



Reinterpretação da geologia no entorno do prospecto “Descoberto”, satélite da mina aurífera Cuiabá, Minas Gerais, Brasil

Palavras-Chave: Geoquímica, Geologia estrutural, Ouro orogênico

Autoras:

Beatriz A. Fontes Andrade, IG – UNICAMP

Prof^a. Dr^a. Carolina Penteado Natividade Moreto (orientadora), IG – UNICAMP

INTRODUÇÃO:

O Quadrilátero Ferrífero (QFe) é um distrito mineral de relevância mundial, conhecido por seus depósitos de ferro, manganês, ouro, gemas e minerais industriais. Localizado no Cráton do São Francisco, em Minas Gerais, Brasil, o QFe está associado à histórica extração de ouro no país desde o século XVIII, durante a colonização portuguesa. Apesar disso, diversas questões permanecem em aberto, com destaque para a compreensão da arquitetura estrutural que controla a mineralização em escala de depósito. Este estudo visa a reinterpretação do mapa geológico na região do prospecto aurífero, com o objetivo de fornecer um produto cartográfico atualizado e aprimorado da geologia local. A área insere-se no contexto geológico da sequência metavulcanossedimentar do greenstone belt Arqueano Rio das Velhas (RV), com mineralização hospedada em veios de quartzo. Trata-se de uma região com escassez de afloramentos, cobertura vegetal densa, alto grau de intemperismo, relevo acidentado e solos bem desenvolvidos devido ao clima tropical. Nesse cenário, a integração de dados estruturais e geoquímicos com o mapeamento de campo contribui significativamente para a compreensão geológica em escalas local e regional. A interpretação recente sugere que o prospecto não está localizado no flanco norte de uma dobra recumbente, como anteriormente proposto, mas sim em uma zona de cisalhamento. A identificação de um dique de diabásio com direção NEE-SWW cortando a estrutura representa uma nova evidência, marcada por elevadas concentrações dos elementos Nb-Ta-Ti na análise química de solos e em testemunhos de sondagem. Os dados geoquímicos e os coeficientes de partição para minerais como titanita e ilmenita, em magmas basálticos a andesíticos, reforçam essa interpretação. O estudo destaca o valor de dados bem coletados e da sua reavaliação periódica à luz de novas evidências, além de ressaltar o potencial da geoquímica como ferramenta na elucidação geológica de terrenos altamente intemperizados e desafiadores para a pesquisa mineral.

METODOLOGIA:

Os métodos empregados na pesquisa consistiram em: 1) revisão bibliográfica; 2) confecção de produtos cartográficos intermediários para maior detalhamento do conhecimento prévio relacionado à área de estudo; 3) análise de dados litogeoquímicos multielementares no software Leapfrog Geo; 4) revisão de testemunhos de sondagem diamantada da área de interesse; 6) integração dos dados e correlação com a geologia da área.

CONTEXTUALIZAÇÃO GEOLÓGICA:

O QFe é um distrito mineral internacionalmente reconhecido em função de sua variedade de metais preciosos, ferrosos, minerais industriais essenciais e, mais recentemente, minerais críticos. Está situado no extremo sudeste do Cráton São Francisco e é principalmente conhecido pelos depósitos de ferro, ouro, gemas, manganês e minerais industriais (Pereira et al., 2013). O distrito tem sido objeto de intensos estudos pela sua complexa evolução estrutural e presença abundante de recursos minerais. A

litoestratigrafia do QFe foi e segue sendo estudada por diversos pesquisadores. Uma divisão bem aceita e consolidada (Dorr 1969, Alkmim & Marshak 1998, Endo et al. 2020) organiza o QFe, das unidades litoestratigráficas mais antigas para as mais recentes em: i) um embasamento granítico-gnáissico (TTG) arqueano, que inclui intrusões graníticas, diques máficos e pegmatitos; ii) seguido pelo Supergrupo Rio das Velhas (SGRV), uma sequência metavulcano-sedimentar característica de *greenstone belts* arqueanos; iii) o Supergrupo Minas, uma cobertura plataformal paleoproterozóica, com rochas clásticas e químicas; iv) Supergrupo Estrada Real, uma sucessão do tipo *flysch* e molassa; v) suítes intrusivas máficas e ultramáficas pós Supergrupo Minas que ocorrem por todo o QFe; e por fim, vi) coberturas sedimentares cenozóicas recentes que se manifestam de maneira mais restrita.

