

MINERALOGIA E QUÍMICA DO MINÉRIO DE Au-Cu (Bi) DO DEPÓSITO POMBO (TERRA NOVA DO NORTE – MT)

JOÃO CARLOS BIONDI¹, NILTON D. FRANKE², PAULO R. S. DE CARVALHO³
& SANDRO N. VILLANOVA³

Resumo No depósito de Au-Cu (Bi) Pombo são conhecidos dois tipos de minério. O minério de “superficial” ou “raso”, situado a menos de 40 metros da superfície atual, ocorre disseminado e em veios, é composto por quartzo, muscovita, pirita, sulfetos de Cu, sulfossais de Cu, Bi e Ag, 7,3 a 10,3 g Au/ton e 0,4% de Cu. O minério “profundo” ocorre a mais de 40 metros da superfície atual. É composto por quartzo, clorita, muscovita e pirita aurifera, sem sulfetos de Cu nem sulfossais, e 0,5 a 4,5 g Au/ton. Parte do minério “superficial” é supergênico e seu principal sulfeto é a pirita, secundada pela calcopirita e pela digenita/calcocite e covelita. A galena foi encontrada em somente uma amostra. Sulfetos e sulfossais formam duas séries de solução sólidas. A primeira inclui minerais que variam desde o “mineral X” [$\text{Bi}_{6,441}\text{Fe}_{0,190}(\text{Ag}_{1,005}\text{Cu}_{1,140})\text{S}_{11,001}$], comparável à bismutinita, até a emplectita (CuBiS_2). Nesta série está o mineral $\text{Cu}_{14,10}\text{Bi}_{16,92}\text{Ag}_{2,01}\text{S}_{35}$ semelhante ao IMA2001-002 ($\text{Cu}_{17}\text{Bi}_{17}\text{S}_{35}$), porém com prata. Uma outra solução sólida existe entre a digenita/calcocite e um mineral com composição igual a da covelita “blaubleiblender”. Fazem parte dessa série o “mineral Y” ($\text{Cu}_{2,048}\text{Fe}_{0,022}\text{S}_{1,906} \approx \text{Cu}_2\text{S}_2$) e o “mineral Z” ($\text{Cu}_{4,017}\text{Fe}_{0,014}\text{S}_{5,933} \approx \text{Cu}_4\text{S}_6$), não mencionados na literatura. A wittichenita (Cu_3BiS_3) situa-se entre as duas séries. Nesse minério o ouro, com composição média $\text{Au}_{64,32}\text{Ag}_{34,93}\text{Cu}_{0,68}$, cristalizou junto à muscovita 3, quartzo 3, calcopirita, emplectita, “IMA2001-002” e a pirita 2. O único sulfeto do minério “profundo” é a pirita 1, com poucas microinclusões de galena e esfalerita. Em apenas uma amostra o ouro foi identificado dentro da pirita 1. Os espectros de ETR e os dos elementos do diagrama multielementar dos minérios e das rochas encaixantes têm a mesma forma. A diminuição gradacional da $\sum\text{ETR}$ das amostras de minério “profundo” até as de minério “superficial” indica que o minério formou-se pela substituição do granito por quartzo e pelos sulfetos, causada por fluidos cujas composições foram induzidas pelo granito. Os minérios têm “assinaturas” geoquímicas semelhantes às do granito e das rochas encaixantes.

Palavras Chave: Depósito Pombo (MT), depósito de Au-Cu (Bi), química mineral, química de minério de Au-Cu.

Abstract *MINERALOGY AND CHEMISTRY OF THE Au-Cu (Bi) ORE FROM POMBO DEPOSIT (Terra Nova do Norte, MT, Brazil).* At Pombo Au-Cu (Bi) deposit two types of ores are known. The disseminated and lode “shallow” ore is composed by quartz, muscovite, pyrite, Cu sulfides, Cu-Bi-Ag sulfossalts, 7,3 to 10,3 g Au/ton and 0,4% Cu. The “deep” ore contains quartz, chlorite, muscovite and pyrite, without Cu sulfides nor sulfossalts, and with 0,5 to 4,5 g Au/ton. The sub-surface ore is supergenic and its main sulfide is pyrite, followed by chalcopyrite, digenite/calcoosite and covelite. Galena was found at only one sample. Sulfides and sulfossalts occur in two solid-solution series. One contains minerals with compositions between the “X mineral” [$\text{Bi}_{6,441}\text{Fe}_{0,190}(\text{Ag}_{1,005}\text{Cu}_{1,140})\text{S}_{11,001}$], comparable to bismutinite, and emblectite (CuBiS_2). The mineral $\text{Cu}_{14,10}\text{Bi}_{16,92}\text{Ag}_{2,01}\text{S}_{35}$, similar to IMA2001-002 ($\text{Cu}_{17}\text{Bi}_{17}\text{S}_{35}$) but with silver, is included in this series. Another solid solution series exists between digenite/calcoosite and a mineral with the same composition of “blaubleiblender” covelite. These series includes the “Y mineral” ($\text{Cu}_{2,048}\text{Fe}_{0,022}\text{S}_{1,906} \approx \text{Cu}_2\text{S}_2$) and the “Z mineral” ($\text{Cu}_{4,017}\text{Fe}_{0,014}\text{S}_{5,933} \approx \text{Cu}_4\text{S}_6$), both not mentioned in the literature. The wittichenite (Cu_3BiS_3) is in the middle of these two series. The gold has crystallized in the sub-surface ore with average composition $\text{Au}_{64,32}\text{Ag}_{34,93}\text{Cu}_{0,68}$ together with muscovite 3, quartz 3, chalcopyrite, emblectite, “IMA2001-002” and pyrite 2. The only sulfide of the deep ore is pyrite 1, with very few micro-inclusions of sphalerite and galena. Gold has been seen in only one sample among described samples of the deep ore. The host, altered, rocks and the ores have similar REE and the multi-elemental diagram trends. The gradual decrease of $\sum\text{REE}$ from deep to subsurface ore suggests that ore has been formed by replacement of granite by quartz, muscovite and sulfides, made by fluids which compositions were induced by granite. The ores, the Pombo granite and the host rocks have similar geochemical signatures.

Keywords: Pombo Deposit (Brazil - MT), Au-Cu (Bi) ore deposit, mineral chemistry, Au-Cu ore chemistry.

INTRODUÇÃO

Localização e geologia regional O depósito de Au-Cu (Bi) Pombo (Biondi 2005) contém mineralização em veios e disseminada composta por quartzo + muscovita com pirita e sulfetos de cobre, com teores médios de Au entre 7,3 e 10,3 g/ton e 0,4% de Cu. O biotita-hornblenda granito do Pombo, que contém o depósito homônimo, é uma das intrusões do batolito Terra Nova (Fig. 1.A), constituído por granitos cálcio-alcalinos a alcalinos, metaluminosos a peraluminosos, formados em ambiente de arco magmático, provavelmente em época pós-colisional. É um granito tipo I, a magnetita (ilmenita), semelhante aos granitos fracionados tipo I, não empobrecidos em Y e empobrecidos em Sr, da Austrália (Wyborn *et al.* 1992), formados a grandes profundidades, geralmente maiores que 35 Km (10 Kb).

Geologia do depósito Na região do depósito (Fig. 1.B, em Biondi 2005) aflora grande quantidade de veios de quartzo leitoso com pirita, cujas espessuras variam de alguns centímetros a poucos metros e seus comprimentos alcançam mais de um quilômetro. Esses veios marcam o contato oeste da intrusão e ocorrem também no seu interior e nas suas encaixantes. Embora a direção predominante seja N45-55E existem veios desse tipo com outras direções.

O corpo mineralizado principal (corpo 1, Fig. 1.B) do depósito Pombo é um veio de quartzo + muscovita, com atitude geral N45E/85NW, sulfetado e com ouro. A parte central, lavrada por garimpeiros, tem entre 2 e 4 metros de espessura de sulfeto maciço. O veio principal tem extensão de 800 metros e espessura entre 0,5 e 10 metros. Bifurca-se em um outro veio de

1 - UFPR, Depto de Geologia. C.P. 19.001, 81.531-990 (Curitiba-BR), jcbiondi@ufpr.br

2 - TeckComico S.A. – Rua São Domingos 284 (Santa Fé de Goiás – GO)

3 - SERABI Mineração Ltda - Av. Antônio Pádua Gomes 737 (Itaituba, PA)

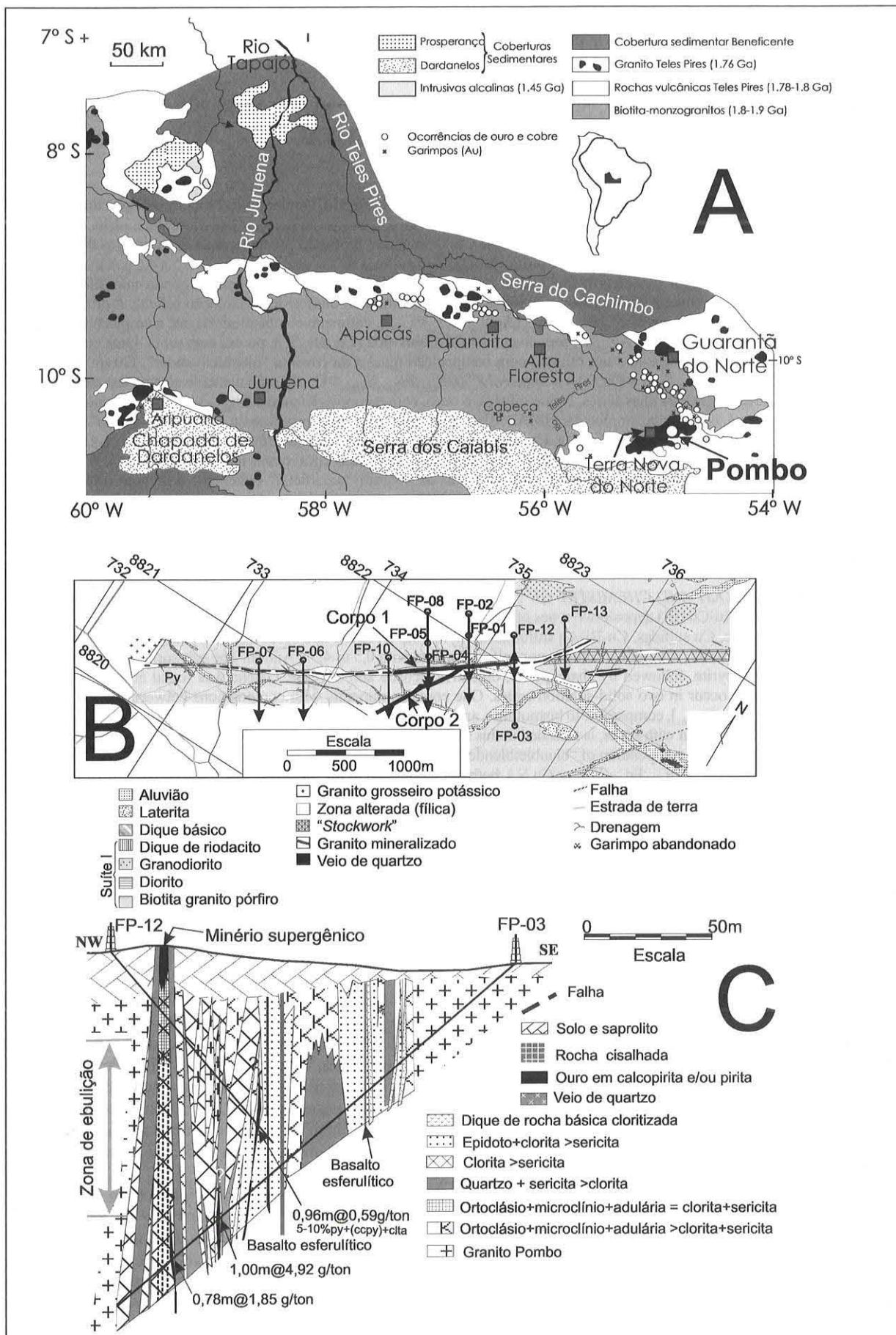


Figura 1 – (A) Localização do depósito e geologia regional da área onde está situado o depósito de Au-Cu (Bi). Pombo. (B) Mapa geológico do depósito Pombo e localização das sondagens feitas no local. (C) Seção geológica FP-12 – FP-03 feita no depósito Pombo.

igual composição, com espessura média de dois metros (corpo 2), comprimento de 300 metros e direção N30E. O corpo mineralizado principal aflora no meio de uma zona silicificada e muscovitizada com largura entre 10 e 200 metros e comprimento de 4,0 Km que, na parte NE, transforma-se em uma faixa de “*stockwork*” cimentado por quartzo.

Os teores médios do corpo mineralizado principal são 10,3 g Au/ton e 0,4% Cu. Os teores de cobre mudam muito rapidamente ao longo do veio, variando entre 0,1% e 3,2%. Este corpo termina em ramificações nas quais os teores caem para 1,1 g Au/ton. O corpo nº 2 tem teores médios de 7,3 g Au/ton e 0,4% Cu. Cerca de 100 metros a leste do corpo principal de sulfeto maciço ocorre uma zona de minério disseminado com cerca de 6 metros de largura e extensão ainda não definida. Esse minério tem teores entre 1,5 e 12,1 g Au/ton e envolve um veio de quartzo com cerca de 20 metros de comprimento cujo teor médio é 29,3 g Au/ton (Biondi 2005).

Zonas de alteração pós-magnética e hidrotermal A figura 1C é a seção geológica que contém as sondagens FP-12 e FP-03. A sondagem FP-03, devido a ser aquela que interceptou a maior variedade de fácies de alteração hidrotermal e de minérios, foi amostrada e analisada com maior detalhe que as outras sondagens (Biondi 2005). As informações obtidas das amostras dessa sondagem são as mais usadas nesse trabalho.

Todas as rochas do batolito Terra Nova sofreram alterações pós-magnéticas de abrangência regional, que cloritizaram hornblenda e biotita, damouritzaram o núcleo do feldspato, disseminaram sericita e cristalizaram franjas de albíta em torno do feldspato. Intrusões de diorito, microdioritos, riódacitos e basaltos que estão alojadas no granito Pombo e em suas encaixantes apresentam o mesmo tipo de alteração regional.

