoblástico, de granulometria fina, hábito euédrico a anédrico, com bordas poligonais ou contatos interlobados. Ocorre na matriz e em vênulas. A sericita está orientada segundo a clivagem, tem hábito lamelar, granulometria muito fina a fina. O plagioclásio ocorre em granulação fina a média em contatos interlobatos com o carbonato. Em menor ocorrência observam-se pirrotita e pirita de granulometria fina a média, textura porosa, hábito anédrico a subédrico e orientadas paralela a clivagem.

Classificação da rocha: Quartzo-sericita-carbonato-clorita xisto

#### Fotomicrografias





### FICHA DE DESCRIÇÃO PETROGRÁFICA

Amostra: VQZ-74-X2

Furo: VQZBUD0374

Profundidade: 25,90 m

Teor: 1,41 g/t

Descrição macroscópica: Quartzo-carbonato-sericita xisto cinza-claro a bege. Venulação quartzo-carbonática intensa, sulfetação moderada com agregados de pirrotita e pirita disseminada.



### DESCRIÇÃO MICROSCÓPICA

#### Mineralogia identificada (ordem decrescente de abundância)

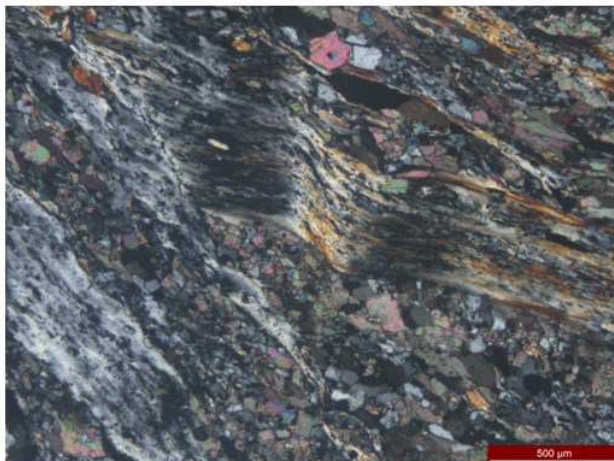
<b>Minerais principais</b>	Carbonato (50%), sericita (30%), quartzo (15%)
<b>Minerais acessórios</b>	Pirrotita, pirita e arsenopirita (< 1%)
<b>Alteração</b>	Sericitização

#### Descrição microscópica

Amostra composta por 50% de carbonato (cb), 30% de sericita (ser), 15% de quartzo (qtz) e <5% de opacos (pirrotita, po; pirita, py; arsenopirita, apy). Apresenta textura nematoblástica e lepidoblástica com clivagem espaçada e em menor ocorrência clivagem de crenulação, marcadas pela sericita. A sericita ocorre principalmente no domínio da clivagem, possui granulação muito fina a fina, hábito lamelar e na matriz envolve os blastos de quartzo e carbonato. O carbonato possui granulação fina a média, é comumente estirado e orientado oblíquo a foliação, pode possuir textura nematoblástica ou granoblástica com hábito subédrico a euédrico e bordas poligonais. O quartzo possui granulação fina a média, ocorre associado ao carbonato com contatos interlobados ou poligonais, hábito anédrico a subédrico. Ocorrem vênulas de quartzo com grãos de granulação média. Os opacos são principalmente pirrotita, locamente substituída por pirita, e arsenopirita. A pirrotita possui granulação fina a média e locamente pode ocorrer em granulação grossa, com hábito euédricas a subédricas, porosas, com bordas irregulares e ocorrem associadas as faixas com carbonato orientadas segundo a foliação. A pirita ocorre substituindo a pirrotita localmente, com hábito euédrico e granulação média a grossa. Arsenopirita ocorre em granulação muito fina a fina nas zonas sericíticas.