O SGRV é particularmente importante na região em termos de depósitos de ouro, pois abriga as principais mineralizações auríferas do QFe. Os principais depósitos auríferos no SGRV são interpretados como sendo de origem orogênica do tipo *gold only* (Lobato et al., 2001), e estão atrelados a um controle estrutural acentuado e zonas de sulfetação, silicificação, carbonatação, sericitização e cloritização associadas à alteração hidrotermal (Pereira et al., 2013). Estratigraficamente, o *greenstone belt* arqueano Rio das Velhas encontra-se no contexto do Supergrupo homônimo, que é dividido formalmente por Dorr (1969) nos grupos Nova Lima na base, contexto da área de estudo, e Maquiné no topo, com rochas metamorfizadas em fácies xisto verde (Pereira et al., 2013). O supergrupo é compartimentado em sete associações de litofácies propostas por Baltazar e Zucchetti (2007) e retomadas por Baltazar e Lobato (2020), formadas durante quatro episódios tectono-sedimentares distintos. No SGRV, são encontradas sequências turbidíticas com alternância de metagrauvacas e metapelitos, acompanhadas por diques e soleiras metamáficos (Roncato, 2015) e veios compostos por quartzo, carbonatos e sulfetos.

O Supergrupo Minas, do Proterozóico inferior, é uma sequência continental-marinha metassedimentar composta por depósitos clástico-químicos (Dorr, 1969), sobreposta ao SGRV. Ele é compartimentado da base para o topo nos grupos Tamanduá, Caraça, Itabira e Piracicaba. Por sua vez, o Supergrupo Estrada Real inclui os grupos Sabará e Itacolomi e ocorre sobre o Supergrupo Minas (Endo et al. 2020, Dorr 1969, Noce 1995, Reis et al. 2002). Quanto às demais unidades, Endo et al. 2020 discutem que, embora comuns em todo o QFe, as intrusões máfico-ultramáficas após o Supergrupo Minas ocorrem com mais frequência na porção sul. No que tange à evolução metamórfica e estrutural do QFe, as sequências supracrustais possuem um histórico polifásico e complexo de deformação (Lobato et al., 2001), metamorfismo e geração de estruturas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

O estudo dos resultados da análise geoquímica multielementar de solo permite observar um trend positivo de concentrações de nióbio (Nb), tântalo (Ta) e titânio (Ti) acima do background da área de interesse (Figura 1). As concentrações de Nb mapeadas variam de 0,5 a 5 pmm. Ao longo do trend, observa-se variações de 4 a 5 ppm, enquanto as regiões adjacentes possuem predominantemente valores inferiores a 1,5 ppm. Para Ta, as concentrações variam de 0,025 a 0,4 ppm. Na região do trend observa-se variações de 0,3 a 0,4 pmm, enquanto lateralmente as concentrações mais recorrentes são inferiores a 0,15 ppm. Por sua vez, as concentrações de Ti obtidas a partir da amostragem variam de 0,025 a 0,3 ppm, sendo que ao longo do trend constata-se valores entre 0,27 e 0,3 e inferiores a 0,15 ppm nas áreas adjacentes. A sobreposição dos dados georreferenciados evidencia que a ocorrência das altas concentrações de Nb, Ta e Ti coincide espacialmente com o que vinha sendo interpretado como flanco sul de uma dobra recumbente na região. É observado, por outro lado, que a ocorrência de altas concentrações de Nb, Ta e Ti não ocorrem ao longo do suposto flanco norte da dobra, assim como não são recorrentes na área de estudo. A investigação dos dados de geoquímica de solo abre margem para uma discussão do mapa geológico vigente, com ênfase na estrutura que abriga o prospecto.