Biondi (2005) identificou em torno dos corpos mineralizados de depósito Pombo ao menos cinco fases de alteração hidrotermal, que sucederam à alteração tardí-magnética regional. A primeira fase foi sódica e foi seguida pela potássica, pela propilitica e pela filica. A última fase hidrotermal, relacionada à falhas e fraturas, foi responsável pela maior parte da mineralização em ouro e cobre, gerando um minério composto por quartzo, muscovita, pirita e sulfetos e sulfossais de cobre. O estudo quantitativo da mobilidade dos elementos revelou que durante a alteração tardí-magnética houve ganho em Na₂O, CaO e Al₂O₃ e perda de K₂O. Entre os elementos traço, houve perda somente de Pb, U, Y e V e um notável ganho em Zn. A alteração tardí-magnética foi seguida pela alteração hidrotermal sódica, que gerou cristais novos de albíta e cristalizou pertita. Na alteração potássica houve ganho de K₂O, Al₂O₃, TiO₂, CaO, MgO e FeO e um excepcional ganho em FeO relacionado à intensa piritização. Também houve ganho em Ba, Rb e Cs, e o ganho em Zn explica as micro-inclusões de esfalerita e calcopirita na pirita do minério “profundo”. A alteração propilitica se superpõe a potássica. Na propilitização somente os teores de K₂O e de Fe₂O₃ diminuiram. Houve ganho em FeO, MgO, CaO, TiO₂, Zr e P₂O₅. O hidrotermalismo filico disseminou “sericita” sobre todas as zonas anteriormente formadas e cristalizou muscovita e clorita na matriz. Nesta fase houve disseminação de pirita euédrica com micro-inclusões de calcopirita (raras), de galena e muito pouco ouro. Durante a alteração relacionada às falhas as rochas foram pigmentadas com óxido de ferro e silicificadas por um fluido mineralizador fluorado, com S, Fe e Au. Surgiu a paragênese quartzo + muscovita + carbonato + clorita + pirita + OURO, que tipifica o minério “profundo”. Esta alteração destaca-se pelo enorme ganho em FeO, MgO, CaO e K₂O e pela lixiviação do Na₂O.

A zona de alteração pós-magnética é enriquecida em ETR leves e empobrecida em ETR pesadas e a superposição da alte-

ração sódico-potássica hidrotermal acentuou esta tendência. A zona propilitica se sobrepõe à zona potássica, e a propilitização + carbonatização atingiu todas as rochas. Os fluidos que causaram as alterações hidrotermais lixivaram igual e proporcionalmente todos ETR (Biondi 2005).

Mineralogia do granito Pombo e das zonas de alteração

– Todo anfibólio do granito e das zonas de alteração é cálcico (Biondi 2005). O anfibólio 1 (Fig. 2), magmático, é uma magnésio-hornblenda. A alteração pós-magnética cristalizou tschermakita-hornblenda (anfibólio 2) e a propilitização cristalizou actinolita-hornblenda (anfibólio 3). Durante a alteração pós-magnética houve damouritzação dos núcleos e sodificação das bordas do feldspato magmático (FK1, plagioclase 1 e 2), com cristalização de franjas de albíta. Em seguida, a alteração sódica cristalizou franjas de oligoclásio - albíta (plagioclase 4), em volta do FK2 e do plagioclase 3, pertitizou o feldspato potássico (FK3) e cristalizou albíta (plagioclase 5). Na sequência, a alteração potássica cristalizou microclínio (FK4) e biotita (biotita 3). A clorita ocupa os domínios da ripidolita, da brusnigita e da picnoclora, com maior concentração no domínio da picnoclora. A clorita 1, 2 e a 3 é pós-magnética, a 4 é propilitica, a 5 é da zona filica e a 6 faz parte da paragênese do minério. A biotita 1 é magmática, a 2 é pós-magnética, gerada pela alteração da hornblenda magnética, e a biotita 3 é hidrotermal, cristalizada na zona potássica ao mesmo tempo que o FK4. Não foi possível analisar a muscovita 1. A muscovita 2 e a 3 são fengita, pouco mais silicosa que a muscovita padrão. O esfeno magmático 1, tem mais La₂O₃ + Ce₂O₃, BaO e Nb₂O₅ que o esfeno 2, hidrotermal, que ocorre sempre dentro da clorita 4. Glomérulos ovalados e zonados de microcristais de um “minério X”, não identificado, ocorrem dentro de clorita 4, associados à inclusões de esfeno 2, titanomagnetita e fluorapatita. O “minério X” tem mais CaO e menos Fe₂O₃, Al₂O₃ e TiO₂ que a pumpeliita/julgoldita, com as quais se assemelha quimicamente (Biondi 2005).

PETROGRAFIA DO MINÉRIO

A figura 2 mostra a sucessão da cristalização dos minerais que compõem os minérios do Pombo e as paragêneses das zonas mineralizadas geneticamente relacionadas à mineralização (Biondi 2005).

O minério “profundo” foi interceptado por sondagens (Fig. 1.C) sempre a mais de 35 metros da superfície atual. Este minério é composto por quartzo 3, clorita 6, muscovita 3, carbonato 2, pirita 1, euédrica, e pirita 2, anédrica, com ouro, sem sulfetos de cobre nem sulfossais de cobre e bismuto (Fig. 2). Têm contactos gradacionais para granito silicificado e potassificado cor cinza-amarelada (Biondi 2005). Os teores de ouro são baixos (< 2g Au/ton) e o ouro está nas piritas. Há duas gerações de pirita (pirita 1 e 2) que, embora tenham composições iguais, diferenciam-se pelas paragêneses às quais pertencem, pelo hábito cristalino e pelas fases de alteração nas quais se formaram. A pirita 1 (Figs. 2, 3.A a D e 5.B e E) formou-se durante a alteração filica, é euédrica e ocorre disseminada nos dois tipos de minério e em todas as rochas que envolvem os corpos mineralizados. Apesar de uma vez ter sido encontrado ouro em uma micro-fratura de um cristal de pirita dessa fase. Como esta pirita foi preservada e foi envolvida por minerais da fase de mineralização principal (ouro 2, na figura 2), há dúvida se este ouro (ouro 1, na figura 2) foi precipitado durante a alteração filica ou pertence à fase principal de mineralização (ouro 2), que sucedeu à alteração filica. A pirita 2 (Figs. 2, 4.A a D e 5.A e C) é anédrica e tem micro-inclusões de calcopirita (rara) e esfalerita e formou-se ao mesmo tempo que os sulfetos de cobre e os sulfossais de cobre e bismuto.

Nas frentes de lavra, atualmente a profundidades entre 19 e 21 metros, os principais corpos mineralizados (corpos 1 e 2) do depósito Pombo são veios com quartzo 3, pirita 1 e 2 e mus-

Figura 2 - Sucessão na cristalização de minerais gerados durante a alteração hipogênica e a mineralização do granito Pombo na área do depósito de Au-Cu (Bi) homônimo. Abreviaturas: Anf = anfibólio, Hnb = hornblenda, Tchk = tschermark, Bt = biotita, Anit = anita, Fk = feldspato potássico, Plg = plagioclásio, Alb = albita, Olig = oligoclásio, Scta = sericita, Qzo = quartzo, Apt = apatita, Mgt = magnetita, Hmt = hematita, Ilmt = ilmenita, Esf = esfeno ou titâmita, Clt = clorita, MinX = mineral X (não classificado no arquivo da IMA – “International Mineralogical Association”), Cabto = carbonato, Ept = epidoto, Mcta = muscovita, Pig = pigmento, Prita = piritita, Eplt = emplectita, Bsta = bismutinita, Wit = Wittichenita, Ccpy = calcopirita, Gal = galena, Dig = digenita, Cov = covelita e IMA2001-002 = Segundo mineral (002) proposto para ser classificado pela IMA (“International Mineralogical Association”) em 2001.

covita 3, com sulfetos de cobre e sulfossais de cobre e bismuto, com ouro, sem clorita 6 nem carbonato 2. Esse minério será denominado minério “raso”. Aflora com três fácies diferentes: (a) Fácies sulfeto maciço cuja composição média é ≈10% de quartzo 3, ≈5% de muscovita 3, 50-60% de pirita 1 e 2, ≈10% de calcopirita, ≈14% digenita+covelita, ≈1% de sulfossais de Cu, Bi e Ag e ouro; (b) Fácies silicificado sulfetado com composição média de ≈40% de quartzo 3, ≈15% de muscovita 3, 25-30% de pirita 1 e 2, ≈10% de calcopirita, ≈5% digenita+covelita, <0,5% de sulfossais de Cu, Bi e Ag e ouro e; (c) Fácies silicificado pouco sulfetado composto por ≈50% de quartzo 3, ≈25% de muscovita 3, ≈20% de pirita 1 e 2, ≈5% de calcopirita, digenita, covelita e ouro. Essas três fácies ocorrem em proporções variadas ao longo do corpo mineralizado. Há, portanto, diferenças composticionais e texturais marcantes entre os dois tipos de minério. As 12 sondagens que interceptam os corpos mineralizados mostram que a gradação do minério “profundo” para o “raso” é rápida, ocorrendo em um intervalo de cerca de 10 metros, entre 30 e 40 metros abaixo da superfície atual.

O minério de “raso” tem pirita 1 e 2. O sulfeto mais presente é a pirita 2, maciça, anédrica e fraturada (Figs. 3.A, B, C e D e 5.A e C), intercrescida com quartzo 3 e muscovita 3 (Fig. 2). A calcopirita cristalizou nos espaços vazios, nas fraturas da pirita 1 e 2, do quartzo 3 (Figs. 3.B, C e D) e substituindo “gauge”. Por ser zona de cimentação ativa (abaixo da superfície freática), a calcopirita primária foi e está sendo substituída por digenita (Figs. 3.B, C e F; 4.C e D; 5.D) que por sua vez foi e está sendo substituída por covelita e calcosita pulverulenta (“sooty chalcocite”) (Figs. 3.C e F). Provavelmente a wittichenita (Cu_3BiS_3) cristalizou antes da calcopirita, por isso aparece no minério como inclusões na calcopirita/digenita (Fig. 3.B) ou envolvendo a pirita 1 (Fig. 3.A). Minerais que constituem uma série de solução sólida desde a emplectita (BiCuS_2) até a bismutinita (Bi_2S_3), passando por um sulfossal de Bi denominado IMA-2001-002 (Com fórmula $\text{Bi}_{17}\text{Cu}_{17}\text{S}_{35}$ este mineral é semelhante a emplectita. Tem esta denominação por estar na lista da IMA – “International Mineralogical Association” - desde 2001 aguardando a confirmação de sua existência e o seu batismo definitivo. No caso específico do Pombo, este mineral tem prata em quantidade maior que aquele apresentado no arquivo da IMA. Esta característica será discutida posteriormente) substituiram parcialmente a wittichenita (Uyttenbogaardt & Burke, 1973, p.295) (Fig. 5.C) e ocorrem intercrescidos com a calcopirita (Fig. 3.E). Todos esses sulfetos, com exceção da pirita 1, cristalizaram na última fase de alteração hidrotermal (Biondi 2005), relacionada a falhas e fraturas (Fig. 2).

O ouro ocorre dentro do quartzo 3 (Figs. 4.A, C e D), dentro da pirita 2 (Fig. 5.A), dentro da wittichenita (Fig. 3.A) e dentro da calcopirita/emplectita/digenita (Figs. 4.B e 5.A e C).

As figuras 4.C e D mostram uma fratura dentro da pirita 2, revestida por calcopirita parcialmente substituída por digenita/ covelita, com a parte central preenchida por quartzo 3. O ouro está dentro da calcopirita/digenita e dentro do quartzo 3. Esta associação, vista também nas figuras 4.A e B, sugere que o ouro tenha precipitado ao mesmo tempo que a calcopirita e o quartzo 3, na fase final de preenchimento das fraturas. Pela quantidade de ocorrências desse tipo que foram descritas, essa deve ter sido a principal fase de precipitação do ouro.

A presença de inclusão de ouro na wittichenita (Figs. 3.A e 4.B) sugere que houve uma fase de precipitação de ouro anterior a principal. Embora as evidências não sejam conclusivas, se efetivamente esta primeira fase de precipitação do ouro ocorreu ela poderia explicar o minério “profundo”, que aparentemente tem ouro em meio a silicatos e pirita 1 com micro-inclusões de calcopirita e esfalerita.

QUÍMICA DOS MINERAIS METÁLICOS DO MINÉRIO

Procedimento analítico Os minerais metálicos dos minérios do Pombo foram analisados com a microsonda eletrônica CAMECA SX-50 do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, operando a 20 KV e 40 nA. Para analisar ouro o tempo de contagem foi de 70 segundos, de 30 segundos para a prata e 10 segundos para os demais elementos metálicos. Foram utilizados os padrões fornecidos pela CAMECA. Foram analisados minerais de 13 seções polidas selecionadas de um total de 27 seções descritas.

Sulfetos de ferro, de cobre e de cobre e ferro Foram analisados 28 cristais de sulfetos de Cu e Fe, entre os quais 11 foram sulfeto de Fe e Cu de composição igual a da calcopirita (CuFeS_2) (Tabela 1), 8 foram sulfetos de Cu com composições variando entre a da covelita (CuS) e a calcosita (Cu_2S) (Tabela 2) e 9 foram sulfeto de Fe com composição de pirita 1 e 2 (FeS_2) (Tabela 3). As relações composticional e textural existentes entre estes sulfetos pode ser vista nas figuras 6 e 7.

As composições da pirita 1 e 2 (Fig. 6, ponto 10 e Fig. 7) e da calcopirita (Fig. 6, pontos 2, 3, 4 e 9 e Fig. 6) são idênticas às da pirita e da calcopirita padrão, respectivamente. Além da calcopirita, é provável que a calcosita também tenha sido mineral primário, cristalizado a baixa profundidade e a temperatura menor que 400°C. O que permite esta interpretação é que no minério do Pombo não há bornita ou qualquer outro sulfeto com composição intermediária entre calcopirita e a digenita-calcosita (Fig. 7). Como as amostras analisadas são de zonas de enriquecimento supergênico (=cimentação), se a calcosita fosse secundária existiriam sulfetos com composições intermediárias. A calcosita primária recristalizou toda para digenita e uma mistura microcristalina de calcosita + digenita + covelita (“sooty chalcocite”, Uyttenbogaardt & Burke 1973, p.59 e Figs. 3.C e F e 5.D). Ainda devido ao enriquecimento supergênico, portanto a temperaturas menores que 83°C (Figueiredo 2000, p.73-75), a digenita provavelmente recebeu cobre e enxofre lixividos da zona oxidada “superficial” e recristalizou na forma de covelita, um sulfeto mais rico em cobre (=cimentação). Este processo provavelmente ainda está ativo, dado que no minério existem sulfetos com composições intermediárias entre calcosita/digenita e covelita (Figs. 6 e 7) denominados mineral “y” ($\text{Cu}_{2,048}\text{Fe}_{0,022}\text{S}_{1,906} \approx \text{Cu}_2\text{S}_2$) e mineral “z” ($\text{Cu}_{4,017}\text{Fe}_{0,014}\text{S}_{5,933} \approx \text{Cu}_4\text{S}_6$), situados entre os pontos da calcosita/digenita e da covelita padrão no triângulo Cu-S-Fe (Tabela 2 e Fig. 7).

