

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Instituto de Geociências

Programa de Pós-Graduação em Geologia

Henrique Borgatti

**MINERAÇÃO ARTESANAL DE OURO EM PEQUENA ESCALA NA SERRA DO
ESPINHAÇO MERIDIONAL – BRASIL, UTILIZANDO INDUÇÃO
ELETROMAGNÉTICA NO DOMÍNIO DO TEMPO: prospecção, eficiência e aspectos
ambientais**

Belo Horizonte

2022

Henrique Borgatti

**MINERAÇÃO ARTESANAL DE OURO EM PEQUENA ESCALA NA SERRA DO
ESPINHAÇO MERIDIONAL – BRASIL, UTILIZANDO INDUÇÃO
ELETROMAGNÉTICA NO DOMÍNIO DO TEMPO: prospecção, eficiência e aspectos
ambientais**

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

Orientador: Prof. Dr. Luiz Guilherme Knauer

Belo Horizonte

2022

B732m
2022

Borgatti, Henrique.

Mineração artesanal de ouro em pequena escala na Serra do Espinhaço Meridional – Brasil, utilizando indução eletromagnética no domínio do tempo [manuscrito] : prospecção, eficiência e aspectos ambientais / Henrique Borgatti. – 2022.

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

Orientador: Luiz Guilherme Knauer.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2022.

Área de concentração: Geologia Regional.

Bibliografia: f. 78-83.

1. Minas e recursos minerais – Espinhaço, Serra do (MG e BA) – Teses. 2. Prospecção – Métodos geofísicos – Teses. 3. Ouro – Teses. I. Knauer, Luiz Guilherme. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. III. Título.

CDU: 550.3:553.04(815.1+813.8)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA DO IGC-UFMG



FOLHA DE APROVAÇÃO

Mineração artesanal de ouro em pequena escala na Serra do Espinhaço Meridional – Brasil, utilizando indução eletromagnética no domínio do tempo: Prospecção, eficiência e aspectos ambientais

HENRIQUE BORGATTI

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

Aprovada em 15 de dezembro de 2022, pela banca constituída pelos membros:

Prof. Luiz Guilherme Knauer – Orientador
UFMG

Prof. Jorge Geraldo Roncato Júnior
UFMG

Prof. Pedro Augusto da Silva Rosa
UFMG

Belo Horizonte, 15 de dezembro de 2022.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Beatriz e Bruno e minha avó Leda pelo amor, carinho, compreensão e grande incentivo aos estudos e à ciência.

À minha irmã Cecília pelo exemplo de esforço e sucesso, revisão e comentários no texto.

À Nayara pelo companheirismo, incentivo, revisão e comentários no texto.

Aos prospectores Itamar Maurício Pereira Neto, Emerson Aparecido Alves Afonso e suas famílias pela hospitalidade, por permitirem o acompanhamento das campanhas prospectivas e por fornecerem amostras para análise e caracterização. A curiosidade e o interesse científico inatos em vocês foram imprescindíveis para a realização deste trabalho.

Ao meu orientador Luiz Guilherme Knauer pela amizade, compreensão, inúmeras discussões geológicas e o suporte necessário para o desenvolvimento do projeto.

À Pró-Reitoria de Pós-Graduação (PRPg) da UFMG e ao Programa de Pós-Graduação em Geologia do Instituto de Geociências (IGC-UFMG). À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) pela bolsa de mestrado concedida.

À Prof. Aline Tavares de Melo pela grande contribuição nas discussões, orientação e revisão do artigo fruto deste projeto. Ao Prof. Pedro Benedito Casa Grande pelas discussões e suporte no andamento da pesquisa. Ao Prof. Antônio Wilson Romano pela contribuição em campanhas de campo. Ao Prof. Matheus Kuchenbecker pelas imagens gentilmente cedidas. Ao Prof. Marcelo de Almeida Freimann pelas discussões, revisão e comentários. Ao Prof. Ted Steinberg pela revisão e comentários importantes.

À UFMG e seus servidores, pela estrutura e por promover pesquisa e ensino público, gratuito e de qualidade.

Ao SUS, órgãos de pesquisas e pesquisadores brasileiros que enfrentaram o negacionismo científico e fizeram todo o possível para controlar rapidamente a pandemia do COVID-19.

Aos amigos que levamos para vida e todos àqueles que, de alguma forma, contribuíram neste percurso, meus sinceros agradecimentos!

“The greatest adventure is what lies ahead.
Today and tomorrow are yet to be said.”
(J. R. R. Tolkien, 1937)

RESUMO

Encontrar grandes volumes de ouro livre na natureza é algo que sempre fez parte do imaginário humano e está intimamente ligado à maneira como o Brasil foi explorado e colonizado. Essa herança prospectiva ainda se faz presente, com muitas comunidades envolvidas e dependentes da mineração artesanal em pequena escala de ouro. Os depósitos auríferos mais relevantes da Serra do Espinhaço Meridional estão associados às zonas de cisalhamento, os quais ocorrem especialmente na faixa entre as cidades de Diamantina e Gouveia, Minas Gerais, afetando rochas graníticas do Complexo Gouveia, sequências xistosas do Grupo Costa Sena e metassedimentos/metavulcanitos do Supergrupo Espinhaço. Antigas minas do período colonial foram exauridas, no entanto, o uso de novas tecnologias de prospecção para a mineração de ouro despertou interesse nessas áreas. Nesse contexto, este trabalho avalia a eficiência, os impactos ambientais e a viabilidade econômica da utilização de indução eletromagnética no domínio do tempo como método de exploração artesanal de ouro em pequena escala no município de Gouveia, embora o estudo seja replicável em áreas semelhantes ao redor do mundo. Além disso, também é do escopo do trabalho a caracterização da mineralização e mineralogia do ouro local ao longo das três áreas escolhidas para prospecção, bem como conscientizar a comunidade prospectora sobre os aspectos ambientais e legais da mineração de ouro. As amostras de ouro localizadas apresentaram morfologia, profundidade e peso específicos que sugerem uma origem hipogênica para mineralização com baixo grau de transporte nos níveis eluvionares. Do ponto de vista ambiental, comparativamente aos métodos arcaicos de mineração artesanal de ouro, os equipamentos de indução eletromagnética no domínio do tempo apresentaram baixos impactos ambientais, restritos à remobilização pontual do solo. Essa prática prospectiva é importante, tanto social quanto economicamente, para a comunidade local na área de estudo. Diante disso, conclui-se que a utilização de métodos geofísicos para prospecção de ocorrências de ouro subsuperficial nos níveis regolíticos utilizando-se de equipamentos portáteis e de fácil operação é eficiente, ambientalmente sustentável e economicamente viável para a região estudada e áreas similares.

Palavras-chave: mineração artesanal e em pequena escala; prospecção geofísica; detecção metálica; ouro; Serra do Espinhaço Meridional (SdEM).