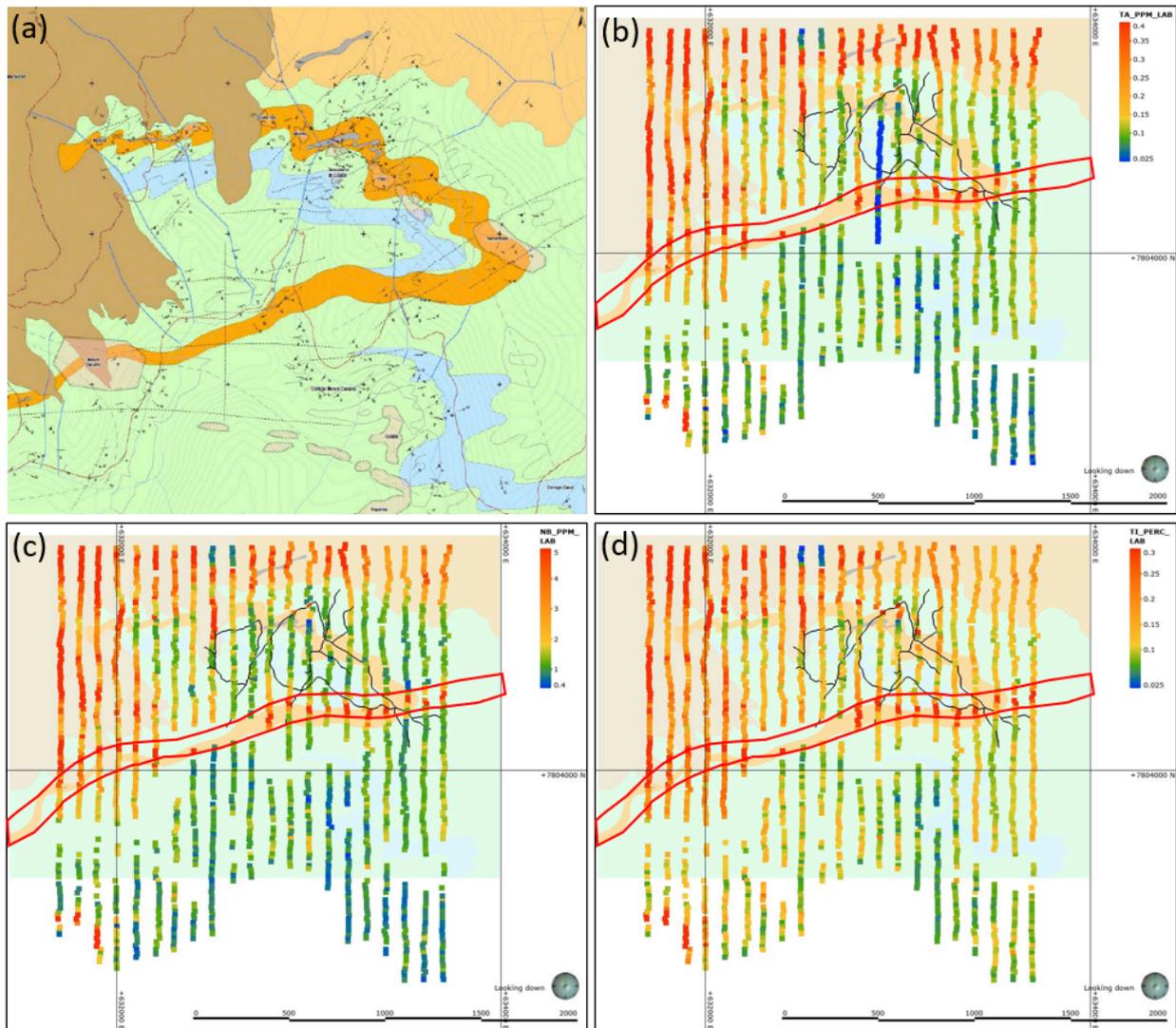


Figura 1: (a) Representação gráfica da dobra principal na área de estudo, fora de escala. Mapas de geoquímica de solo para os elementos Nb (b), Ta (c) e Ti (d). Nas representações cartográficas de (b) a (d) as concentrações aumentam das cores mais frias para as mais quentes.

Para o Nb, há concentrações de até 5 ppm na região do “flanco sul”, destacado pelo polígono vermelho. Observa-se que os altos teores nessa região não apresentam tendência de seguir ou dobrar para o “flanco norte”, seguindo para NEE e atravessando a região. O mesmo ocorre para o Ta, cujas concentrações mais elevadas na área são de 0,4 ppm, e para o Ti, com concentrações de até 0,3 ppm. De acordo com a classificação de Rudnick & Gao (2014), valores anômalos de Nb, Ta e Ti na crosta superior são de 12, 0,9 e 0,64 ppm, respectivamente. Nesse sentido, ressalta-se que as altas concentrações observadas ao longo do trend, destacado nos mapas, são valores acima do background da geologia local, mas não estão necessariamente acima dos valores médios encontrados na crosta superior.

Campanhas de sondagem pretéritas realizadas na área de estudo também interceptaram, em profundidade e de forma localizada, uma rocha ígnea intrusiva previamente classificada como um dique ou soleira de metadiabásio (figura 2) com bordas de resfriamento preservadas. O contexto geológico da área de estudo prevê a ocorrência de diques e soleiras metamáficos distribuídos ao longo do Quadrilátero Ferrífero (Roncato, 2015), no entanto, essa ocorrência ainda não foi identificada em superfície e nem distribuída de forma menos pontual na área de estudo. A rocha intrusiva interceptada em profundidade foi amostrada para geoquímica multielementar e os resultados indicam valores de Nb, Ta e Ti acima do background e muito próximos dos que ocorrem no trend que coincide com o “flanco sul” da estrutura presente no mapa geológico vigente.