Sulfossais de cobre, bismuto e prata Foram feitas 24 análises de sulfossais de Cu, Bi e Ag em amostras do minério do Pombo, coletadas na zona de cimentação (=enriquecimento supergênico). Os resultados das análises estão nas Tabelas 4 e 5.

Sulfossais de Cu e Bi constituem o Grupo da Emplectita (Guillemin & Ovtracht 1960, p. 94-95), do qual fazem parte a calcostibinita (CuSbS_2), a emplectita (CuBiS_2) e a wittichenita (Cu_3BiS_3). O mineral IMA-2001-002, caso tenha sua existência confirmada e venha a ter um nome definitivo, deverá integrar este grupo. São minerais raros, confundidos com a bournonita devido a semelhança de suas propriedades óticas, que foram descobertos em Schlaggenwald (Bohemia), na República Tcheca (Guillemin & Ovtracht 1960). A emplectita (Tabela 5 e Figs. 5.C, 6.C, 8.D e 9.B) é branca amarelada ou azulada com tons amarronzados. Não tem birreflexância e se caracteriza pela anisotropia forte em cores marrom, azul e violeta escura, única característica ótica que a diferencia da wittichenita (Tabela 5 e Figs. 3.A e 4.B), desprovida de anisotropia. O IMA-2001-002 (Tabela 4 e Figs. 5.C, 8.D e 9.B) tem cor marrom, azul ou creme e anisotropia fraca (“Mineralogical Database”, site do IMA na internet).

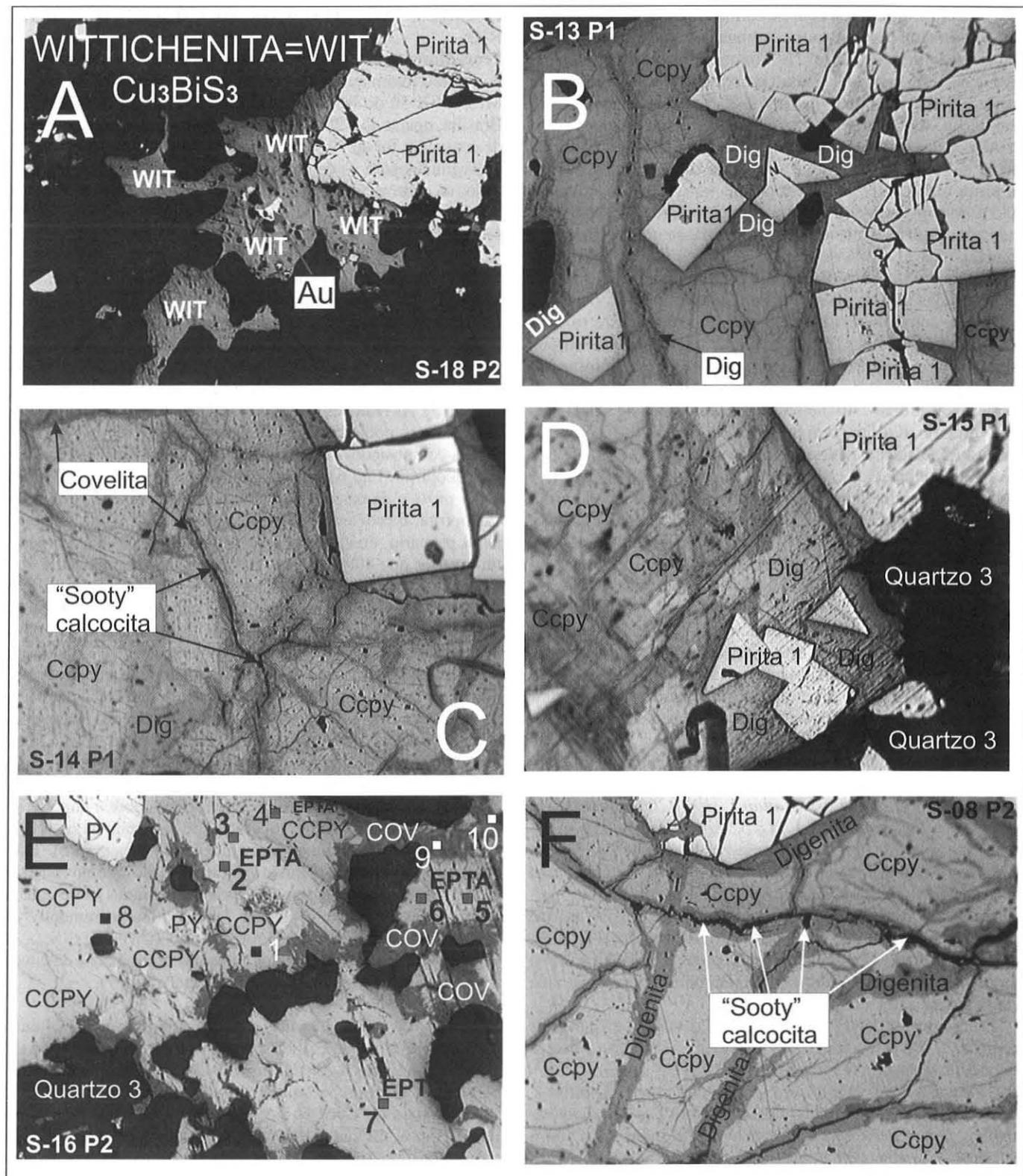


Figura 3 - Paragênese e textura do minério “superficial” do depósito de Au-Cu (Bi) Pombo (MT). (A) Inclusão de ouro em wittichenita. (B) Pirlita 1, euédrica, envolvida por calcopirita com vénulas de digenita /covelita. (C) Pirlita 1, euédrica, envolvida por calcopirita com vénulas de digenita /covelita e calcocita microgranular preta. (D) Pirlita 1, euédrica, envolvida por calcopirita com vénulas de digenita /covelita. (E) Intercrescimento calcopirita e emplectita (epita) parcialmente substituído por covelita (cov). (F) Pirlita 1, euédrica, envolvida por calcopirita com vénulas de digenita /covelita e calcocita microgranular preta.

As figuras 8.A e B são duas imagens da wittichenita encontrada no Pombo. Uma dentro de quartzo 3, com inclusão de ouro (Fig. 8.A) e outra em uma vénula entre um grande cristal de pirlita 2 e outro de quartzo 3 (Fig. 8.B), onde ocorre junto a digenita,

covelita e ouro. A figura 8.D mostra a emplectita, um mineral com composição semelhante ao IMA-2001-002 e diversos cristais com composições intermediárias entre a emplectita e a bismutinita, conforme mostrado no triângulo S-Cu-Bi (Fig. 8.C e

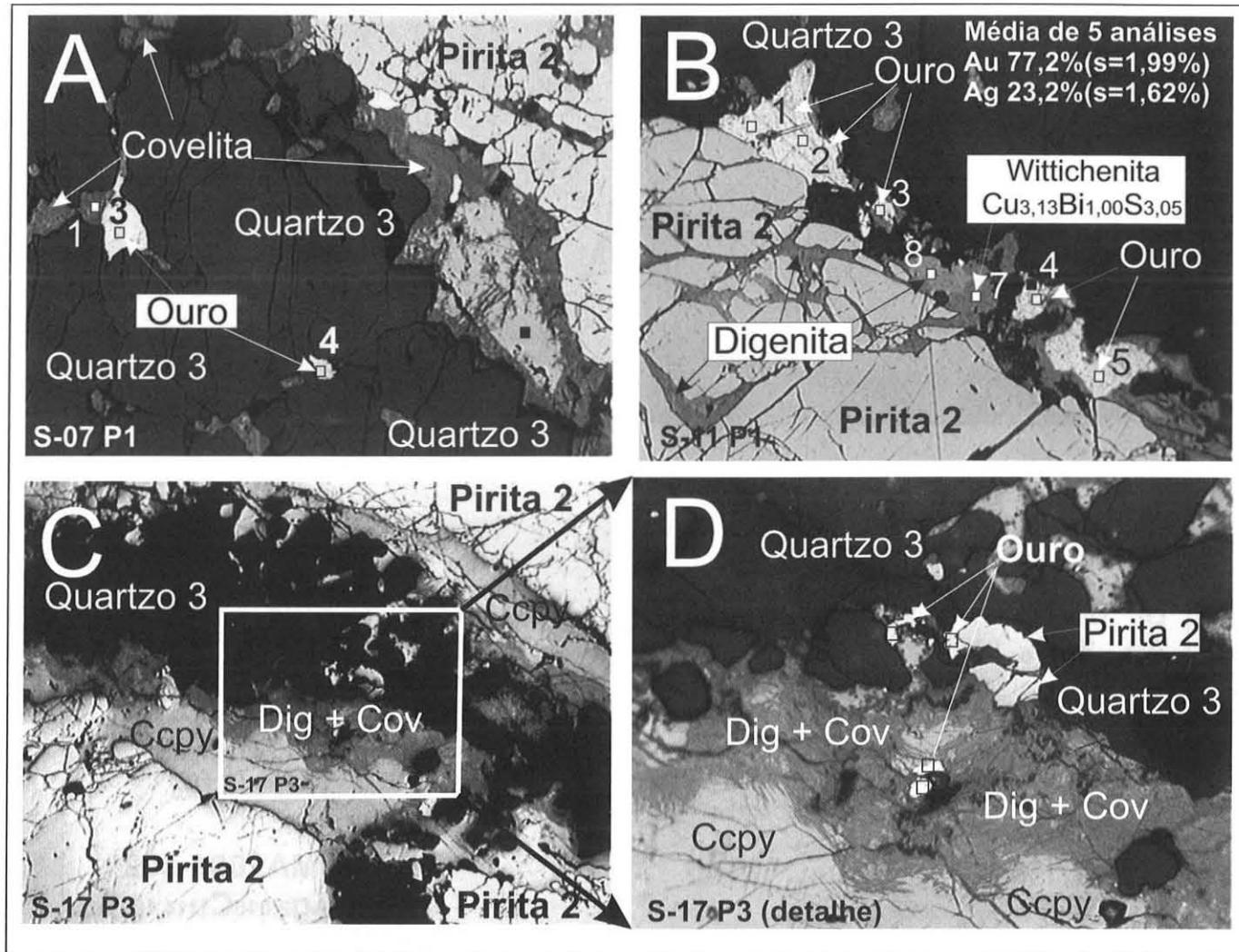


Figura 4 - Paragênese e textura do minério “raso” do depósito de Au-Cu (Bi) Pombo (MT). (A) Ouro em fraturas de quartzo 3. (B) Ouro dentro de wittichenita e calcopirita/digenita, em fraturas dentro de quartzo 3 e pirita 2. (C e D) Fratura em pirita 2 revestida por calcopirita parcialmente substituída por digenita+covelita e preenchida por quartzo. O ouro está dentro da calcopirita/digenita e do quartzo 3.

9.C), no triângulo Cu-10Ag-Bi (Fig. 9.A) e nos diagramas Cu vs. Bi e Ag vs. Bi (Figs. 10.A e B). Notar (Tabela 4 e Figs. 8.D e 9.A, B e C) que o mineral que aqui está sendo denominado IMA-2001-002 diferencia-se daquele que consta no banco de dados da IMA por ter até 3,8% de prata. Como diversos cristais analisados nas amostras S17 e S19 (Tabela 4 e Figs. 7.C e .D, 9. A, B e C e 10.A e B) têm teores elevados de prata, o mineral benjaminita $[(\text{Ag}, \text{Cu})_3(\text{Bi}, \text{Pb}), \text{S}_2]$ foi posto como referência nos triângulos S-Cu-Bi, das figuras. 8.C e 9.C, Cu-10Ag-Bi, da figura 9.A e nos diagramas Cu vs. Bi e Ag vs Bi (Figs. 10.A e B). Isto foi feito para testar a possibilidade de existir no minério do Pombo minerais cujas composições variem formando a série de solução sólida wittichenita – emplectita – IMA-2001-002 – benjaminita. Constatou-se, entretanto, que a graduação existe da emplectita até quase a bismutinita (ver na Tabela 4 e nas figuras 8.C, 9.A e 9.C o “mineral metálico X” = $\text{Bi}_{6,441}\text{Fe}_{0,190}(\text{Ag}_{1,005}\text{Cu}_{1,140})\text{S}_{11,001}$), incluindo o IMA-2001-002. A wittichenita e cristais com composições semelhantes à da covelita “blaubleiblender” (Fig. 8.C) alinharam-se com esses minerais (Figueiredo 2000, p. 74 e 77), mas ocupam posições isoladas nos triângulos S-Cu-Bi (Figs. 8.C, 9.C e 10.A e B). A inexistência de minerais em posições intermediárias não permite reconhecê-los como pertencentes à mesma série de solução sólida. Isto fica mais evidente no diagrama Ag vs. Bi

e Cu vs. Bi (Figs. 10.A e B).

Sulfetos de chumbo e de zinco A galena é muito pouco freqüente nos minérios “profundo” e “raso”. Foi descrita em apenas uma amostra coletada na zona de cimentação do corpo mineralizado. No minério “profundo” raros cristais de pirita 1 têm micro-inclusões de galena e de esfalerita,

Ouro e prata Foram feitas 20 análises em cristais de ouro encontrados em 5 amostras de minério coletadas no corpo mineralizado principal (amostras PB-SV-111A, 110A, 109B, 97A e 96, Biondi 2005). Os resultados das análises completas dessas amostras estão em Biondi (2005) e os resultados das análises dos cristais de ouro estão na Tabela 6.