ABSTRACT

The attempt to locate large deposits of native gold in nature is a long-dating practice in human history. Gold mining has profound ties to the history of Brazilian colonization and exploitation. This prospective heritage still takes place, with many communities involved with and dependent on artisanal and small-scale gold mining. The more relevant gold deposits in the Southern Espinhaço Range, Brazil are related to the occurrence of shear zones which mostly occur in the region between the cities Diamantina and Gouveia, Minas Gerais, affecting mostly the Gouveia Complex granite rocks, the Costa Sena Group schist sequences, and the Espinhaço Supergroup metasediments/metavolcanites. Former colonial-dated gold mines were depleted, however, the use of newer prospecting practices for gold mining has brought new interest in these areas. In this context, this study assesses the efficiency, environmental impacts and economic viability of using time-domain electromagnetic induction as a gold exploration method for small-scale gold prospecting in the Gouveia county, though the study is likely applicable to similar mining areas across the world. Additionally, this work provides a characterization of the local gold mineralization and mineralogy along the three chosen areas for exploration, as well as bringing awareness to the prospecting community regarding environmental and legal aspects of gold mining. The gold samples located have specific morphology, depth and weight that suggest a hypogenic origin for this mineralization with a low degree of transport at eluvial levels. From an environmental perspective, compared to the more archaic small-scale and artisanal mining methods, the time-domain electromagnetic induction equipment has presented less environmental impacts, related mostly to site-specific remobilization of the soil. This prospecting practice is important, both socially and economically, for the local community in the study area. Considering this, the conclusion is made that the utilization of geophysical methods for prospecting subsurface gold occurrences in the regolith levels through the use of portable equipment with simple operation is efficient, environmentally friendly and economically viable for the studied region and similar areas.

Keywords: artisanal and small-scale gold mining (ASGM); geophysical prospecting; metal detecting; gold; Southern Espinhaço Range.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa geológico esquemático da Serra Meridional do Espinhaços e regiões adjacentes, detalhe para localização da área do estudo – Município de Gouveia, Minas Gerais	12
Figura 2. Relação estratigráfica para as unidades de interesse do estudo	20
Figura 3. Mapa geológico esquemático da Serra Meridional do Espinhaço e regiões adjacentes, detalhe para as áreas do estudo localizadas no município de Gouveia, Minas Gerais	22
Figura 4. Área de estudo A1 localizada no município de Gouveia, Minas Gerais.....	23
Figura 5. Área de estudo A2 localizada no município de Gouveia, Minas Gerais.....	24
Figura 6. Área de estudo A3 localizada no município de Gouveia, Minas Gerais.....	25
Figura 7. Mapa geológico esquemático da Serra Meridional do Espinhaço e regiões adjacentes, com detalhe para a Área 1, de onde as amostras descritas a seguir foram prospectadas	38
Figura 8. Amostra #A1-01	39
Figura 9. Amostra #A1-02.....	40
Figura 10. Amostra #A1-03.....	41
Figura 11. Amostra #A1-04.....	42
Figura 12. Amostra #A1-05.....	43
Figura 13. Amostra #A1-06.....	44
Figura 14. Amostra #A1-07.....	45
Figura 15. Amostra #A1-08.....	46
Figura 16. Amostra #A1-09.....	47
Figura 17. Amostra #A1-10.....	48
Figura 18. Mapa geológico esquemático da Serra Meridional do Espinhaço e regiões adjacentes, com detalhe para a Área 2, de onde as amostras descritas a seguir foram prospectadas	49
Figura 19. Amostra #A2-01	50
Figura 20. Amostra #A2-02.....	51
Figura 21. Amostra #A2-03.....	52
Figura 22. Amostra #A2-04.....	53
Figura 23. Amostra #A2-05.....	54
Figura 24. Amostra #A2-06.....	55
Figura 25. Amostra #A2-07.....	56
Figura 26. Amostra #A2-08.....	57
Figura 27. Amostra #A2-09.....	58
Figura 28. Amostra #A2-10.....	59

Figura 29. Mapa geológico esquemático da Serra Meridional do Espinhaço e regiões adjacentes, com detalhe para a Área 3, de onde as amostras descritas a seguir foram prospectadas	60
Figura 30. Amostra #A3-01	61
Figura 31. Amostra #A3-02.....	62
Figura 32. Amostra #A3-03.....	63
Figura 33. Amostra #A3-04.....	64
Figura 34. Amostra #A3-05.....	65
Figura 35. Amostra #A3-06.....	66
Figura 36. Amostra #A3-07.....	67
Figura 37. Amostra #A3-08.....	68
Figura 38. Amostra #A3-09.....	69
Figura 39. Amostra #A3-10.....	70
Figura 40. Diagrama triangular com as relações geométricas entre os sete tipos distintos de formas do sistema cristalográfico isométrico.....	72
Figura 41. Variação colorimétrica no sistema Au-Ag-Cu.....	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Datas das campanhas de campo.....	26
Tabela 2. Formas do sistema cúbico, índice de Miller e frequência relativa	71

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
	1.1 Considerações iniciais	11
	1.2 Justificativa	11
	1.3 Organização da dissertação	12
	1.4 Breve histórico da mineração na Serra do Espinhaço meridional	13
2	CONTEXTO GEOLÓGICO	16
	2.1 Trabalhos anteriores	16
	2.2 Contexto regional	18
	2.3 Mineralizações auríferas na SdEM.....	20
	2.4 Contexto geológico local.....	21
3	METODOLOGIA	26
	3.1 Campanhas de campo	26
	3.2 Tratamento de dados.....	27
	3.3 Princípio de funcionamento – Sensores de indução eletromagnética.....	28
4	ARTIGO	29
5	CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA	38
	5.1 Discussões mineralógicas	71
6	CONCLUSÃO	76
7	REFERÊNCIAS	78

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

Este volume consiste nos resultados do trabalho de pesquisa desenvolvido pelo discente Henrique Borgatti ao longo do curso de mestrado em Geologia Regional pelo Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal de Minas Gerais.

O trabalho foi desenvolvido no período de Março de 2020 a Dezembro de 2022, e foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, no período de Março de 2020 a Agosto de 2022. Trabalhos de campo foram custeados Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal de Minas Gerais e eventuais amostras minerais foram adquiridas pelo discente.

A área de estudo se localiza na Serra do Espinhaço, feição geomorfológica que se estende por mais de 1200 km entre os estados de Minas Gerais e Bahia em direção preferencial N-S. O projeto tem como foco a região meridional da Serra do Espinhaço, mais precisamente o município de Gouveia, Minas Gerais.