Figura 2: Testemunho de sondagem do metadiabásio interceptado em profundidade.

Os elementos Nb, Ta e Ti são caracterizados como elementos traço, pois ocorrerem nas rochas em concentrações menores do que 0,1% sendo comumente expressos em partes ou milhão (ppm) ou bilhão (ppb) (Faure, 1998). Por sua vez, os elementos maiores são os principais formadores de minerais e ocorrem em abundância superior a 1% nas rochas, enquanto os menores variam em concentrações entre 0,1 e 1%. Em sistemas magmáticos, diferentes fases minerais tendem a incorporar ou excluir os elementos traço com uma seletividade muito superior àquela que ocorre para os elementos maiores e menores, de modo que o grupo dos elementos traço é significativamente mais sensível aos processos de fracionamento durante a cristalização de rochas ígneas (Winter, 2001). Por esta e outras razões, os elementos traço possuem uma série de aplicações nas geociências, como no estudo da origem e evolução de magmas. O autor ressalta que dada a quantidade de elementos traço existentes, nem todos são comuns ou adequados em análises petrogenéticas, no entanto, tanto o nióbio, quanto o tântalo, e o metal de transição titânio são listados como estando entre os mais utilizados.

Um dos fatores que controla o comportamento geoquímico dos elementos traço é o coeficiente de partição (K_d) (Rollinson, 1993). No diabásio a composição mineralógica da rocha é dominada por plagioclásio ((Na,Ca)Al(Si,Al)Si₂O₈) e piroxênio, com ocorrência também de magnetita (Fe₃O₄) e ilmenita (FeTiO₃) e menor quantidade de biotita (K(Mg,Fe²⁺)₃[AlSi₃O₁₀](OH,F)₂) e quartzo (SiO₂) (Chaves, 2011). Em magmas basálticos e andesíticos o coeficiente de partição (K_d) do Ti, Nb e Ta é menor do que 1 para os piroxênios e plagioclásios, ao passo em que para a titanita o K_d do Nb e Ta corresponde a 4,65 e 13 respectivamente nesses magmas (Rollinson, 1993). Nesse sentido, tanto o Nb quanto o Ta possuem afinidade geoquímica para entrar na estrutura cristalina da titanita, correspondente à fase sólida. Para a magnetita, o K_d do Ti corresponde a 7,5 e também apresenta afinidade com a fase sólida. Nos magmas andesíticos o comportamento dos piroxênios e plagioclásios assemelha-se ao que é esperado nos magmas basálticos e os elementos Nb Ta e Ti preferem a fase líquida. Para a magnetita o K_d do Ti é bastante elevado ($K_d=9000$) e o elemento apresenta elevada afinidade geoquímica com o mineral, assim como o Nb ($K_d=1000$). Para a titanita o K_d do Nb e Ta é ainda mais elevado, correspondendo a 6100 e 17000 respectivamente, de modo que os elementos apresentam elevada afinidade com a fase sólida.

Além do coeficiente de partição, os elementos traço também têm seu comportamento definido pelo potencial iônico (Winter, 2001), isto é, pela relação entre a carga e o raio iônico. Os elementos com elevado potencial iônico, como Nb, Ta e Ti possuem carga iônica grande e raio iônico pequeno e podem ser considerados como relativamente imóveis em processos como metamorfismo e intemperismo (Chaves, 2011). Nesse sentido, podem guardar aspectos dos magmas originais. Por sua vez, em um dique de diabásio metamorfozado em baixo grau metamórfico, como fácies xisto verde ou anfíbolito inferior, os piroxênios são transformados para anfibólios (Frost, 2013; Bucher e Grapes, 2011)). Estes podem ser actinolita, se em fácies xisto verde, ou hornblenda se em fácies anfíbolito. Para o anfibólio o K_d do Nb e Ta é superior a 1 (Rollinson, 1993), diferentemente do que ocorre para os piroxênios e nesse sentido, estes elementos também apresentam afinidade geoquímica com a fase sólida.

Nesse contexto, a integração dos dados de geoquímica de solo e da rocha amostrada a partir do furo de sondagem permite correlacionar o “flanco sul” da estrutura com a rocha intrusiva interceptada pelo furo. Este estudo abre margem para reinterpretar este flanco como sendo um dique de composição máfica a intermediária, marcado em superfície pela geoquímica de solo e em profundidade pela rocha intrusiva interceptada, correspondente ao dique em subsuperfície. Nesse sentido, a macroestrutura presente no mapa é reinterpretada de uma dobra recumbente para uma zona de cisalhamento (“flanco norte”), interceptada por um dique de metadiabásio, anteriormente interpretado como um flanco ao sul.