A presença do ouro dentro da calcopirita/digenita e de quartzo 3, hospedados em pirita 2 (Figs. 2, 4.B e C e 5.A e C), sugere que a maior parte do ouro contido no depósito tenha precipitado ao mesmo tempo que a calcopirita e o quartzo 3, na fase final de preenchimento das fraturas (=ouro 1, Fig. 2). Embora as evidências não sejam conclusivas, a presença de inclusão de ouro na wittichenita (Figs 3.A e 4.B) sugere que houve uma fase de precipitação de ouro anterior a principal, talvez a mesma que precipitou a pirita 1 (ouro 2, Fig. 2).

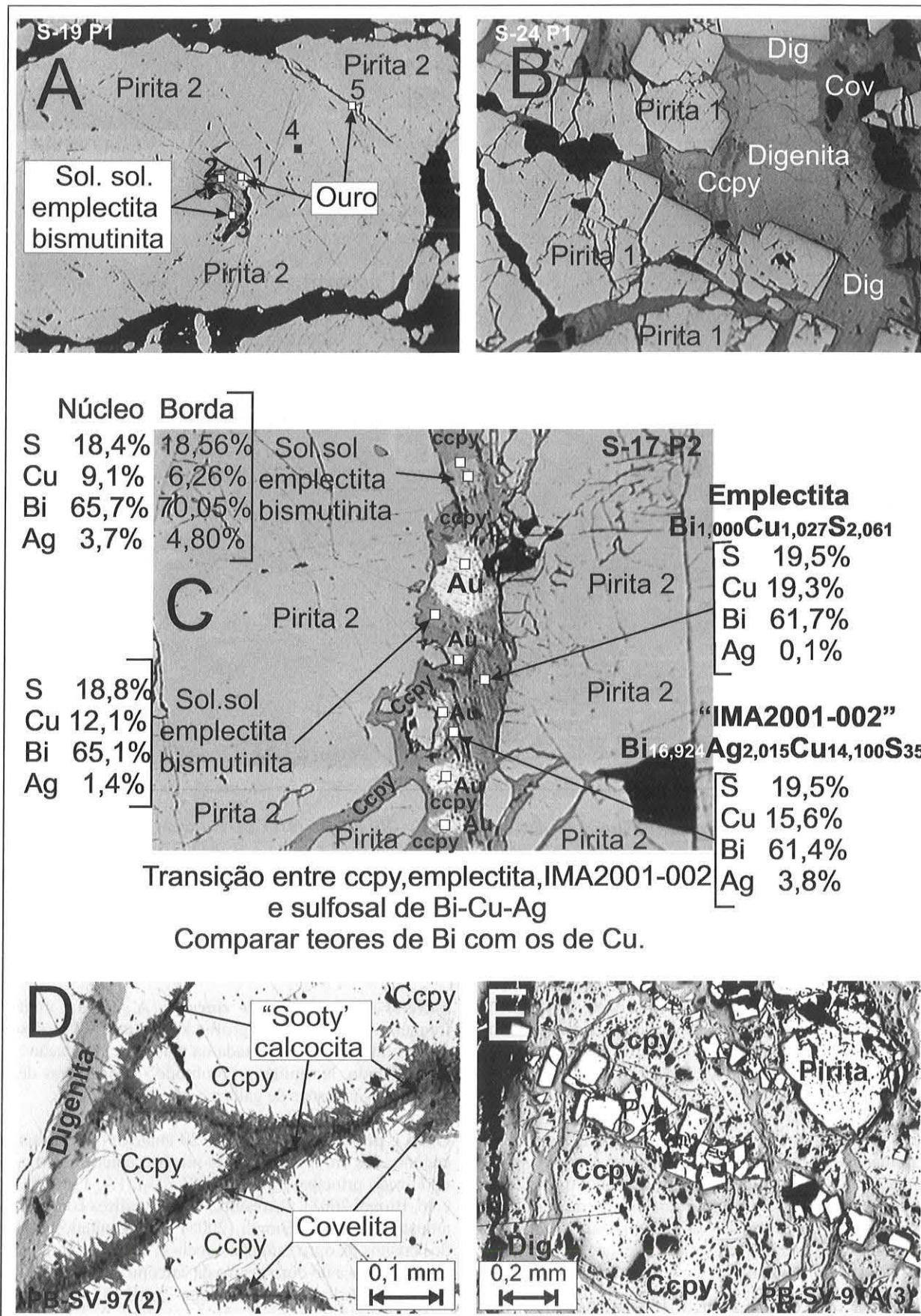


Figura 5 - Paragênese e textura do minério “raso”, da zona de cimentação do depósito de Au-Cu (Bi) Pombo (MT). (A) Inclusões de ouro e cristais com composições intermediárias (solução sólida) entre emplectita e bismutinita em pirita 2. (B) Pirita 1 envolvida por digenita (dig) e covelita (cov). (C) Fratura em pirita 2 com emplectita, IMA-2001-002, cristais com composições intermediárias (solução sólida) entre emplectita e bismutinita intercrescidos com calcopirita e ouro. (D) Calcopirita com vénulas de digenita e covelita+calcocita microgranular preta (“sooty chalcosite”). (E) Pirita 1, euhédrica, em meio a calcopirita com vénulas de digenita.

Tabela 1 – Composição da calcopirita – Média de 11 análises.

Elementos	% em peso		Fração molar normalizada a 100%	
	Média	s	Média	s
S	34,84	0,33	50,08	0,25
Fe	29,9	0,26	24,69	0,18
Cu	34,7	0,31	25,13	0,16
Zn	0,01	0,02	0,01	0,01
Pb	0	0	-	-
Sb	0,01	0,02	0	0,01
Bi	0,01	0,03	0	0,01
Ni	0,01	0,01	0,01	0,01
As	0,09	0,03	0,06	0,02
Cd	0,01	0,02	0,01	0,01
Co	0	0	0	0
Ag	0,02	0,02	0,01	0,01
W	0,03	0,04	0,01	0,01
Sn	0,01	0,01	0,01	0,01
Total	99,64	0,64	100	0
Média Calcopirita = $S_{2,003} Fe_{0,988} Cu_{1,005}$ ($FeCuS_2$)				

Tabela 3 – Composição da pirita 1 e 2 – Média de 9 análises.

Elementos	% em peso		Fração molecular normalizada	
	Média	Desv Pad	Média	Desv Pad
S	53,86	0,29	66,73	0,17
Fe	46,51	0,22	33,07	0,06
Cu	0,05	0,04	0,03	0,03
Zn	0	0,01	0	0,01
Pb	0	0	0	0
Sb	0,01	0,01	0	0
Bi	0	0,01	0	0
Ni	0,05	0,07	0,04	0,05
As	0,15	0,14	0,08	0,08
Cd	0	0,01	0	0
Co	0,02	0,04	0,02	0,03
Ag	0,01	0,02	0	0,01
W	0,03	0,03	0,01	0,01
Sn	0,01	0,01	0	0
Total	100,71	0,41	99,98	0,05
Fórmula da composição média Pirita 1 e 2 = $Fe_{0,992} S_{2,002}$ (FeS_2)				

Tabela 2 – Composições dos sulfetos de Cu que fazem uma série de solução sólida que varia entre covelita e calcosita – Total de 8 análises.

Elementos	% em peso		Fração molar normalizada a 100% (6 análises)				Fração molar normalizada a 100% (2 análises)		
	Média	s	S7-P1-1	S16-P2-10	S17-P3-11	Média	s	Média	s
S	27,06	4,43	50,03	47,66	40,17	44,51	3,84	34,77	0
Fe	0,3	0,19	0,09	0,55	0,14	0,29	0,19	0,18	0,06
Cu	72,74	4,86	49,81	51,21	59,33	54,94	3,84	64,94	0,1
Zn	0	0	-	-	-	0	0	-	-
Pb	0	0	-	-	-	-	-	-	-
Sb	0,01	0,02	0	0,01	-	0,01	0,01	-	-
Bi	0,49	0,63	-	0,43	0,22	0,15	0,15	-	-
Ni	0,01	0,01	-	0,01	-	0	0,01	0,01	0,02
As	0,01	0,01	0,01	0,01	-	0,01	0,01	-	-
Cd	0,02	0,02	-	0,03	0	0,01	0,01	0,01	0,01
Co	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
Ag	0,15	0,07	0,03	0,1	0,08	0,06	0,03	0,08	0,06
W	0,01	0,03	-	-	0,03	0,01	0,01	-	-
Sn	0,01	0,01	0,01	-	0,02	0,01	0,01	0	0
Total	100,81	0,76	100	100	100	100	0	100	0
			Covelita $Cu_{0,997}$ $Fe_{0,002}$ $S_{1,001}$ (CuS)	Mineral "y" $Cu_{2,048}$ $Fe_{0,022}$ $S_{1,906}$ (Cu_2S_2)	Mineral "z" $Cu_{4,017}$ $Fe_{0,014}$ $S_{5,933}$ (Cu_4S_6)	Fórmula da composição média $Cu_{4,945} Fe_{0,026} S_{4,006}$ (Cu_5S_4)	Calcosita $Cu_{1,948} Fe_{0,005} S_{1,043}$ (Cu_2S)		

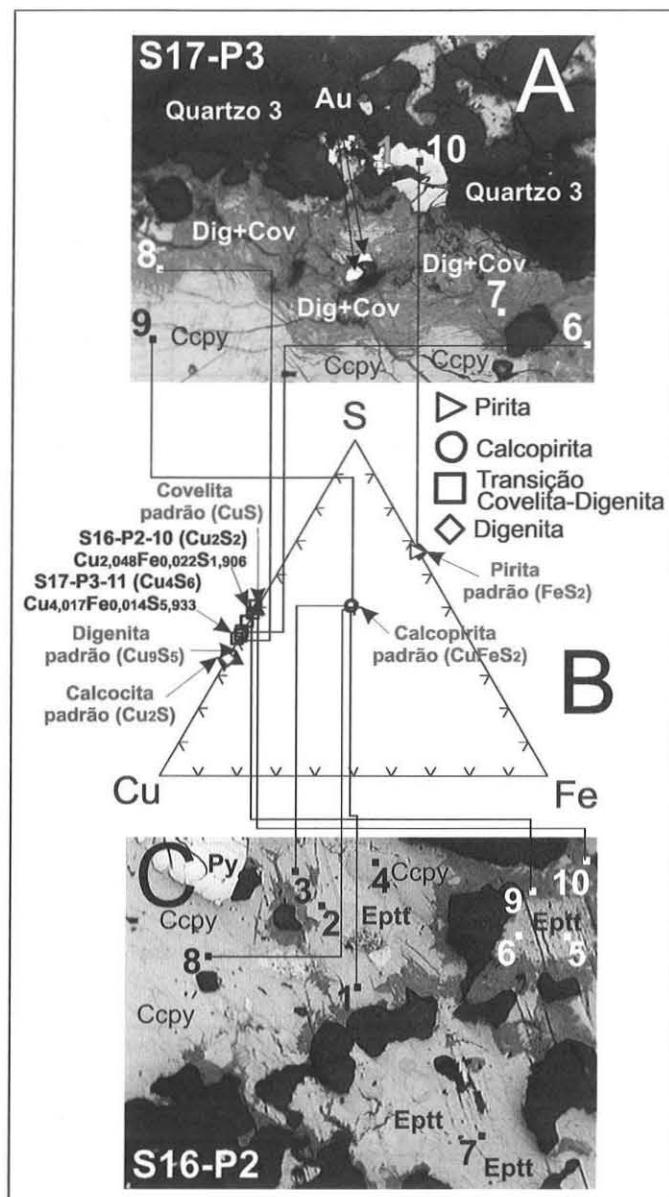


Figura 6 - Sulfitos de Fe e Cu do minério do Pombo. As imagens A e C mostram a relação textural entre os sulfitos e o triângulo central (B) mostra as suas composições.

As figuras 11.A e B e a Tabela 6 mostram o quanto varia a composição do ouro em um mesmo local (Ponto P2 da amostra PB-SV-111A) de uma amostra (Fig. 11.B). As razões médias Au/Ag em % de peso variaram pouco, de 77/22 na amostra PB-SV-111A(P3) até 81/19 na amostra PB-SV-110A(P1), e a correlação entre os teores de Au e de Ag normalizados para 100% é regular e inversa (Tabela 6 e Fig. 12.B), indicando que Au e Ag fazem uma solução sólida. A quantidade de cobre contido nos cristais de ouro é menor, com teores médios entre 0,08% (amostra PB-SV-111A-P2-16) e 1,23% (amostra PB-SV-111A-P3-4) (Tabela 6 e Figs. 11.A e B e 12.A), e varia de modo irregular (Fig. 12.C).

No Pombo o ouro forma soluções sólidas com 18 a 27% em peso de Ag e menos de 1,5% de Cu (Figs 12.A, B, C e D). A média de todas as análises de cristais de ouro de amostras de minérios do Pombo resultou na fórmula $\text{Au}_{64,32}\text{Ag}_{34,93}\text{Cu}_{0,68}$, com desvios padrões de 1,48 para o Au, 0,85 para o Ag e 0,88 para o Cu. Segundo Diman (1976), as proporções de Au, Ag e Cu dos cristais naturais de ouro são controladas sobretudo pelo pH e

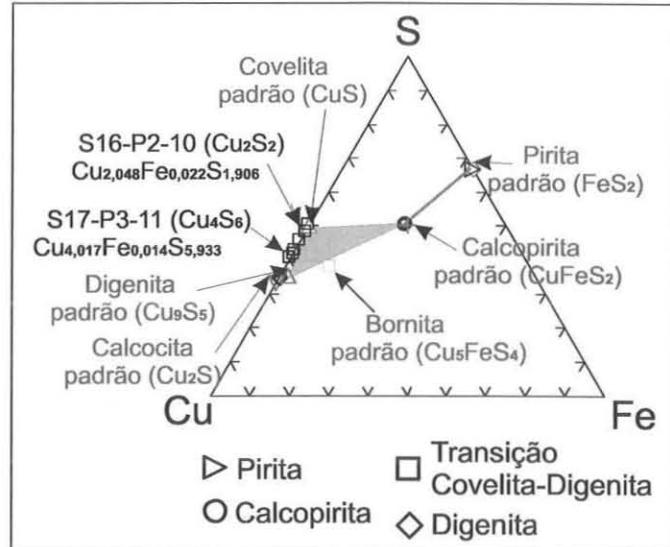


Figura 7 - Triângulo Cu-S-Fe mostrando os pontos correspondentes às análises de sulfitos de Cu e Fe do Pombo. Foram também lançados, nos triângulos, as composições padrão da pirita, calcopirita, bornita (não observada nas amostras analisadas), calcocita, digenita e covelita. Pontos ligados pela linha cinza são de minérios do depósito.

pela atividade do enxofre do fluido hidrotermal mineralizador. Esses fatores seriam mais importantes do que a temperatura, a pressão (profundidade) de cristalização, a razão Au/Ag e a composição química do fluido mineralizador. A pouca variação na proporção Au/Ag/Cu do minério do Pombo sugere que o pH e a atividade do enxofre do fluido hidrotermal mineralizador variaram pouco enquanto o fluido mineralizador precipitou os dois tipos de minério descritos.