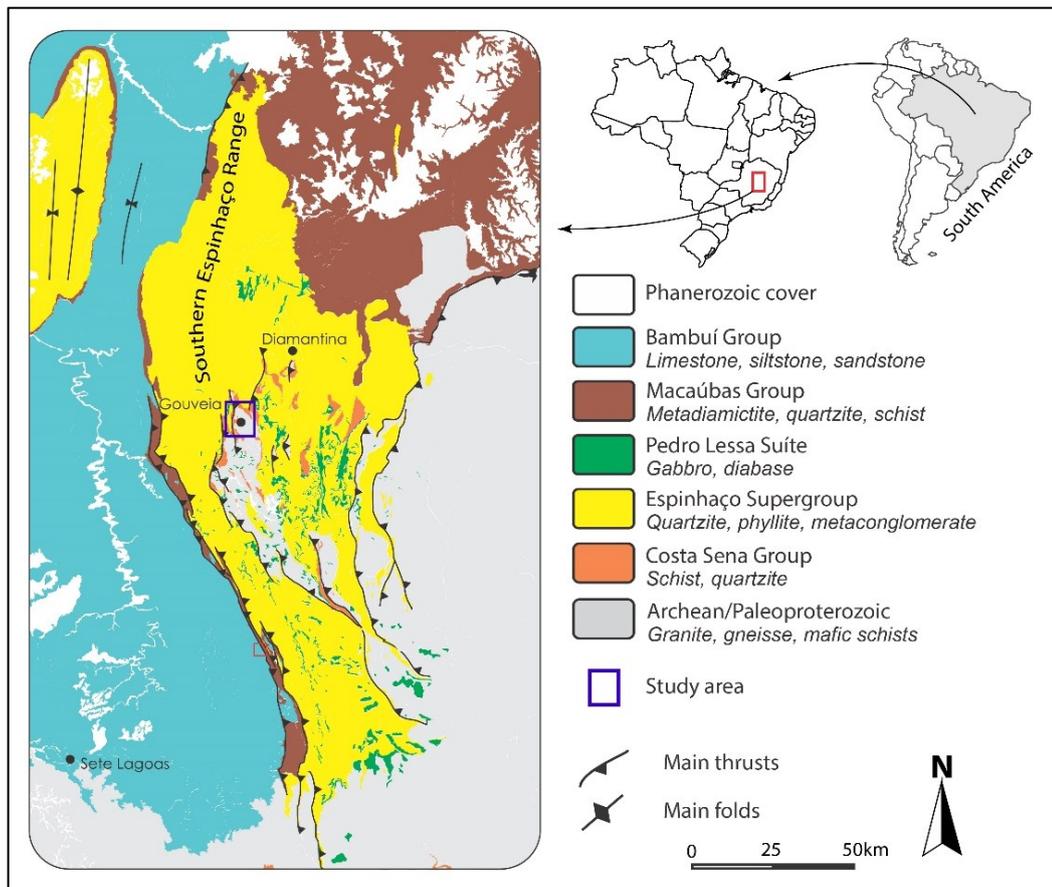
1.2 Justificativa

A mineração artesanal em pequena escala é presente em diversas partes do mundo, sendo fortemente localizada nos países em desenvolvimento. São atividades, em sua grande maioria, informais e ilegais, sendo realizadas em condições trabalhistas precárias e representando grandes impactos ambientais. Por outro lado, apresentam papel crucial na redução da pobreza em nível local, correspondendo a uma atividade econômica promissora, senão a única disponível para algumas populações em situação de vulnerabilidade. Historicamente, este tipo de exploração foi muito importante para descoberta de diversas jazidas em território brasileiro durante o período colonial, entretanto representa nos dias atuais grandes impactos socioambientais. Dessa maneira, urge o aprofundamento desta temática por parte das esferas acadêmicas, governamentais e particulares para apresentação de diretrizes prospectivas, novas tecnologias e formalização da atividade.

Diante desse contexto, os objetivos desta dissertação consistiram em: (i) mapear ocorrências auríferas no município de Gouveia, Minas Gerais (Figura 1); (ii) acompanhar

prospecções auríferas que utilizam equipamentos geofísicos de indução eletromagnética no domínio do tempo em uma área chave pertencente ao município em questão para verificar a sua eficiência, impactos ambientais e a viabilidade econômica; (iii) caracterizar a mineralização e a mineralogia aurífera ali existente; e, por fim, (iv) conscientizar os prospectores artesanais de seus impactos ambientais e instruí-los na formalização e legalização da atividade minerária artesanal em pequena escala.

Figura 1. Mapa geológico esquemático da Serra Meridional do Espinhaços e regiões adjacentes, detalhe para localização da área do estudo – Município de Gouveia, Minas Gerais



Fonte: Modificado de (Kuchenbecker, 2019, p. 3).

1.3 Organização da dissertação

Esta dissertação consiste em seis capítulos, organizados da seguinte maneira:

O Capítulo 1 – Introdução consiste na apresentação do trabalho, as justificativas para a sua realização e um breve histórico da mineração aurífera na região do estudo.

O Capítulo 2 – Contexto Geológico apresenta contextualização acerca do estado da arte, geologia regional e local, além da metalogênese para área de estudo.

O Capítulo 3 – Metodologia apresenta a organização metodológica do estudo.

O Capítulo 4 – Artigo “Artisanal and Small-Scale Gold Mining in the Southern Espinhaço Range, Brazil Using Time-Domain Electromagnetic Induction: Prospecting, Efficiency and Environmental Aspects” consiste nos principais resultados obtidos ao longo deste curso de mestrado e suas interpretações, submetido à revista *Brazilian Journal of Geology* em novembro de 2022 e publicado em 2023.

O Capítulo 5 – Caracterização Mineralógica apresenta dados acerca da mineralogia aurífera das ocorrências prospectadas ao longo do desenvolvimento do projeto que complementam os dados apresentados no artigo.

O Capítulo 6 – Conclusões apresenta as conclusões do trabalho, implicações e apontamentos futuros.

1.4 Breve histórico da mineração na Serra do Espinhaço meridional

Os paulistas foram os primeiros que, devassando o sertão, descobriram ouro. Um documento oficial da câmara de São Paulo menciona um certo Afonso Sardinha como autor da primeira descoberta de ouro em solo brasileiro, na serra de Jaraguá, em 1590, na capitania de São Vicente. O rumor da descoberta espalhou-se como fogo nas secas campinas inflamáveis. Ouro! Ouro! Ouro! Foi a senha.

Pessoas de todas as condições, fidalgos e plebeus, ricos e pobres abandonaram seus lares, seus negócios, família, bens, todos estavam possuídos de visões sedutoras que os impeliam a pesquisar morros, lagoas e rios auríferos, todos revolucionados por centenas de boatos fabulosos. O desejo de tornar realidade esperanças de grande riqueza, fê-los arrostar extraordinários perigos.

A rápida exaustão do ouro vicentino excitou os intrépidos paulistas a aventurarem-se pelo interior. Matas impenetráveis, escarpas abruptas, correntes impetuosas, e mesmo índios antropófagos, constituíam forte obstáculo aos invasores que tentassem penetrar na Província (futuramente Minas Gerais). As primeiras entradas tiveram por objetivo a caça de índios, e somente mais tarde, com a descoberta casual de pedras preciosas e ouro, atiçaram o interesse dos colonizadores. (Eschwege, 1979, p. 23-24).

A data e a primazia da descoberta do ouro em Minas Gerais são tema de debate há séculos, com amplas divergências entre historiadores. Atualmente a historiografia tem firmado entendimento de que o descobrimento aconteceu de forma simultânea, em vários pontos de Minas Gerais, entre 1693 e 1695, e que o termo “descobrimento” seria melhor interpretado como manifestação do descobrimento pelos colonizadores (Figueiredo, 2012).

Uma descoberta importante do ponto de vista mineral ocorreu na região da Serra do Espinhaço e povoamento de pequenos vilarejos e arraiais nesta região só foi possível a partir da bandeira de Fernão Dias Paes, que em 1678, estabeleceu a base definitiva para a conquista do sertão entre São Paulo e Bahia. Pela primeira vez até então, uma grande empreitada conseguiu não somente comunicar-se com a civilização, como também sobreviver longos períodos entre os perigos e intemperes do interior da colônia. A antiga picada de índio que

ligava São Paulo ao miolo de Minas Gerais, antes inacessível aos brancos, se tornou um caminho que não mais se fecharia (Figueiredo, 2012).

No início do século XVIII, o bandeirante Antônio Soares Ferreira e sua comitiva, atingiram uma região chamada pelos indígenas locais de Hivituruí que significa, Grande Serro do Frio. Nesta região encontraram córregos ricos em ouro, notícia que rapidamente se espalhou, atraindo diversos aventureiros. Em 1714, foi elevada à categoria de Vila e denominada Vila do Príncipe. Após a instalação da casa de fundição, em 1720, se tornou sede da Comarca do Serro do Frio (IBGE, 2022).

A população da Comarca do Serro do Frio logo se expandiu, proporcionando novas incursões nos arredores das até então jazidas auríferas conhecidas. Jerônimo Corrêa, liderou um grupo seguindo o curso do Rio Jequitinhonha chegando à confluência do Córrego Piruruca e o Rio Grande, ali se fixou ao encontrar o desejado metal precioso, dando origem à um novo arraial denominado Tijuco (Silveira *et al.*, 2012). Ainda na década de 1720, neste arraial foram encontrados os primeiros diamantes em solo americano, mineral-gema que trouxe exacerbada fama à região e, que por ser muito mais valioso que o ouro, transferiu rapidamente o interesse de todos para si.