Classificação da rocha: Quartzo-sericita-carbonato xisto

#### Fotomicrografias



### FICHA DE DESCRIÇÃO PETROGRÁFICA

Amostra: VQZ-74-VQCAPY

Furo: VQZBUD0374

Profundidade: 28,00 m

Teor: 3,09 g/t

Descrição macroscópica: Quartzo-carbonato-sericita xisto



### DESCRIÇÃO MICROSCÓPICA

#### Mineralogia identificada (ordem decrescente de abundância)

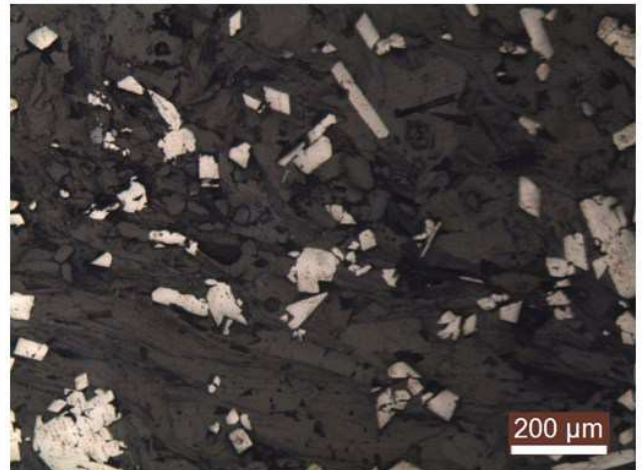
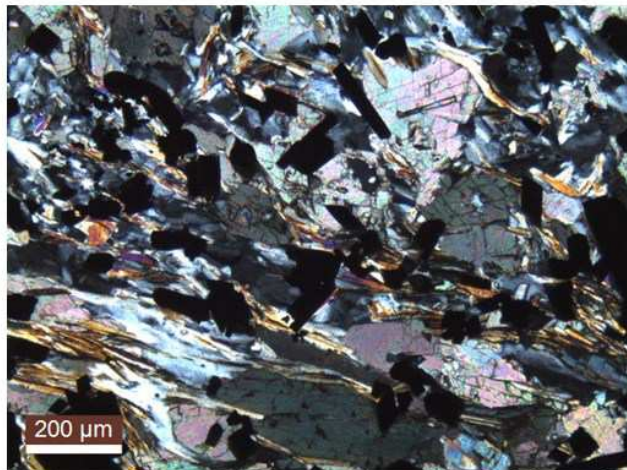
<b>Minerais principais</b>	Carbonato (50%), sericita (30%), quartzo (15%)
<b>Minerais acessórios</b>	Pirita e arsenopirita (< 1%)
<b>Alteração</b>	Sericitização

#### Descrição microscópica

Amostra composta por 50% de carbonato (cb), 30% de sericita (ser), 15% de quartzo (qtz) e <5% de opacos (pirrotita, po; pirita, py; arsenopirita, apy). Apresenta textura nematoblástica e lepidoblástica com clivagem espaçada e em menor ocorrência clivagem de crenulação, marcadas pela sericita. A sericita ocorre principalmente no domínio da clivagem, possui granulação muito fina a fina, hábito lamelar e na matriz envolve os blastos de quartzo e carbonato. O carbonato possui granulação fina a média, é comumente estirado e orientado oblíquo a foliação, pode possuir textura nematoblástica ou granoblástica com hábito subédrico a euédrico e bordas poligonais. O quartzo possui granulação fina a média, ocorre associado ao carbonato com contatos interlobados ou poligonais, hábito anédrico a subédrico. Os opacos são principalmente pirita e arsenopirita. A pirita ocorre com hábito euédrico e granulação média a grossa, e arsenopirita ocorre em granulação muito fina a fina nas zonas sericíticas.

Classificação da rocha: Quartzo-sericita-carbonato xisto

#### Fotomicrografias





### FICHA DE DESCRIÇÃO PETROGRÁFICA

Amostra: VQZ-74-VQC

Furo: VQZBUD0374

Profundidade: 28,70 m

Teor: 28,38 g/t

Descrição macroscópica: Clorita-quartzo-carbonato xisto com venulação quartzo-carbonática intensa



### DESCRIÇÃO MICROSCÓPICA

#### Mineralogia identificada (ordem decrescente de abundância)

<b>Minerais principais</b>	Quartzo (95%), carbonato (5%)
<b>Minerais acessórios</b>	Pirita (< 1%)
<b>Alteração</b>	Silicificação

#### Descrição microscópica

Amostra composta por 95% de quartzo (qtz), 5% de carbonato (cb), <1% de pirita (py). Apresenta textura predominantemente granoblástica. O quartzo possui granulação fina a grossa e ocorre associado ao carbonato na matriz com contatos interlobados ou poligonais, hábito anédrico a subédrico. Em algumas zonas silicificadas o quartzo ocorre com granulação grossa a muito grossa, variedade fumê, hábito euédrico a subédrito em contatos poligonais com outros grãos de quartzo ou em contato serrilhado. O carbonato possui granulação fina, é comumente euédrico, localmente estirado, e pode possuir textura nematoblástica ou granoblástica com bordas poligonais. Ocorre pirita de granulação fina a média, dispersa na matriz.

Classificação da rocha: Veio de quartzo

#### Fotomicrografias