QUÍMICA DO MINÉRIO DO POMBO

Materiais e métodos Na área do Pombo foram descritas 36 amostras de minério, 08 das quais foram analisadas quimicamente. Os resultados das análises do minério “profundo” (amostras 28 e 29) e do minério “superficial” (amostras PB-SV-190A, 109B, 110A, 111A, 111B e 111D) estão na Tabela 7. Todas as análises foram feitas nos laboratórios do IGC da USP. Rb, Y, Zr, Nb, Cs, Ba, Hf, Ta, Pb, Th e U foram analisados por ICP – OES e La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb e Lu foram analisados por ICP – MS. SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MnO, MgO, CaO, Na₂O, K₂O, TiO₂ e P₂O₅ foram analisados com fluorescência de raios X (WDS) em pastilhas de tetraborato de lítio. Ba, Ce, Cl, Co, Cr, F, Ga, La, Nb, Nd, Ni, Pb, Rb, S, Sc, Th, U, V, Y, Zn e Zr também foram analisados com fluorescência de raios X, mas em pastilhas de pó prensadas após pulverização em moinho de ágata. FeO foi quantificado por titrimetria e a PF por gravimetria após queima a 1000°C.

No total, 71 amostras de testemunhos de sondagem e 32 amostras de canais feitos sobre o minério nas frentes de lavra foram analisadas para Au (ppb), Au (ppm) e Cu (ppm). As análises foram feitas com “fire assay” e absorção atômica após extração por bromato.

O minério “profundo” A figura 13.A mostra a variação dos teores dos elementos metálicos do minério do Pombo, analisados nos testemunhos da sondagem FP-03 (Fig. 1.C. Análises em Biondi 2005). Os teores de ouro estão representados por losângulos.

Duas zonas mineralizadas com minério “profundo” foram

interceptadas por esta sondagem (Fig. 1.C). A principal foi interceptada a cerca de 150 metros abaixo da superfície (nos testemunhos está entre 248,5 e 250 metros a partir do início do furo, o que corresponde a uma espessura real de 1,15 metros) e tem teor de 1,85 g Au/ton e de 24 g Cu/ton. A outra zona foi interceptada a cerca de 127 metros abaixo da superfície (nos testemunhos está entre 217 e 220 metros a partir do início do furo). Devido a ser uma zona de minério disseminado, com contatos gradacionais, a sua espessura real ainda não foi determinada. Uma amostra de um metro de testemunho de sondagem desta zona analisou 4,92 g Au/ton e 136 g Cu/ton.

Partes dos testemunhos nas quais há anomalias de Fe e de Cu correspondem a zonas mais ricas em calcopirita. Os teores de cobre são sempre economicamente inexpressivos, com um máximo de 460 ppm na posição 115 metros (Fig. 13.A). As

zonas mineralizadas “profundas” são caracterizadas por terem concomitantemente teores elevados de S (até 6,68%), de Fe (até 11,58%) (S + Fe = pirita) e, em muito menor escala, de Zn (até 95 ppm) e Pb (até 24 ppm). Isto pode ser visto mais claramente na figura 13.B, um detalhe da figura 13.A que destaca as duas zonas de minério interceptadas pela sondagem FP-03 (Fig. 1.C e Biondi 2005). Mineralogicamente, como já comentado, o minério “profundo” tem ouro junto a pirita 1 com micro-inclusões de calcopirita (raras) e de esfalerita. A pirita aurífera está em meio a granito cloritizado, carbonatizado e saussuritizado.

O minério “superficial” da zona de cimentação As amostras do minério “raso” ou “superficial” (Tabela 7, Figuras 14.A a D, amostras PB-SV-109A, 109B, 110A, 110D, 111A, 111B e 111D) têm ΣETR menor que as das rochas hidrotermalizadas

Tabela 4 - Análises químicas de sulfetos de Bi, Cu, Ag e Fe que constituem as séries de solução sólida “Mineral X” (\approx bismutinita) – Emplectita – “IMA2002-002 e wittichenita - covelita “blaubleiblender”, pertencentes a paragênese do minério de Au-Cu (Bi) do Pombo (MT).

Amostra	% em peso														% Peso
	S	Fe	Cu	Zn	Pb	Sb	Bi	Ni	As	Cd	Co	Ag	W	Sn	
S17-P2-3	19,50	0,30	19,26	0,00	0,00	0,00	61,74	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	100,88
S17-P2-5	18,91	0,69	13,28	0,03	0,00	0,03	64,75	0,00	0,00	0,00	0,00	1,07	0,06	0,00	98,81
S17-P2-6	18,80	0,56	12,12	0,07	0,00	0,00	65,09	0,02	0,00	0,00	0,00	1,36	0,04	0,00	98,04
S17-P2-7	18,56	0,85	6,26	0,02	0,00	0,02	70,05	0,00	0,00	0,10	0,02	4,80	0,00	0,00	100,67
S17-P2-8	18,44	0,29	9,15	0,00	1,32	0,00	65,70	0,01	0,00	0,00	0,00	3,74	0,05	0,00	98,71
S17-P2-10	18,69	1,89	6,70	0,01	0,25	0,00	69,69	0,00	0,00	0,08	0,00	4,78	0,04	0,00	102,14
S17-P3-5	23,78	1,01	54,74	0,03	0,00	0,00	21,21	0,01	0,00	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	100,94
S17-P3-6	27,38	0,31	72,70	0,00	0,00	0,04	0,42	0,02	0,00	0,01	0,01	0,20	0,00	0,00	101,08
S17-P3-8	26,49	0,54	73,67	0,00	0,00	0,00	0,36	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,01	0,01	101,18
S17-P3-11	25,16	0,16	73,65	0,00	0,00	0,00	0,89	0,00	0,00	0,01	0,01	0,17	0,10	0,04	100,18
S11-P1-8	19,56	0,16	39,79	0,00	0,00	0,00	41,97	0,00	0,00	0,00	0,01	0,07	0,00	0,00	101,55
S16-P2-9	29,38	0,24	69,72	0,01	0,00	0,04	0,41	0,00	0,04	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	99,93
S16-P2-10	31,69	0,64	67,48	0,00	0,00	0,01	1,84	0,01	0,01	0,06	0,01	0,21	0,00	0,00	101,97
S19-P1-2	18,55	0,56	3,79	0,02	0,05	0,01	70,91	0,00	0,00	0,00	0,00	5,89	0,02	0,00	99,79
S18-P2-2	19,50	0,02	39,25	0,00	0,00	0,02	41,85	0,01	0,00	0,00	0,00	0,05	0,01	0,03	100,73
S17-P2-4															
\approx IMA-2001-002	19,50	0,54	15,59	0,03	0,00	0,00	61,43	0,01	0,00	0,06	0,00	3,76	0,17	0,05	101,13
Emplectita	19,05		18,88				62,07								100,00
IMA2001-002	19,50		18,77				61,73								100,00
Wittichenita	19,40		38,45				42,15								100,00
Benjaminita	18,03		2,23		19,41		48,95					11,37			100,00

Frações molares

Amostra	S	Fe	Cu	Zn	Pb	Sb	Bi	Ni	As	Cd	Co	Ag	W	Sn	NORMAL
S17-P2-3	50,14	0,45	24,99	0,00	0,00	0,00	24,36	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,00	0,00	100,00
S17-P2-5	52,11	1,09	18,46	0,04	0,00	0,02	27,37	0,00	0,00	0,00	0,00	0,88	0,03	0,00	100,00
S17-P2-6	52,71	0,90	17,13	0,09	0,00	0,00	27,99	0,03	0,00	0,00	0,00	1,13	0,02	0,00	100,00
S17-P2-7	53,90	1,42	9,17	0,03	0,00	0,01	31,22	0,00	0,00	0,08	0,03	4,14	0,00	0,00	100,00
S17-P2-8	53,24	0,48	13,33	0,00	0,59	0,00	29,10	0,01	0,00	0,00	0,00	3,21	0,03	0,00	100,00
S17-P2-10	52,88	3,07	9,56	0,01	0,11	0,00	30,25	0,00	0,00	0,07	0,01	4,02	0,02	0,00	100,00
S17-P3-5	43,00	1,05	49,95	0,03	0,00	0,00	5,88	0,01	0,00	0,00	0,00	0,09	0,00	0,00	100,00
S17-P3-6	42,52	0,28	56,97	0,00	0,00	0,02	0,10	0,02	0,00	0,00	0,01	0,09	0,00	0,00	100,00
S17-P3-7	43,01	0,06	56,71	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00	0,05	0,02	0,01	0,08	0,00	0,00	100,00
S17-P3-8	41,35	0,49	58,02	0,00	0,00	0,00	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	100,00
S17-P3-11	40,17	0,14	59,33	0,00	0,00	0,00	0,22	0,00	0,00	0,00	0,01	0,08	0,03	0,02	100,00
S16-P2-9	45,33	0,21	54,27	0,00	0,00	0,02	0,10	0,00	0,02	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	100,00
S16-P2-10	47,66	0,55	51,21	0,00	0,00	0,01	0,42	0,00	0,01	0,02	0,01	0,10	0,00	0,00	100,00
S19-P1-2	55,49	0,96	5,72	0,03	0,02	0,00	32,54	0,00	0,00	0,00	0,00	5,23	0,01	0,00	100,00
S17-P2-4	50,92	0,81	20,54	0,04	0,00	0,00	24,61	0,01	0,00	0,04	0,00	2,92	0,08	0,03	100,00
\approx IMA-2001-002															
Emplectita	50,00	0,00	25,00	0,00	0,00	0,00	25,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
IMA2001-002	50,72	0,00	24,64	0,00	0,00	0,00	24,64	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
Wittichenita	42,86	0,00	42,86	0,00	0,00	0,00	14,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
Benjaminita	54,55	0,00	3,40	0,00	9,09	0,00	22,73	0,00	0,00	0,00	0,00	10,23	0,00	0,00	100,00

Composição mais próxima da bismutinita = Mineral metálico “x” = S19-P1-2 = $\text{Bi}_{0,441}\text{Fe}_{0,199}(\text{Ag}_{1,005}\text{Cu}_{1,140})\text{S}_{11,001}$ [= $\text{Bi}_6(\text{Ag}, \text{Cu})\text{S}_{11}$]

Tabela 5 – Análises químicas de wittichenita e de emplectita da paragênese do minério de Au-Cu (Bi) do Pombo (MT).

Wittichenita (fração molar normalizada)															
	S	Fe	Cu	Zn	Pb	Sb	Bi	Ni	As	Cd	Co	Ag	W	Sn	Soma
S11-P1-8	42,34	0,20	43,47	0,00	0,00	0,00	13,94	0,00	0,00	0,00	0,01	0,05	0,00	0,00	100,00
S18-P2-2	42,60	0,03	43,27	0,00	0,00	0,01	14,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,02	100,00
Média	42,47	0,11	43,37	0,00	0,00	0,01	13,99	0,01	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,01	100,00
Desv Pad	0,18	0,12	0,14	0,00	0,00	0,01	0,06	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00
Fórmula da composição média = Wittichenita = $\text{Cu}_{3,036}\text{Bi}_{0,979}\text{S}_{2,973}$ (= Cu_3BiS_3)															
Emplectita (fração molar normalizada)															
	S	Fe	Cu	Zn	Pb	Sb	Bi	Ni	As	Cd	Co	Ag	W	Sn	Soma
S16-P2-2	49,803	0,033	25,351	0,005	0,000	0,000	24,755	0,020	0,000	0,000	0,000	0,000	0,032	0,000	100,000
S16-P2-4	50,315	0,050	24,909	0,000	0,000	0,000	24,705	0,000	0,000	0,000	0,008	0,000	0,011	0,000	100,000
S16-P2-5	49,877	0,006	25,402	0,010	0,000	0,000	24,626	0,026	0,000	0,002	0,000	0,000	0,044	0,008	100,000
S16-P2-6	49,860	0,012	25,804	0,000	0,000	0,000	24,282	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,017	0,025	100,000
S16-P2-7	50,095	0,009	25,200	0,000	0,000	0,000	24,625	0,023	0,000	0,000	0,044	0,000	0,000	0,006	100,000
Média	49,990	0,022	25,333	0,003	0,000	0,000	24,599	0,014	0,000	0,000	0,010	0,000	0,021	0,008	100,000
Desv.Pad	0,213	0,019	0,326	0,005	0,000	0,000	0,185	0,013	0,000	0,001	0,019	0,000	0,018	0,010	0,000
Fórmula da composição média = Emplectita = $\text{Cu}_{1,013}\text{Bi}_{0,984}\text{S}_{2,000}$ = (CuBiS_2)															