A descoberta do diamante promoveu grande crescimento urbano no Arraial do Tijuco que, por sua vez, só seria elevado à condição de Vila, com o nome de Diamantina, em 1831 (Gonçalves, 2012). Durante os 150 anos seguintes à descoberta, a região de Diamantina foi a maior produtora de diamantes do mundo: em 1870, dois terços dos diamantes produzidos no mundo vinham do Brasil, sendo a maioria desta região (Chaves *et al.*, 2001). Os quase três séculos de exploração ininterrupta, causaram a exaustão das jazidas de fácil extração, culminando na queda vertiginosa da atividade garimpeira. Não obstante, esta atividade ainda se faz presente, em escala menor, mas com relevantes impactos para população local (Kuchenbecker *et al.*, 2016).

O século XIX foi marcado pelo ápice da exploração diamantífera na região meridional da Serra do Espinhaço e o ouro, ainda que presente em abundância, era tido como subproduto da exploração do diamante, poucos eram aqueles que se lançavam ao garimpo aurífero, tendo em vista a altamente lucrativa e de fácil extração cadeia produtiva do diamante.

Quando a exploração da gema começou a mostrar sinais de exaustão, os olhos de muitos mineradores se voltaram novamente ao minério aurífero, ali ainda rico. Pesquisas preliminares foram conduzidas em vias de se descobrir a fonte primária do ouro aluvionar e, até a primeira metade do século XX diversas jazidas de ouro foram descobertas e exploradas. De acordo com Moraes *et al.* (1937) a lavra do Capitão Felizardo teve o início das atividades exploratórias em

1935, mais de mil homens ali trabalharam consecutivamente e estima-se que pelo menos 25 kg de ouro foram extraídos.

Em uma área de aproximadamente 7000 km² abrangendo os municípios de Gouveia e Diamantina, diversos prospectos auríferos foram descritos em (Dossin; Chaves; Dossin, 1990). Entre eles se destacam as seguintes lavras: Capitão Felizardo; Pacheco; Tatu; Periquito; Serra dos Caboclos; Mil Oitavas. Em sua maioria foram exploradas em catas à céu aberto, mas algumas se adentraram às serras em pequenos túneis precários. Ao final do século XX todas as lavras supracitadas já haviam encerrado suas atividades, fato que converge à conclusão de Moraes *et al.* (1937), na qual a mineralização aurífera nesta região devia se tratar de concentrações locais.

2 CONTEXTO GEOLÓGICO

2.1 Trabalhos anteriores

A Cordilheira do Espinhaço, vultuosa cadeia de montanhas que se estende com direção aproximada N-S por mais de 1200 km nos estados de Minas Gerais e Bahia, é de extrema importância geológica e tem sido intensamente estudada desde o século XVIII quando da descoberta dos depósitos de ouro e, posteriormente, diamantes. A seguir uma breve síntese do estado da arte para tal região.

As ideias iniciais de Pflug (1968) e Pflug e Renger (1973), somada à importante contribuição de Schöll e Fogaça (1979), serviram como substrato para produção científica do Espinhaço. O modelo então sugerido reconhece como principais unidades o Supergrupo Pré-Rio das Velhas: terrenos gnáissicos/graníticos de idade arqueana; o Supergrupo Rio das Velhas: sequência vulcanosedimentar de provável idade arqueana; o Supergrupo Espinhaço, de idade Proterozóica, constituído pelas oito formações definidas por Pflug (1968).

Os terrenos granitos/gnáissicos/migmatíticos correspondentes ao Supergrupo Pré-Rio das Velhas de Schöll & Fogaça (1979), foram separadas em dois conjuntos por Hoffmann (1981), sendo um gnáissico/migmatítico (Grupo Congonhas) e outro granítico (Grupo Gouveia). Machado *et al.* (1989) datou rochas do conjunto granítico, obtendo idades de 2.8 Ga. Estas rochas são aflorantes na porção meridional da serra e foram denominadas de Complexo Gouveia por Knauer (1990).

O referido Supergrupo Rio das Velhas por Schöll e Fogaça (1979) e Grupo Costa Sena por Hoffmann (1983), foi redefinido por Fogaça e Schöll (1984) com a designação de Supergrupo Rio Paraúna. A porção basal, com metavulcânicas e metassedimentos químicos, foi denominada de Grupo Pedro Pereira por Carvalho (1982), o posicionamento arqueano com idade de 2,97 Ga foi descrito para as metavulcânicas por Machado *et al.* (1989). A sequência superior, dominante, é representada pelo Grupo Costa Sena (Fogaça; Schöll, 1984) e subdividido nas formações Barão do Guaicuí e Bandeirinha. A Formação Barão do Guaicuí é predominantemente xistosa com metassedimentos químicos e vulcânicas ácidas subordinadas, estas últimas foram datadas em 2,0 Ga (Machado *et al.*, 1989). Alguns autores sugerem que grande parte destas rochas predominantemente xistosas representam milonitos de rochas graníticas/gnaissicas do embasamento (*e.g.* Dossin; Dossin; Chaves, 1990; Almeida-Abreu, 1993; Uhlein, 1991). O posicionamento dos quartzitos e metaconglomerados relativos à

Formação Bandeirinha é atribuído à base do Supergrupo Espinhaço por alguns pesquisadores (e.g. Almeida-Abreu, 1993). Novos trabalhos com foco na análise estrutural de rochas pertencentes à base do Supergrupo Espinhaço e rochas da Formação Bandeirinha sugerem a permanência deste último ao Grupo Costa Sena (Lopes-Silva; Knauer, 2011) em concordância ao proposto por (Knauer, 1990, Fogaça; Schöll, 1984). Silva (1995) favorável ao posicionamento destas rochas na base do Supergrupo Espinhaço, caracterizou três sequências deposicionais no conjunto correspondente à Formação Bandeirinha, designados de Basal, Olaria e Natureza.

O Supergrupo Espinhaço foi previamente dividido em oito formações por Pflug (1968), as quais foram agrupadas nos grupos Diamantina (formações São João da Chapada, Sopa-Brumadinho e Galho do Miguel) e Conselheiro Mata (formações Santa Rita, Córrego dos Borges, Córrego da Bandeira, Córrego Pereira e Rio Pardo Grande), por Dossin, Uhlein e Dossin (1984). Schöll e Fogaça (1979) propõem a subdivisão das duas formações mais basais em seis unidades informais de mapeamento, intituladas de níveis A, B e C relativos à Formação São João da Chapada, e D, E e F relativos à Formação Sopa-Brumadinho. Knauer (1990) propõe uma divisão em três conjuntos: Grupo Guinda (substituindo a nomenclatura Diamantina de Dossin, Uhlein e Dossin, 1984), Formação Galho do Miguel e Grupo Conselheiro Mata. Almeida-Abreu (1993) considera que o Grupo Guinda incluiria além das formações São João da Chapada e Sopa-Brumadinho, as formações Bandeirinha, na base, e Galho do Miguel, no topo. Os níveis D, E, F informais propostos por Schöll e Fogaça (1979) relativos à formação Sopa-Brumadinho foram formalizados, sendo D – membro Datas; E – Membro Caldeirões (Almeida-Abreu, 1993) e F – Membro Campo Sampaio (Fogaça e Almeida-Abreu, 1982). Rochas vulcânicas félsicas ocorrem predominantemente na porção leste da serra do espinhaço, foram datadas em 1,71 Ga por Machado *et al.* (1989). Estudos recentes atribuem estas rochas ao principal evento magmático ocorrido durante o rift Espinhaço, com duração calculada em 40 Ma (Magalhães *et al.*, 2018). Além das rochas metassedimentares e das vulcânicas félsicas, são característicos níveis de filitos hematíticos, interpretados como vulcânicas sinsedimentares, mesmo não tendo sua composição química um equivalente moderno. Com base nisto, Knauer e Schrank (1994) interpretam os filitos hematíticos como produtos de intemperismo subaéreo (lateritização) e subsequente metamorfismo de magmatitos básicos. Estas rochas foram datadas por Dossin *et al.* (1993), fornecendo idade de 1,71 Ga. Abordagens distintas sobre a gênese e evolução das rochas do Supergrupo Espinhaço na porção meridional da Serra homônima são debatidas em Dussin e Dussin (1995), Almeida-Abreu (1995), Knauer (2007) e Chemale Jr. *et al.* (2012).