CONCLUSÕES:

O presente estudo da área prospectiva para ouro, situada no contexto do Quadrilátero Ferrífero (QFe), proporcionou uma reinterpretação importante da estrutura geológica local. Através da revisão de testemunhos de sondagem, análise de geoquímica de solo e integração de dados com o contexto geológico, identificou-se anomalias significativas de Nb, Ta e Ti, levando à reinterpretação da estrutura principal de uma dobra recumbente para uma zona de cisalhamento interceptada por um dique de metadiabásio. Essa nova interpretação preenche lacunas do mapa geológico vigente e oferece uma base mais sólida para decisões de exploração e desenvolvimento mineral na região.

Ao fornecer uma interpretação geológica mais precisa e detalhada, este estudo fortalece a credibilidade técnica dos produtos cartográficos produzidos e assegura que as estratégias de exploração sejam fundamentadas em dados geológicos atualizados e precisos. A atualização cartográfica resultante orientará futuras campanhas de sondagem e outras atividades de geologia de exploração, contribuindo significativamente para o avanço do conhecimento geológico da região do QFe e para a alocação de recursos.

BIBLIOGRAFIA

- Alkmim F. F. & Marshak S.. 1998. The transamazonian orogeny in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil: Paleoproterozoic collision and collapse in the Southern São Francisco craton region. *Prec. Res.* 90, p.29-58.
- Baltazar O.F. e Zucchetti M., 2007. Lithofacies associations and structural evolution of the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: a review of the setting of gold deposits. *Ore Geology Reviews* 32, 1–2.
- Baltazar, Orivaldo Ferreira; Lobato, Lyda Maria, 2020. Structural Evolution of the Rio das Velhas Greenstone Belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: Influence of Proterozoic Orogenies on Its Western Archean Gold Deposits. *Minerals*, v. 10, n. 11, p. 983.
- Bucher, K.; Grapes, R. 2011. *Petrogenesis of metamorphic rocks*. 8. ed. rev. e atual. Berlin: Springer, 428p.
- Chaves, 2011. O enxame de diques de anfíbolito do Cráton São Francisco Meridional. *Revista Brasileira de Geociências*, volume 4 (3).
- Dorr J. V. N. II. 1969. Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. U. S. Geological Survey Prof. Paper 641-A, 110p.;
- Endo, Issamu et al., 2020. Quadrilátero Ferrífero: Avanços do conhecimento nos últimos 50 anos. 1. ed. Belo Horizonte: 3i. 480 p. v. 1. ISBN 978-65-990542-8-0. Disponível em: <https://www.em.ufop.br/files/LivrosQFE2050/QuadrilateroFerrifero-web5.pdf>.
- Faure, G., 1998. *Principles and Applications of Geochemistry: a comprehensive textbook for geology students*, Prentice-Hall Inc. 2nd Edition, 600 p.
- Frost, R.B and Frost, C.D. 2013. *Essentials of Igneous and Metamorphic Petrology*. Cambridge University Press, U.K. ISBN: 9781107696297, 314 pages.
- Lobato L.M., Ribeiro-Rodrigues L.C., Zucchetti M., Noce C. M., Baltazar O.F., Pinto C.S.C.P., 2001. Brazil's premier gold province. Part I: The tectonic and structure setting of the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero. *Mineralium Deposita* 36: 228-248.
- Noce C. M.. 1995. *Geocronologia dos eventos magmáticos, sedimentares e metamórficos na região do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais*. Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 129 p.
- Pereira M.A.S., Lobato L.M., Rosière C.A., Silva R.C.F., 2013. Classificação dos veios quartzo carbonáticos de depósitos auríferos no lineamento córrego do sítio, QF, MG. *Geonomos*, 21(2):53-71.
- Reis L. A., Martins-Neto M.A., Gomes N.S., Endo I.. 2002. A bacia de antepaís paleoproterozóica Sabará, Quadrilátero Ferrífero, MG. *Rev. Bras. de Geoc.* 32, 43-58;
- Rollinson, H. 1993. *Using geochemical data: Evaluation, Presentation and interpretation*.
- Roncato, Jorge Geraldo et al. Metaturbidite-hosted gold deposits, Córrego do Sítio lineament, Quadrilátero Ferrífero, Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, v. 45, p. 5-22, 2015.
- Rudnick, R., & Gao, S. 2014. *Composition of the Continental Crust*. *Treatise on Geochemistry*, p. 1–51.
- Winter, J. 2001. *An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology*. New Jersey: Prentice-Hall. 697p.