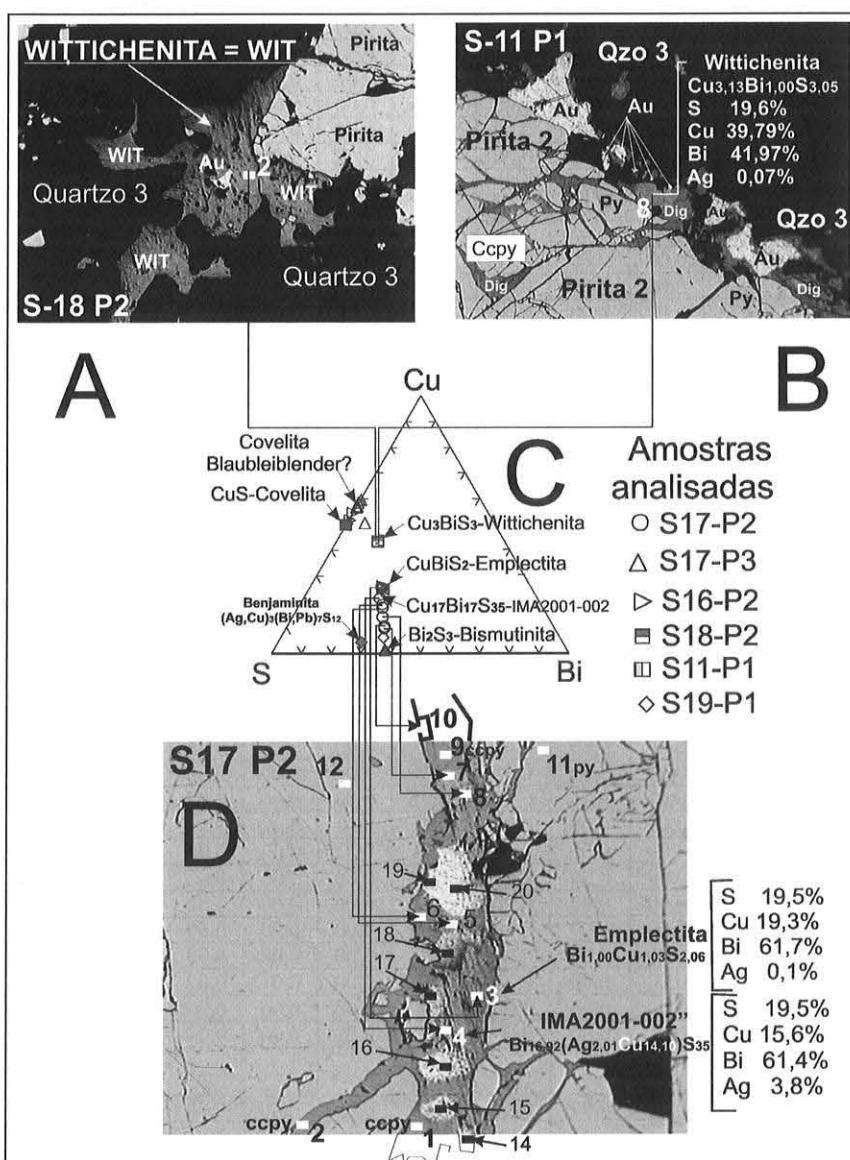


Figura 8 – (A, B e D) Imagens de sulfossais de Cu, Bi e Ag do minério do Pombo (MT) cujas composições químicas são mostradas em (C), no triângulo S-Cu-Bi. O mineral “IMA-2001-002” do Pombo diferencia-se do original por conter prata (imagem D).

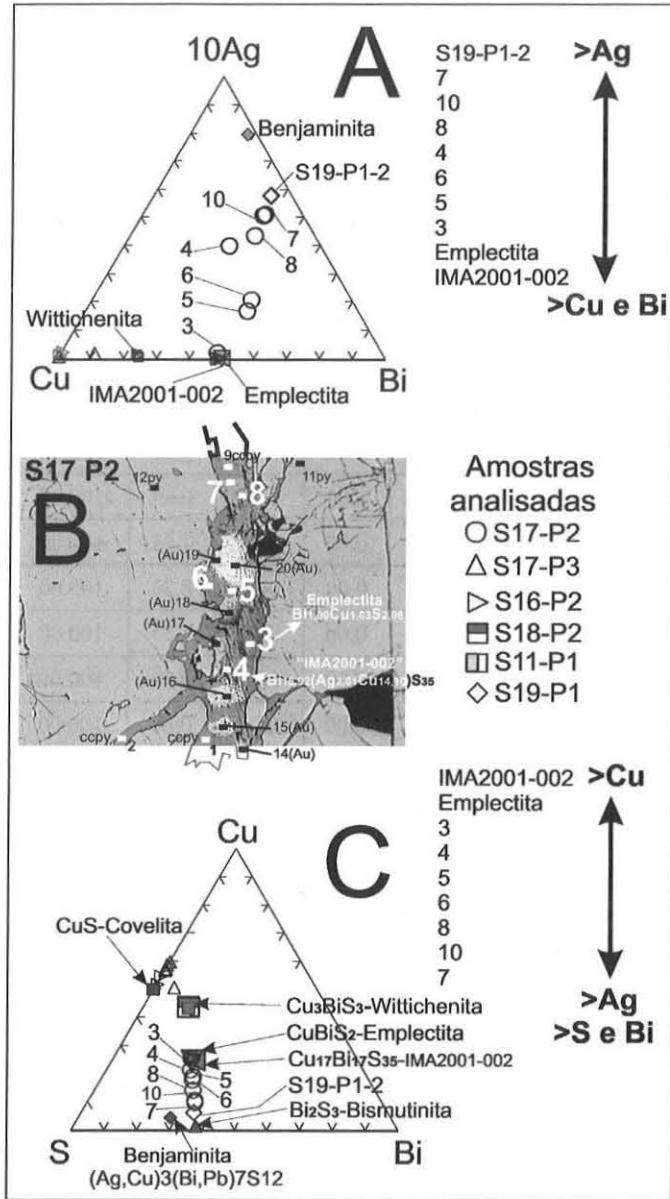


Figura 9 – (A) Imagem de sulfossais de Cu, Bi e Ag do minério do Pombo (MT) cujas composições químicas são mostradas nos triângulos (A) Cu-10Ag-Bi e (C) S-Cu-Bi. Os números brancos na imagem conduzem aos triângulos S-Cu-Bi e Cu-10Ag-Bi (os cristais nº 9 e 10 não estão nessa imagem). Notar, ao lado dos triângulos, como variam as composições dos sulfossais em termos de seus teores em Ag, Cu, Bi e S.

da zona de alteração (Biondi 2005) e as do minério “profundo” (Figuras 14.A e B), mas os espectros dos elementos terras raras mantêm o mesmo padrão de fracionamento, regular, sem anomalias positivas ou negativas de qualquer elemento. Duas amostras fogem a este padrão. A PB-SV-111A tem anomalia negativa de Eu e a PB-SV-111D é mais enriquecida em ETR pesados que as outras amostras (Figuras 14.C e D). O exame da mineralogia e da química geral dessas amostras não forneceu uma explicação para este comportamento anômalo, talvez consequência da amostragem ou de problemas analíticos.

É notável que o \sum ETR das amostras de minério diminui gradacialmente do minério “profundo” (amostras 28 e 29) até as de minério de sub-superfície (amostra PB-SV-110A). A ordem, da maior \sum ETR para a menor, é FP-03-29 (\sum ETR = 126,56 ppm) → FP-03-28 (99,10 ppm) → PB-SV-109B(49,83

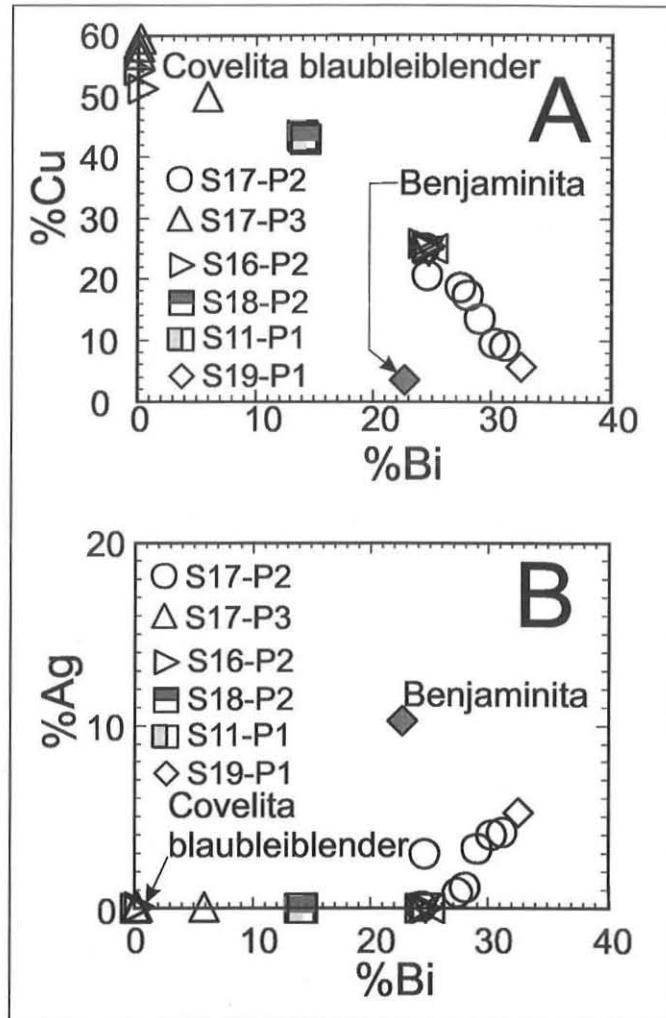


Figura 10 - Composição da solução sólida “mineral X” – emplectita e de outros sulfossais que constituem a paragênese do minério de Au-Cu (Bi) do Pombo (MT) mostradas nos diagramas: (A) Cu vs. Cu. (B) Ag vs. Bi. Notar que a benjaminita e a covelita “blaubleiblender” não pertencem a esta série de solução sólida.

ppm) → PB-SV-111B(39,30 ppm) → PB-SV-109A(11,40 ppm) → PB-SV-111A(7,12 ppm) → PB-SV 111D(2,03) → PB-SV 110A(1,98 ppm) (Figuras 14.C e D). A Figura 13.E mostra que a diminuição do \sum ETR é inversamente proporcional ao teor de SiO₂ dos minérios e, em parte, também ao aumento do teor de enxofre. Ou seja, os minerais que contêm ETR foram dispersos, e os teores de ETR foram proporcionalmente diminuídos, devido a mais quartzo, sulfetos e sulfossais terem cristalizado no minério “superficial” que no minério “profundo”.

Os teores dos elementos dos diagramas multielementares dos minérios e das rochas encaixantes do depósito Pombo (Figuras 15.A e B) foram normalizados em relação ao manto primordial e os elementos foram ordenados segundo o aumento de suas compatibilidades em relação a fonte mantélica. Este diagrama permite avaliar o grau de fracionamento químico dos elementos depois que deixam o manto para integrar um magma. Nas figuras 15.A e B foram usados os valores de normalização publicados por Sun & McDonough (1989) e os elementos foram organizados conforme Wyborn *et al.* (1992).

Do modo similar às amostras do granito, as do minério caracterizam-se por discretas anomalias negativas de Nb e Nd, anomalias positivas de La, Ce e Zr e ausência de anomalias de

Tabela 6 - Análises do ouro do minério de Au-Cu (Bi) do Pombo (MT).

Número da amostra	Número de laboratório	% e peso						Fração molar normalizada a 100%					
		%Au	%Ag	%Pd	%Te	%Cu	% Total	%Au	%Ag	%Pd	%Te	%Cu	% Total
PB-SV-111A	S17-P2-14	78.86	21.91	0.00	0.03	0.09	100.88	65.18	34.57	0.00	0.03	0.22	100.00
	S17-P2-15	78.37	21.65	0.00	0.07	0.26	100.35	64.97	34.29	0.00	0.09	0.66	100.00
	S17-P2-16	77.39	23.05	0.00	0.11	0.08	100.62	63.59	36.08	0.00	0.14	0.19	100.00
	S17-P2-17	76.10	23.31	0.00	0.09	1.05	100.56	61.43	35.83	0.00	0.11	2.63	100.00
	S17-P2-18	78.63	22.11	0.00	0.00	0.11	100.85	64.89	34.83	0.00	0.00	0.28	100.00
	S17-P2-19	78.10	22.49	0.00	0.02	0.22	100.82	64.19	35.24	0.00	0.02	0.55	100.00
	S17-P2-20	78.66	21.00	0.00	0.07	0.09	99.83	65.97	33.70	0.00	0.09	0.24	100.00
	Média	78.02	22.22	0.00	0.05	0.27	100.56	64.32	34.93	0.00	0.07	0.68	100.00
PB-SV-111A	Desv Pad	0.97	0.80	0.00	0.04	0.35	0.37	1.48	0.85	0.00	0.05	0.88	
	S17-P3-2	77.90	21.39	0.00	0.07	1.00	100.36	62.91	34.48	0.00	0.09	2.51	100.00
	S17-P3-3	77.36	22.69	0.00	0.03	0.72	100.80	62.95	35.20	0.00	0.04	1.82	100.00
	S17-P3-4	76.30	22.73	0.00	0.00	1.23	100.26	60.91	36.05	0.00	0.00	3.05	100.00
	Média	77.19	22.27	0.00	0.03	0.98	100.47	60.49	36.73	0.00	0.03	2.75	
PB-SV-97A	Desv Pad	0,81	0.76	0.00	0.03	0.25	0.29	2.78	3.00	0.00	0.04	1.21	
	S11-P1-1	77.98	22.27	0.00	0.06	0.39	100.70	63.08	35.86	0.00	0.08	0.99	100.00
	S11-P1-2	79.20	21.03	0.00	0.02	0.08	100.33	65.17	34.61	0.00	0.03	0.20	100.00
	S11-P1-3	75.49	24.63	0.00	0.02	0.81	100.94	59.60	38.39	0.00	0.03	1.98	100.00
	S11-P1-4	74.71	25.33	0.00	0.04	0.70	100.78	58.07	40.21	0.00	0.04	1.68	100.00
	S11-P1-5	78.65	22.00	0.00	0.00	0.13	100.77	64.02	35.66	0.00	0.00	0.32	100.00
	S11-P1-6	76.50	23.16	0.00	0.00	0.45	100.11	61.78	37.09	0.00	0.00	1.13	100.00
	Média	77.09	23.07	0.00	0.02	0.43	100.61	61.95	36.97	0.00	0.03	1.05	
PB-SV-96	Desv Pad	1.80	1.64	0.00	0.02	0.30	0.32	2.70	2.05	0.00	0.03	0.71	
	S7-P1-3	81.57	18.59	0.00	0.00	0.07	100.23	69.39	30.43	0.00	0.00	0.18	100.00
	S7-P1-4	78.49	20.48	0.00	0.03	0.56	99.56	66.70	31.78	0.00	0.04	1.48	100.00
	Média	80.03	19.54	0.00	0.02	0.32	99.89	68.04	31.11	0.00	0.02	0.83	
	Desv Pad	2.18	1.34	0.00	0.02	0.35	0.47	1.90	0.95	0.00	0.02	0.92	
PB-SV-110A	S19-P1-1	81.11	18.93	0.00	0.00	0.10	100.14	67.79	31.95	0.00	0.00	0.26	100.00
PB-SV-109B	S18-P2-1	73.93	26.23	0.00	0.08	0.58	100.81	59.75	38.70	0.00	0.10	1.45	100.00

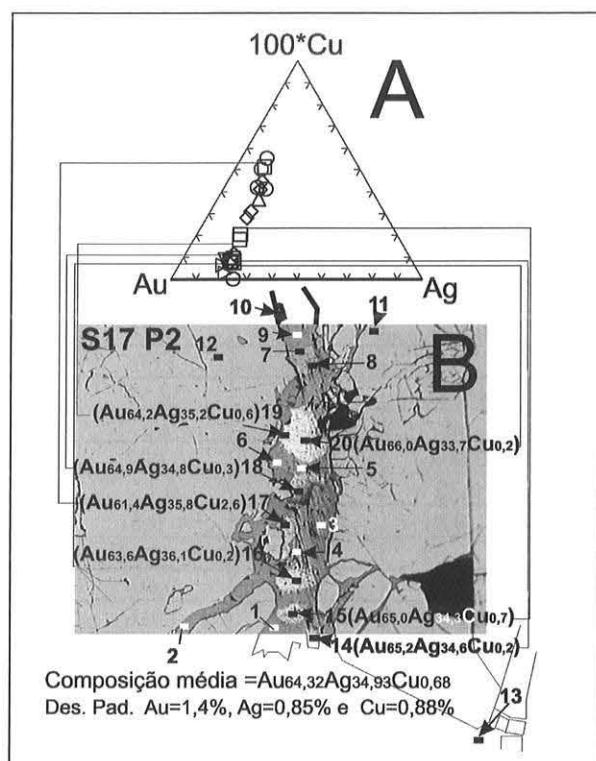


Figura 11 - Variação na composição dos cristais de ouro de minérios do Pombo. (A) A imagem mostra os pontos onde foram analisados Au, Ag e Cu nos cristais de ouro e as composições de cada um desses pontos. (B) As linhas ligam cada ponto na imagem à sua posição no triângulo Au-100Cu-Ag. Nesse triângulo estão os pontos correspondentes a todas as análises feitas em cristais de ouro de amostras do Pombo.