2.2 Contexto regional

A porção meridional da Serra do Espinhaço (Figura 1), área objeto deste estudo, enquadra-se na Faixa Araçuaí, que margeia a borda leste do Cráton do São Francisco (Almeida, 1977). É edificada, nesta região, por rochas graníticas/gnáissicas do Complexo Gouveia, xistos e formações ferríferas do Grupo Pedro Pereira – ambos do éon Arqueano; rochas metassedimentares pertencentes ao Grupo Costa Sena, rochas metassedimentares relativas ao Supergrupo Espinhaço e rochas metabásicas associadas à Suíte Pedro Lessa – atribuídas ao éon Proterozóico. Para esta síntese do contexto geológico, neste trabalho serão utilizados principalmente as propostas de Pflug (1968); Schöll e Fogaça (1979); Fogaça e Schöll (1984) e Knauer (1990, 2007).

O embasamento é representado por complexos graníticos/gnáissicos/migmatíticos, corpos anfibolíticos restritos e pequenas injeções pegmatíticas, que foram agrupados no designado Complexo de Gouveia (Knauer, 1990), na região central, e pelo denominado Complexo Basal, na borda leste. Afloram em sinclinais com eixos orientados N-S ou em falhamento tipo escama (Fogaça e Schöll, 1984). Trata-se de rochas leucocráticas de composição granítica e granulação grossa, porfiríticas, localmente pegmatóide e equigranilar, mineralogia essencial de quartzo, plagioclásio, muscovita e biotita (Schöll e Fogaça, 1979).

O Grupo Pedro Pereira (Carvalho, 1982) consiste em sericita-quartzo xistos intercalados à cherts ferruginosos e itabirito, metariolito, talco xisto, quartzitos, metabásicas e metaultrabásicas. Fogaça e Schöll (1984) associou estas rochas a um possível *greenstone belt* reliquiar.

O Grupo Costa Sena, subdivide-se nas Formação Barão do Guaicuí e Bandeirinha. A primeira é composta majoritariamente por quartzo-mica-xisto, com intercalações não tão comuns de metavulcânicas básicas e félsicas, quartzo-xistos com níveis lenticulares de quartzo subordinados. Quantidades variáveis de turmalina, cianita e hematita são comuns nas rochas desta formação, que se encontra em contato gradacional, por vezes falhado, com a Formação Bandeirinha (Knauer, 1990). Fogaça e Schöll (1984) cita a ocorrência de metaconglomerados monomíticos até polimíticos, escassos, em forma de lentes métricas, sobretudo nas proximidades dos contatos com a Formação Bandeirinha.

A Formação Bandeirinha é formada predominantemente por rochas quartzíticas e metaconglomerados associados (matriz-suportado com seixos de quartzitos, quartzo leitoso, formação ferrífera, jaspilite, quartzito), em espessos pacotes e encontra-se em discordância angular e erosiva com o Supergrupo Espinhaço, Knauer (2007).

O Supergrupo Espinhaço, composto pelos Grupo Guinda, Formação Galho do Miguel e Grupo Conselheiro Mata, corresponde a uma pilha de metassedimentos, predominantemente siliciclásticos, metamorfisados dentro da fácies xisto-verde. O Grupo Guinda (Knauer, 1990) é composto pelas Formação São João da Chapada e Sopa-Brumadinho (Pflug, 1968), usualmente com contatos gradacionais entre si. Schöll e Fogaça (1979) propuseram uma subdivisão informal da Formação São João da Chapada nos níveis A, B e C. O nível A é descontínuo e possui distribuição geográfica reduzida. Predominam os quartzitos sobre as metabrechas e metaconglomerados. Seu contato superior com o filito hematítico (nível B) é brusco, porém gradacional quando com o nível C. O nível B é mais contínuo que o anterior, possui espessura que localmente ultrapassa os 40–50 m e a maior expressão desta unidade é o filito hematítico. Ocorrem intercalados ao filito hematítico xistos verdes, e, localmente, turmalinitos finos. O nível C é o de maior expressão estratigráfica e em área, unidade na qual predominam quartzitos de granulação média a grossa separada por rochas de granulação mais fina, estas últimas representadas por quartzitos micáceos e por filitos esverdeados a acinzentados (Knauer, 1990).

A Formação Sopa-Brumadinho é dividida por Schöll e Fogaça (1979) em três níveis informais D, E e F, que foram formalizados, respectivamente, como Membro Datas, Membro caldeirão (Almeida-Abreu, 1993) e Membro Campo Sampaio (Fogaça; Almeida-Abreu, 1982). O Membro Datas é caracterizado pelo domínio de filitos, filitos quartzosos e quartzitos micáceos. O Membro Caldeirão é dominado basicamente por quartzitos e metaconglomerados. O Membro Campo Sampaio é composto por metapelitos e quartzitos finos com ocorrência localizada de metabrechas de matriz filítica.

A Formação Galho do Miguel é composta predominantemente por quartzitos finos puros com estruturas sedimentares bem preservadas, tais como estratificações cruzadas acanaladas de grande porte. Secundariamente é composta por quartzitos finos micáceos e finas camadas de metargilito (Schöll; Fogaça, 1979).

O Grupo Conselheiro Mata compreende as formações: Santa Rita, Córrego dos Borges, Córrego da Bandeira, Córrego Pereira e Rio Pardo Grande, da base para o topo, respectivamente (Dossin; Uhlein; Dossin, 1984) não aflorantes na área do projeto.

A maior parte das unidades do Supergrupo Espinhaço são recortadas por intrusões (diques e sills) de rochas metabásica que precederam à deformação dos metassedimentos de idade brasileira do Supergrupo Espinhaço (Abreu, 1991). Machado *et al.* (1989) dataram grãos de badeleíta e zircão de um sill dessa unidade, obtendo a idade de 906 ± 2 Ma. Estas rochas se agrupam na denominada Suíte metaígneia Pedro Lessa. As relações estratigráficas das unidades descritas encontram-se esquematizadas na Figura 2.

Figura 2. Relação estratigráfica para as unidades de interesse do estudo

ESTRATIGRAFIA		
Suíte metaígneia Pedro Lessa		
Supergrupo Espinhaço	Grupo Conselheiro Mata	Fm. Rio Pardo Grande
		Fm. Córrego Pereira
		Fm. Córrego da Bandeira
		Fm. Córrego dos Borges
		Fm. Santa Rita
	Fm. Galho do Miguel	
	Grupo Guinda	Fm. Sopa-Brumadinho
		Fm. São João da Chapada
	Grupo Costa Sena	Fm. Bandeirinha
		Fm. Barão do Guacuí
Grupo Pedro Pereira		
Complexos Granito-Gnáissicos		

Fonte: Elaborada pelo autor.

2.3 Mineralizações auríferas na SdEM

De acordo com Dossin, Chaves e Dossin (1990), os depósitos auríferos mais importantes da Serra do Espinhaço Meridional estão associados às zonas de cisalhamento dúctil e estão relacionados aos veios de quartzo que cortam xistos miloníticos e do Grupo Costa Sena, onde os principais fatores condicionantes da mineralização foram os aspectos físicos das rochas encaixantes que regem a circulação dos fluídos hidrotermais mineralizantes, portanto o controle dos depósitos é ordem litológica/estrutural e não estratigráfico. Para alguns autores (*e.g.* Abreu, 1991), de maneira menos expressiva, algumas mineralizações auríferas estão associadas aos níveis de metassedimentos pelíticos, bem como podem estar presentes nos filitos hematíticos, ambos do Supergrupo Espinhaço.

Em relação a sua gênese, existem hipóteses de que ouro poderia provir da erosão de níveis auríferos do embasamento ou das sequências supracrustais, possibilidade na qual ele poderia ser da natureza detrítica ou vulcânica (Dossin; Chaves; Dossin, 1990). Chaves e Uhlein (1985) propõem que a fonte do metal está relacionada à lixiviação de níveis auríferos do embasamento. Acredita-se que o ouro se apresenta disseminado sub-economicamente na sequência pelítica e que durante os processos de deformação e metamorfismo ele foi

remobilizado conjuntamente à segregação dos veios de quartzo, formando assim depósitos restritos com altos teores.

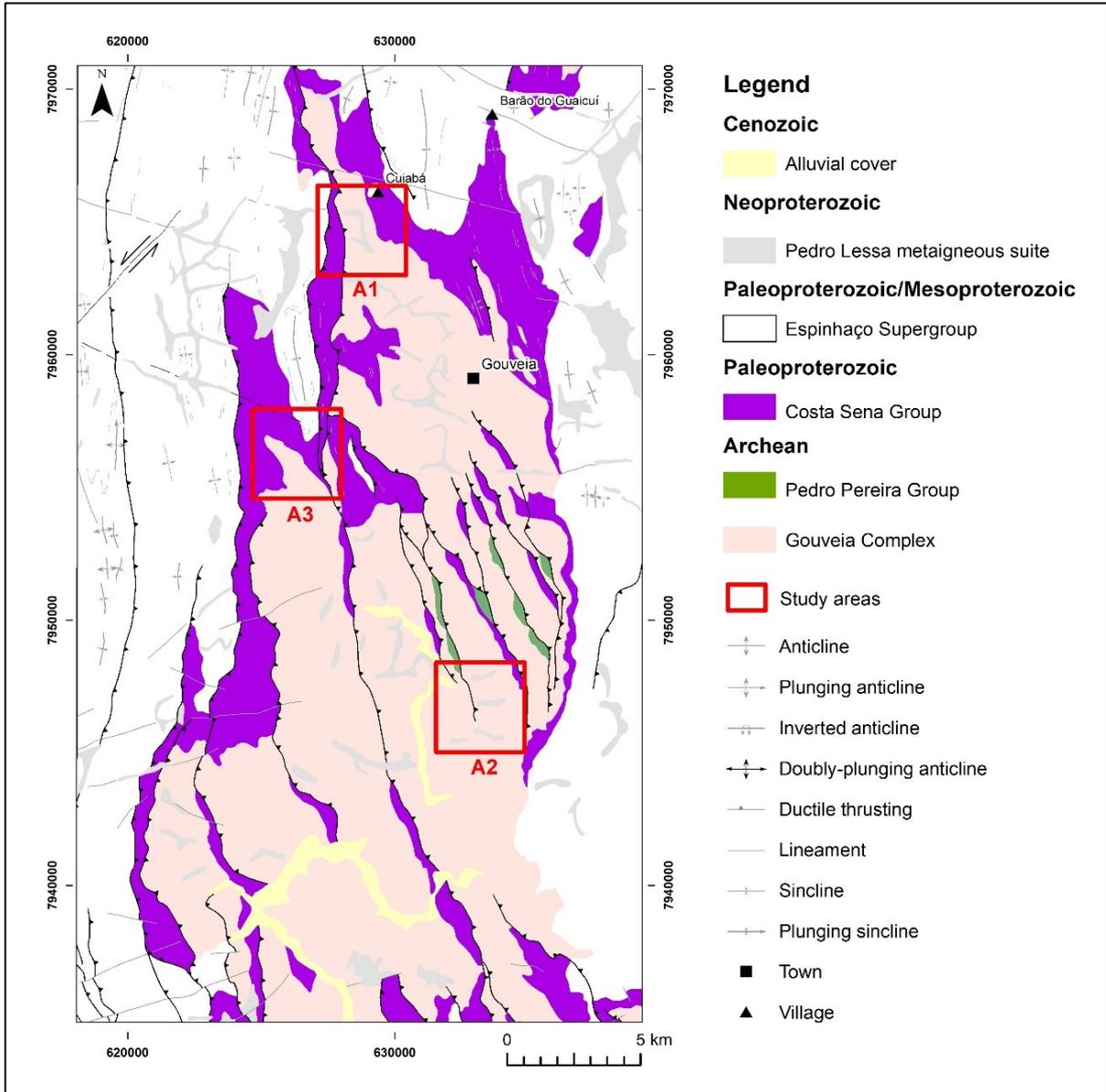
O estudo de inclusões fluidas nos veios de quartzo associados às mineralizações auríferas, nesta região, realizado por Ronchi *et al.* (1992), sugere que a precipitação aurífera se deu a partir de uma mistura de fluidos de composições diferentes (carbônicos e aquosos) onde a fugacidade de oxigênio do fluido mineralizante é próxima das condições do tampão Hematita-Magnetita. Além disso, propõem que o agente complexante do metal seria AuCl_2 e sua desestabilização se daria como resultado do processo de diluição progressiva dos fluidos. Em convergência, estudos em inclusões fluidas realizados por Freitas (2019) em veios de quartzos na Serra do Pasmarr (20 km a sudoeste de Diamantina, Figura 1), sugerem condições oxidantes no campo da estabilidade da hematita, além do transporte na forma de complexos clorados, corroborados pela baixa salinidade dos fluidos.

Com base na datação direta do ouro por Hélio radiogênico (^4He) pelo método U/Th – ^4He , Cabral *et al.* (2013) obtiveram uma idade de 515 ± 55 Ma, amarrando a mineralização aurífera da região de Diamantina ao evento orogênico Brasileiro no contexto de amalgamação do Gondwana. Ademais, para estes autores, a mineralização de ouro pode ser entendida como uma variante oxidada dentro da série de depósitos de ouro orogênico.

2.4 Contexto geológico local

Do ponto de vista local foram mapeadas e prospectadas três áreas com ocorrências de mineralizações auríferas, aqui denominadas de A1, A2 e A3, sendo A1 localizada a sudeste do vilarejo de Cuiabá, A2 a sul da sede de Gouveia e A3 a oeste-sudoeste da sede de Gouveia (Figura 3).