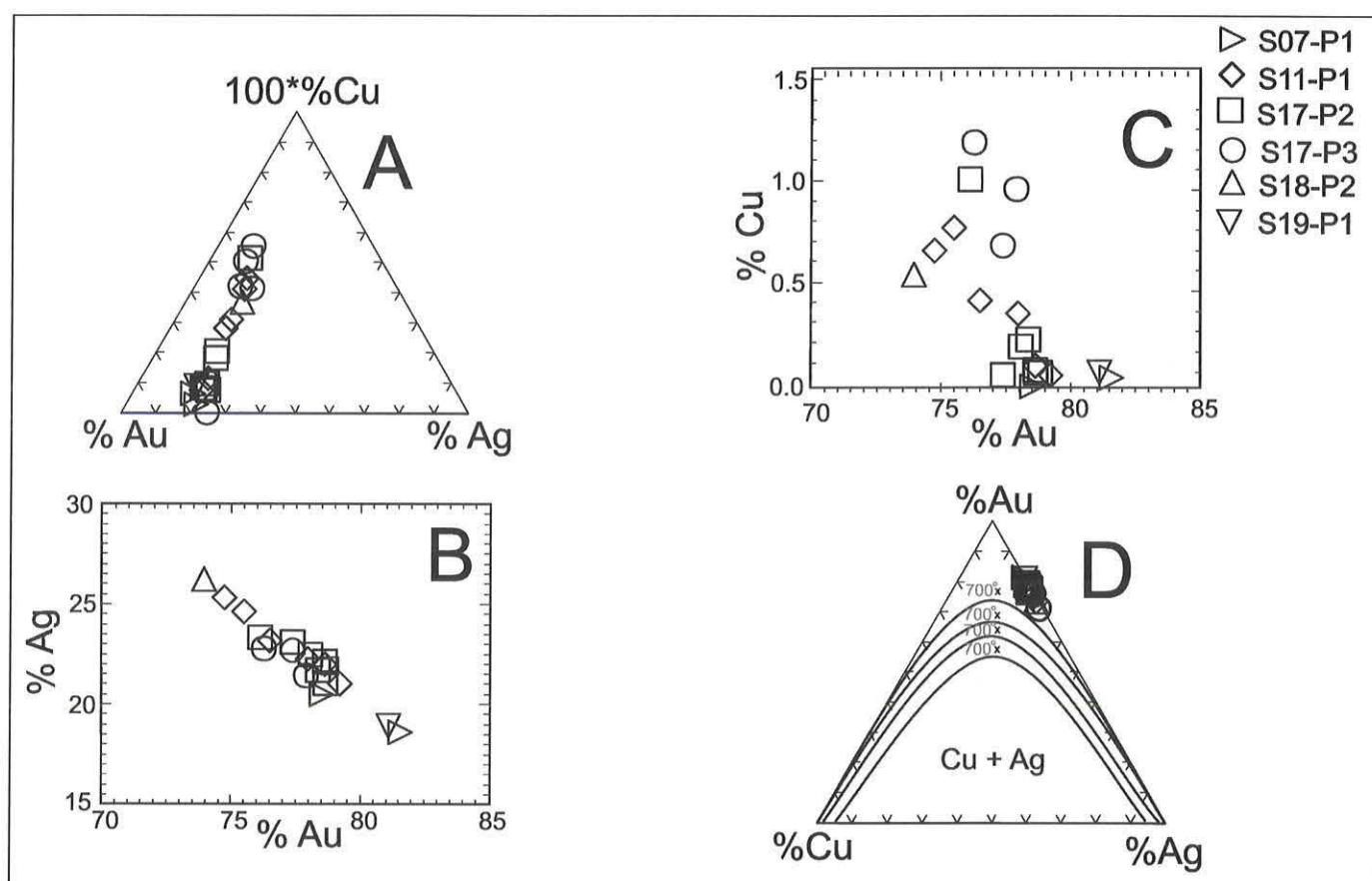


Figura 12 - Relações entre os teores de Au, Ag e Cu nos cristais de ouro do minério do Pombo. (A) Triângulo Au-100Cu-Ag, (B) Diagrama Au vs. Ag, (C) Diagrama Au vs Cu e, (D) Triângulo Cu-Au-Ag.

Tabela 7 – Análises químicas de minérios do depósito de Au-Cu (Bi) do Pombo (MT). Teores dos óxidos em % e dos outros elementos em g/ton.

Amostra Posição no FP03	Minério “profundo”		Minério “superficial” (zona de cimentação)					
	28 149,00 a 149,50m de prof.	29 149,50 a 150,50m de prof.	PB-SV-111A 19,00 m de prof.	PB-SV-111B 19,00 m de prof.	PB-SV-111D 19,00 m de prof.	PB-SV-109B 19,00 m de prof.	PB-SV-109A 19,00 m de prof.	PB-SV-110A 19,00 m de prof.
SiO ₂	54,99	43,10	60,08	80,83	40,91	69,49	30,96	23,88
TiO ₂	0,268	0,317	0,040	0,090	0,010	0,224	0,030	0,005
Al ₂ O ₃	16,94	17,49	2,97	7,24	1,60	9,02	2,43	0,11
Fe ₂ O ₃	7,04	14,90	18,04	3,19	32,53	10,74	30,62	50,68
FeO	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
MnO	0,196	0,219	0,004	0,008	0,002	0,012	0,003	0,014
MgO	1,63	1,86	0,22	0,45	0,13	0,56	0,18	0,09
CaO	4,11	3,76	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,14	< 0,01	< 0,01
Na ₂ O	0,26	0,12	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,08	< 0,02	< 0,02
K ₂ O	6,54	6,50	1,07	2,57	0,60	3,56	0,85	0,18
P ₂ O ₅	0,105	0,108	0,038	0,009	0,016	0,054	0,030	0,023
PF	5,32	9,80	9,06	2,04	18,80	5,68	21,68	25,23
Total	90,36	83,27	73,48	93,24	62,07	88,82	56,16	49,53
Au	0,1	1,8	10,600	3,210	53,100	21,600	6,130	31,100
Fe ₂ O ₃ T	7,04	14,90	18,04	3,19	32,53	10,74	30,62	50,68
Ba	1264	1627	153	381	64,7	603	127	46,3
Rb	290	293	55,1	147	23,4	168	35,1	9,15
Sr	203	165	8	16	< 1	49	11	8
Cs	5,75	5,28	1,07	2,47	0,43	2,89	0,71	0,18
Ga	28	22	< 1	11	< 1	16	< 1	< 1
Ta	0,36	0,65	0,04	0,27	<0,01	0,42	0,02	<0,01
Nb	7,18	9,97	1,13	2,54	0,40	6,74	0,56	0,15
Hf	3,12	2,97	0,58	1,20	0,16	2,04	0,27	0,09
Zr	119	112	23,4	45,0	6,19	70,4	11,0	3,64
Y	7,99	8,72	1,08	3,42	2,20	5,95	0,98	0,27
Th	10,1	9,78	1,81	6,88	0,67	6,26	1,18	0,36
U	1,52	1,50	0,36	0,86	0,02	1,38	0,56	0,11
Cr	14	30	< 5	14	< 5	16	< 5	< 5
Ni	8	< 3	21	6	38	6	49	77
Co	140	636	4	59	260	137	245	108
Sc	7	9	6	< 4	6	< 4	9	6
V	31	44	6	23	7	23	11	< 3
Cu	15	31	37709	2744	11470	4391	12696	857
Pb	9,50	23,9	20,9	9,72	98,7	21,3	48,2	119
Zn	56	89	52	20	112	8	46	56
F	551	758	< 355	562	1389	1051	1900	2570
Cl	< 39	< 39	85	166	<39	<39	<39	<39
S	14645	66824	133712	11704	248778	51397	273534	297875
La	23,6	31,4	1,64	8,90	0,37	11,1	2,60	0,52
Ce	44,3	56,4	3,14	18,0	0,62	22,8	4,51	0,91
Pr	5,02	6,51	0,37	1,88	0,06	2,15	0,67	0,09
Nd	16,9	21,5	1,28	6,88	0,29	8,07	2,64	0,37
Sm	2,81	3,53	0,19	0,99	0,06	1,78	0,36	0,04
Eu	0,83	1,02	0,03	0,28	0,02	0,35	0,07	<0,01
Gd	1,96	2,27	0,18	0,89	0,11	1,08	0,23	0,03
Tb	0,23	0,28	<0,01	0,09	<0,01	0,14	<0,01	<0,01
Dy	1,45	1,62	0,14	0,56	0,21	1,05	0,18	0,02
Ho	0,24	0,26	<0,01	0,10	0,04	0,18	<0,01	<0,01
Er	0,70	0,73	0,08	0,33	0,15	0,45	0,08	<0,01
Tm	0,12	0,12	<0,01	0,03	<0,01	0,08	<0,01	<0,01
Yb	0,83	0,79	0,08	0,38	0,12	0,52	0,07	<0,01
Lu	0,12	0,11	<0,01	0,04	<0,01	0,09	<0,01	<0,01

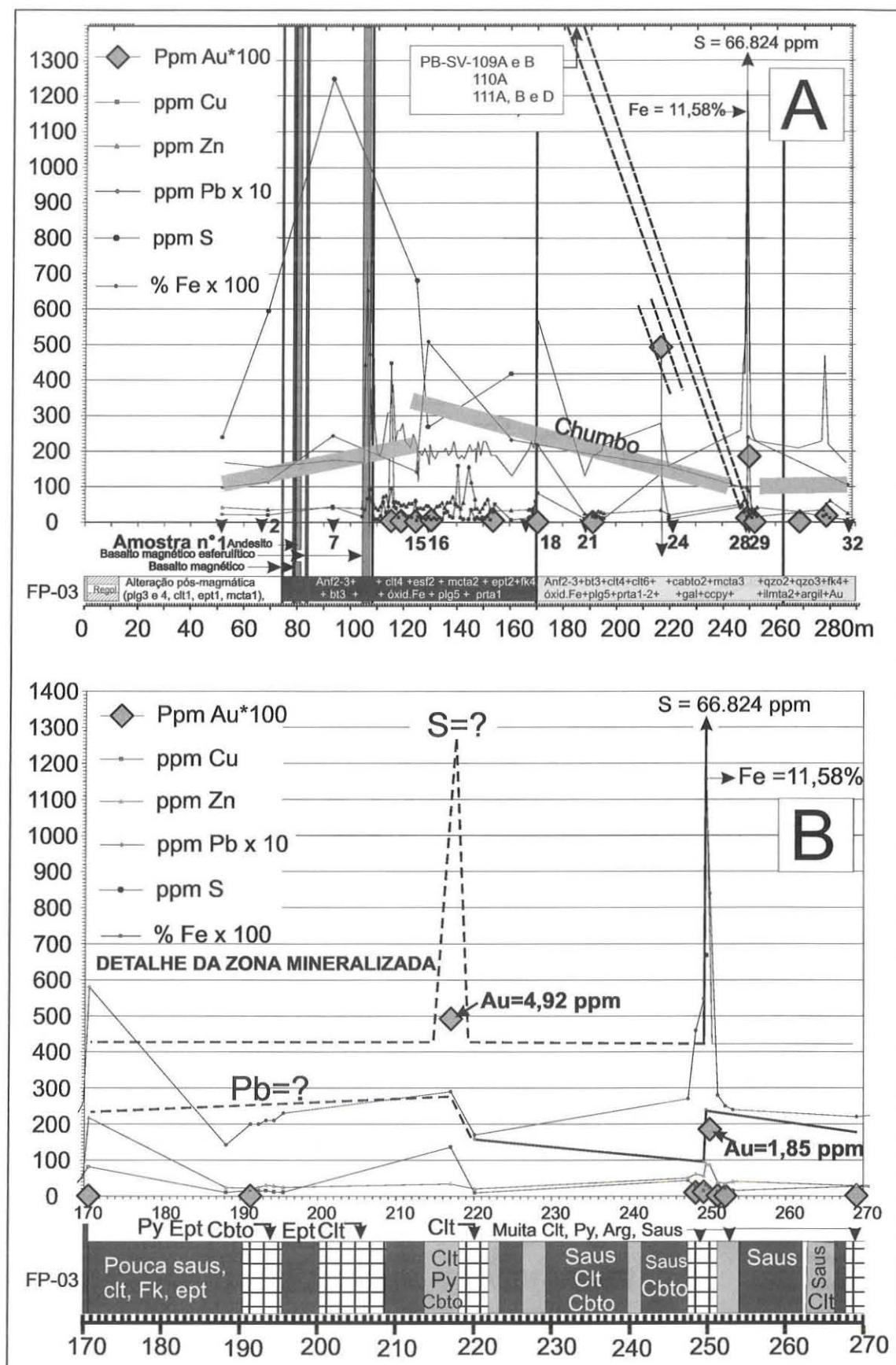


Figura 13 - Variação dos teores dos elementos metálicos Au, Cu, Zn, Pb, S e Fe nos testemunhos da sondagem FP-03. (A) Distribuição em toda a sondagem FP-03. (B) Detalhe da zona de minério “profundo”, de 170 a 270 metros do inicio do furo. Os losângulos correspondem aos teores de ouro analisados nas amostras cujos números estão em negrito. As análises completas estão em Biondi (2005). As amostras 28 e 29 são de minério “profundo”, cujas análises estão na Tabela 7. Abreviações: plg = plagioclásio, clt = clorita, ept = epidoto, mcta = muscovita, anf = anfibólito, bt = biotita, prta = pirita, gal = galena, cabto = carbonato, qzo = quartzo, Fk = feldspato potássico, ilmta = ilmenita, argil = argilominerais, saus = saussurita, ccpy = calcopirita.