Figura 3. Mapa geológico esquemático da Serra Meridional do Espinhaço e regiões adjacentes, detalhe para as áreas do estudo localizadas no município de Gouveia, Minas Gerais



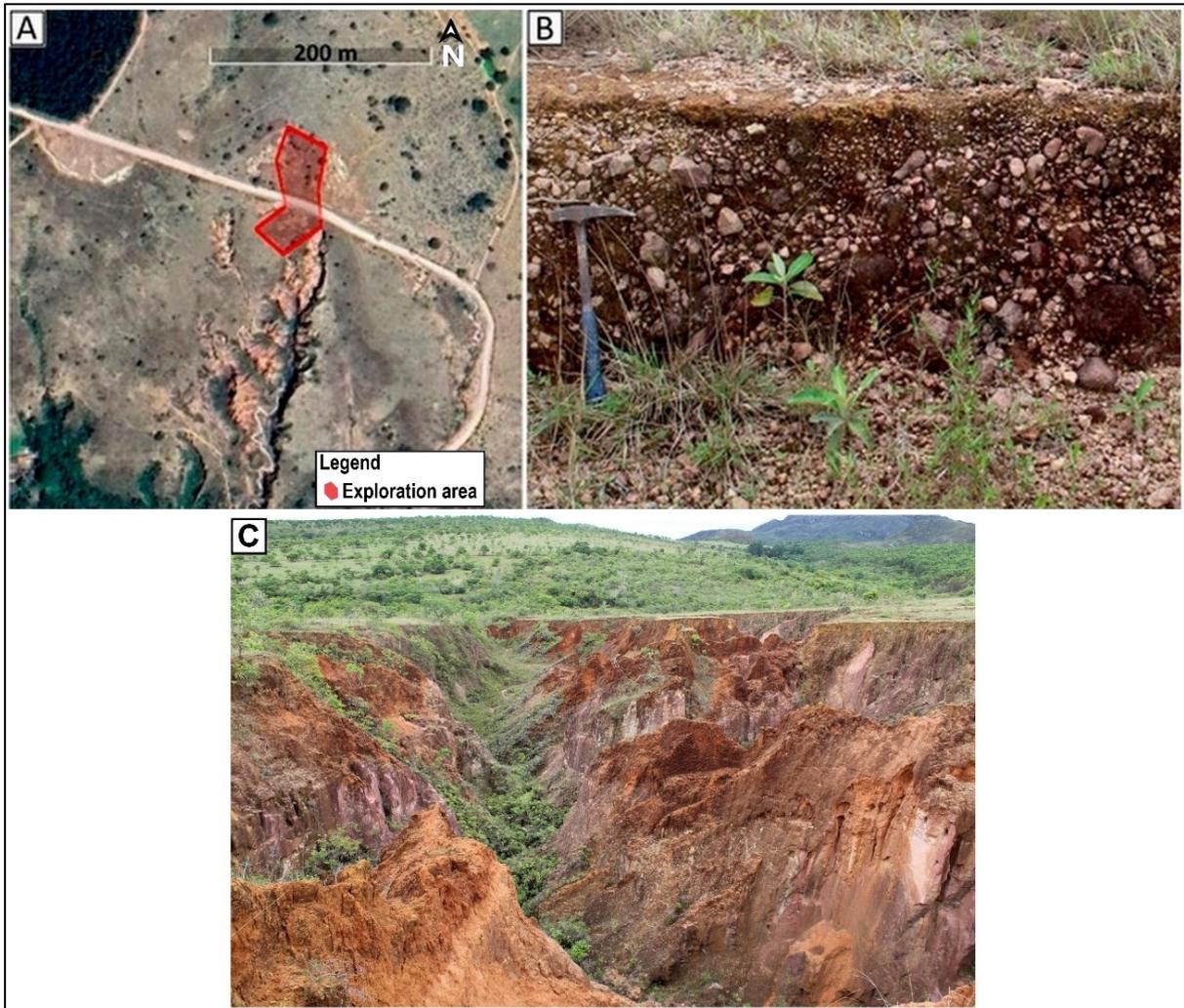
Fonte: Modificado de Freimann (2022, p. 62).

A Área A1, aproximadamente 6 km a noroeste da cidade de Gouveia foi definida como área-chave do estudo, tendo em vista o seu histórico prospectivo. Esta área se caracteriza por um relevo suave em meias laranjas, onde afloram rochas graníticas do Complexo Gouveia, compostas por quartzo, feldspato potássico, plagioclásio, moscovita e biotita, com regiões milonitizadas e homogeneamente intemperizadas. O alvo da prospecção é o topo geomorfológico de uma das meias laranjas e possui área total de 0,38 ha (Figura 4A).

A região é coberta por até 3 metros de sedimentos eluvionares, conglomeráticos, com clastos subangulosos a angulosos, imaturos texturalmente, maduros mineralogicamente e predominantemente compostos por quartzo (Figura 4B). Imediatamente a sul da área

prospectada existe uma grande voçoroca (Figura 4C) na qual observa-se a coloração esbranquiçada típica do caulim, resultante do intemperismo destas rochas graníticas. Entre os clastos predominam a fração seixo, sendo raramente observadas maiores granulometrias. Em relação a matriz, observa-se predominantemente uma matriz fina, silto-argilosa, de coloração ocre-alaranjada.

Figura 4. Área de estudo A1 localizada no município de Gouveia, Minas Gerais



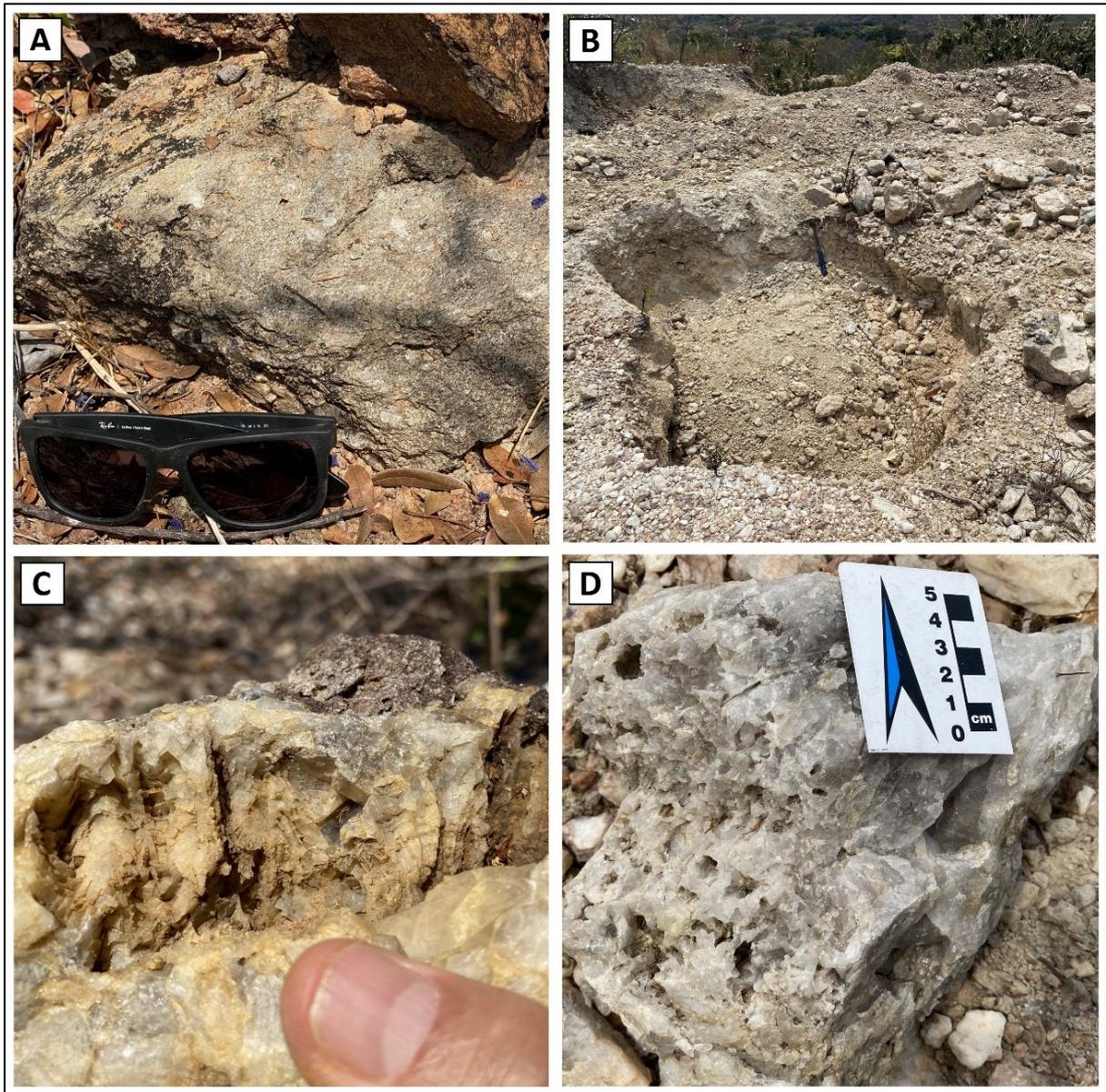
Nota: A) Imagem de satélite da área de prospecção; B) Nível eluvionar de cascalhos angulosos de quartzo; C) Visão panorâmica da voçoroca adjacente (visada para sul).