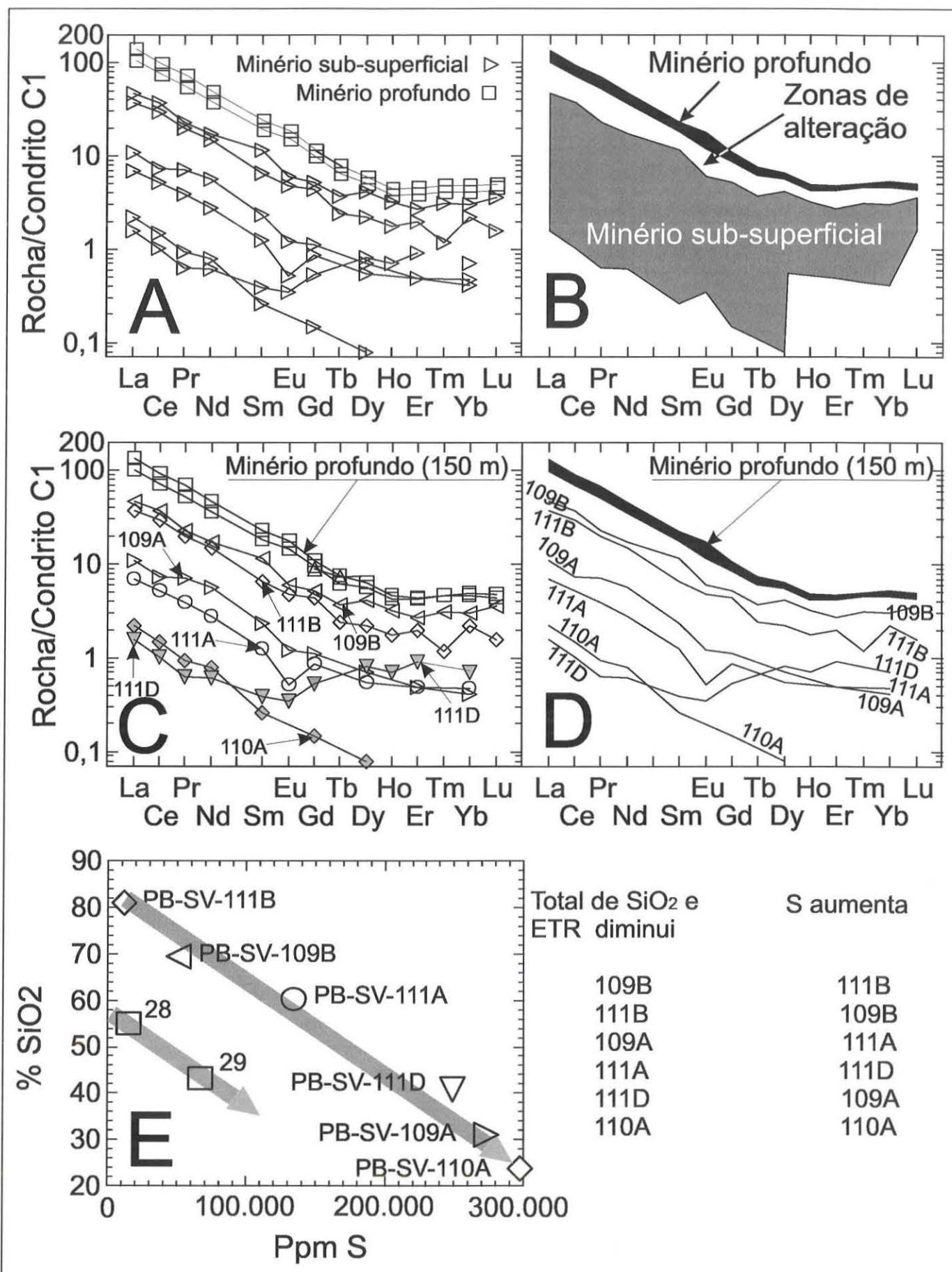


Figura 14 – (A a D) Espectros de elementos terras raras de amostras das zonas mineralizadas “rasa” ou “superficial” e “profunda” do depósito de Au-Cu (Bi) Pombo. (E) Diagrama SiO₂ vs. S que mostra que a \sum ETR e o teor de SiO₂ diminuem quando o teor de S aumenta

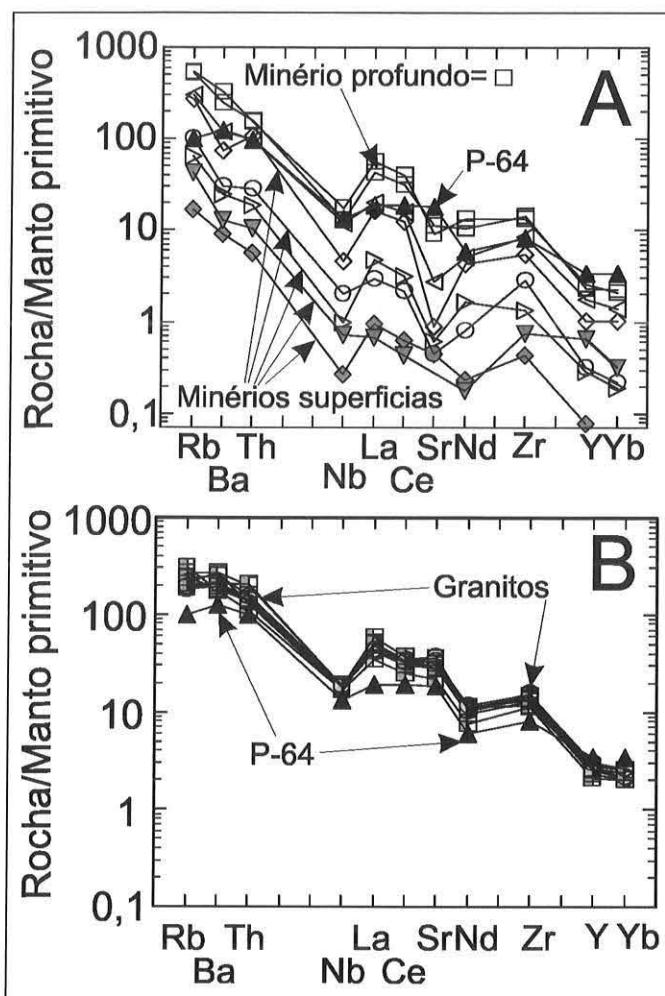


Figura 15 -Diagramas multielementares com teores normalizados conforme os teores do manto primordial, de Sun & McDonough (1989) de: (A) amostras de minério do depósito Pombo e; (B) amostras de granitos hidrotermalmente alterados, encaixantes dos corpos mineralizados; comparados ao manto primordial. A amostra P-64 é do granito menos alterado encontrado na região do depósito de Au-Cu (Bi) Pombo.

Rb, Ba, Th, Sr, Y e Yb. A amostra de referência P-64 (Biondi 2005) tem o mesmo padrão. Tendo o mesmo padrão multielementar das rochas, pode-se sugerir que o minério é produto de um fluido mineralizador cuja composição foi fortemente condicionada pelo granito Pombo, e manteve a “assinatura” geoquímica semelhante àquela do granito.

CONCLUSÕES

Minerais metálicos que compõem o minério de Au-Cu (Bi)

O trapézio Bi-Cu-S-Fe (Fig. 16) mostra as composições e as relações compostonais de todos os minerais metálicos que acompanham o ouro e a prata no minério do Pombo. O principal sulfeto do minério é a pírita, secundada pela calcopirita seguida pela digenita/calcocita e covelita. A galena foi encontrada em somente uma amostra de minério “superficial” e galena e esfalerita ocorrem em microinclusões na pírita do minério “profundo”.

Junto aos sulfetos há sulfossais de Cu, Bi e Ag. Os mais presentes são wittichenita e emplectita, minerais raros. O minério contém, também, um mineral com fórmula $Cu_{14,10}Bi_{16,92}Ag_{2,01}S_{35}$ semelhante à do IMA-2001-002 ($Cu_{17}Bi_{17}S_{35}$), porém com prata. Há, também, uma solução sólida caracterizada por cristais cujas composições variam gradacionamente desde a emplectita até o “mineral metálico X” ($Bi_{6,441}Fe_{0,190}(Ag_{1,005}Cu_{1,140})S_{11,001}$), com composição muito próxima à da bismutinita. Uma outra solução sólida existe entre a digenita/calcocita e um mineral com composição igual a da covelita “blaubleiblender”. Fazem parte dessa série os denominados “mineral Y” ($Cu_{2,048}Fe_{0,022}S_{1,906} \approx Cu_2S_2$) e “mineral Z” ($Cu_{4,017}Fe_{0,014}S_{5,933} \approx Cu_4S_6$), (não mencionados na literatura). A calcopirita e a pírita são os sulfetos mais presentes nos minérios. A digenita e a covelita indicam que o minério de sub-superfície está em uma zona de cimentação, em um ambiente de enriquecimento supergênico. O ouro cristalizou junto à muscovita 3, ao quartzo 3, à calcopirita e a pírita 2. A média de todas as análises de cristais de ouro de amostras de minérios do Pombo resultou na fórmula $Au_{64,32}Ag_{34,93}Cu_{0,68}$.

Composição química e origem do minério Os espectros de ETR dos minérios e das rochas encaixantes hidrotermalmente alteradas têm a mesma forma fracionamento. Mostram semelhança com os padrões de variação dos teores nos diagramas multielementares das rochas alteradas, da rocha de referência pouco alterada (= P-64, Biondi 2005) e dos minérios. A diminuição gradacional da Σ ETR das amostras de minério “profundo” (28 e 29) até as de minério de sub-superfície (PB-SV-110A) sugere que o minério formou-se pela substituição do granito Pombo por quartzo, muscovita e pelos sulfetos, causada por fluidos cujas composições foram provavelmente condicionadas pela composição do granito. A observação do diagrama multielementar leva a mesma conclusão. Portanto, os diferentes tipos de minérios são produtos de precipitados químicos e de transformação das rochas encaixantes que mantiveram as “assinaturas” geoquímicas semelhantes àquelas do granito Pombo.

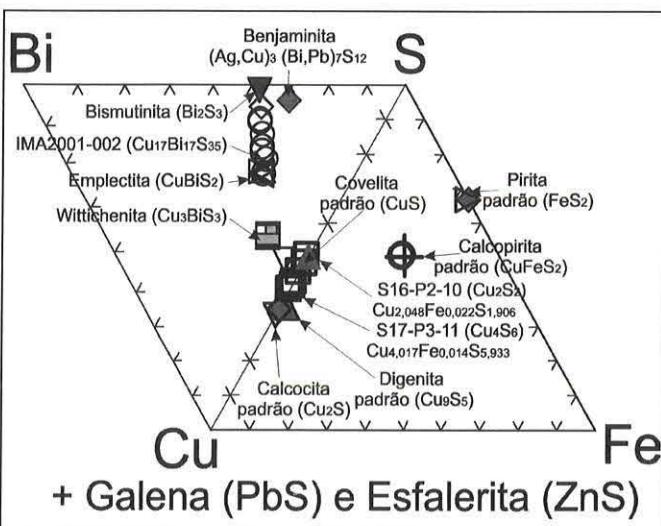


Figura 16 - Minerais que acompanham o ouro e a prata no minério do Pombo. A galena e a esfalerita devem ser juntadas a esses minerais, embora muito pouco presentes nos minérios.

Referências

- Biondi J.C. 2005. *Geologia e mineralogia do depósito de Au-Cu (Bi) Pombo (Terra Nova do Norte – MT)*. Tese de Livre Docência, Inst. de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 279 p.
- Chang Y.A., Goldberg D., Neumann J.P. 1977. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, **6**(3):621-674.
- Diman E.N. 1976. On the minimum fineness of gold associated with pyrite. *Geochemistry International*, **13**:63-70.
- Figueiredo B.R. 2000. *Minérios e Ambientes*. Editora UNICAMP, Campinas, 401 p.
- Franke N.D., Carvalho P.R.S.de , Villanova S.N., Biondi J.C. 2007. Depósito de Au-Cu (Bi) Pombo, Terra Nova do Norte (MT) – 2: Geologia geral, petrografia e petroquímica. *Rev. Brasil. Geociências* (submetido à RBG).
- Guillemain C. & Ovtracht A. 1960. *Éléments Natifs Sulfurés et Sulfosels*. Laboratoire de Géologie Appliquée, Université de Paris VI, Paris, França, 125 p.
- Sun S.S. & McDouough W.F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications of mantle composition and processes. In: A.D. Saunders & M.J. Norry (Eds.) *Magmatism in the Ocean Basins*. Geol. Soc. Spec. Publ., p.313 345.
- Uyttenbogaardt W. & Burke E.A.J. 1973. *Tables for microscopic identification of ore minerals*. Elsevier, Amsterdam, 430 p.
- Wyborn L.A.I., Wyborn D., Warren R.G., Drummond B.J. 1992. Proterozoic granite types in Austrália: Implications for lower crust composition, structure and evolution. *Trans. Royal Soc. Edinburgh Earth Sci*, **83**:210-209.

Manuscrito A1638
Aprovado em 27 de novembro de 2006