Fonte: A) (Google Earth PRO 7.3, 2022); B) e C) (Arquivo do autor).

A Área 2 localiza-se a aproximadamente 10 km ao sul da cidade de Gouveia. Esta área se caracteriza por relevo suave em meias laranjas típico do embasamento granítico do Complexo Gouveia, porém com picos levemente mais elevados e escarpados nos quais afloram formações ferríferas bandadas e xistos máficos (Figura 5A), característicos do Grupo Pedro Pereira. Esta área encontra-se em uma zona de cisalhamento na qual lascas tectônicas do Grupo

Pedro Pereira cavalgam rochas do embasamento. Esta zona de cisalhamento é marcada pela formação de mega-veios de quartzo (Figura 5B), que por sua vez apresentam mineralização aurífera. Os blocos de quartzo apresentam estruturas como *vugs* e crescimento zonal, características de formação em baixas temperaturas e pressão moderada (Figura 5C e Figura 5D).

Figura 5. Área de estudo A2 localizada no município de Gouveia, Minas Gerais



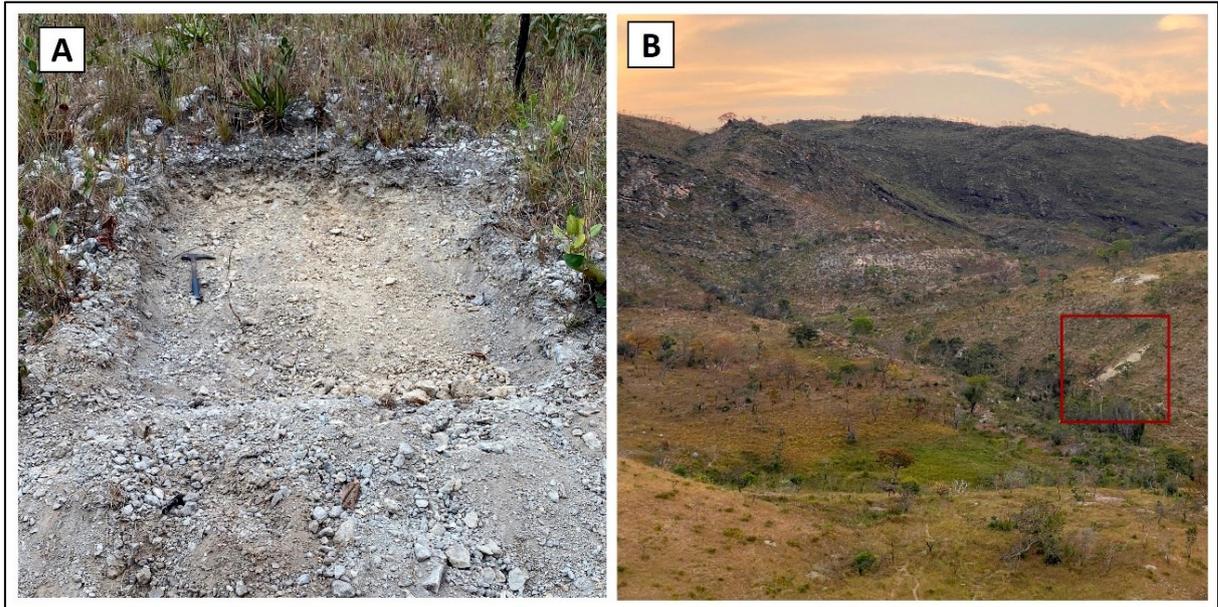
Nota: A) Clorita xisto cisalhado; B) Mega veios de quartzo de onde foram prospectadas diversas amostras de ouro nativo; C) Blocos de quartzo com estruturas de crescimento zonal; D) Blocos de quartzos com diversas estruturas de *vugs*, cavidades e drusas.

Fonte: Arquivo do autor.

A Área 3 localiza-se a oeste-sudoeste da cidade de Gouveia em uma distância aproximada de 6 km. Esta área se caracteriza por um relevo íngreme e escarpado que configura

uma serra de orientação preferencial N-S. Os alvos prospectivos ocorrem em veios de quartzo presentes em sericita-cianita-quartzo xistos característicos do Grupo Costa Sena que, por sua vez, encontram-se em discordância angular, sotopostos por rochas quartzíticas do Supergrupo Espinhaço. Além concentrações auríferas nos veios de quartzo, também foram encontradas amostras de ouro nativo no tálus coluvionar desta encosta (Figura 6A e Figura 6B)

Figura 6. Área de estudo A3 localizada no município de Gouveia, Minas Gerais



Nota: A) Cascalheira de quartzos de veio encaixado nas rochas do Grupo Costa Sena, local de onde foram prospectadas pepitas de ouro; B) Mesmo local à distância. Visada para Oeste-Noroeste.

Fonte: Arquivo do autor.

3 METODOLOGIA

3.1 Campanhas de campo

Para elaboração deste trabalho foram realizadas quatro campanhas, totalizando 18 dias em pesquisa de campo.

- i. A primeira campanha limitou-se ao reconhecimento geral da área de estudo;
- ii. A segunda campanha abarcou a prospecção geofísica aurífera em área-chave, aquisição de dados e coleta de amostras;
- iii. A terceira e a quarta campanhas consistiram em mapeamento, prospecção geofísica e coleta de amostras de outras ocorrências auríferas no município em questão.

Tabela 1. Datas das campanhas de campo

Campanhas	Total de dias	Datas
1º	3	15/02/2020 – 17/02/2020
2º	7	30/10/2020 – 05/11/2020
3º	4	10/09/2021 – 13/09/2021
4º	4	15/10/2021 – 18/10/2021

Fonte: Elaborada pelo autor.

A prospecção geofísica realizada na área-chave (A1) teve (Figura 4A) duração de sete dias, nos quais foram divididos em reconhecimento e preparação do terreno (2 dias); prospecção (3 dias); fechamento das fileiras e compactação do solo (2 dias). As etapas de prospecção foram divididas em 1, 2, 3, referentes respectivamente aos dias de prospecção.

A preparação do terreno consistiu em primeiro momento na definição e localização das fileiras (comprimento, largura e profundidade) em seguida, foram abertas 12 fileiras sistematicamente com 2 metros de largura, 50 cm de profundidade e 20 a 30 metros de comprimento, para tal foi utilizada uma retroescavadeira modelo 580M e marca Case.

Nos três dias seguidos de prospecção, as fileiras recém-abertas foram percorridas por dois detectores de metais de alta resolução modelo GPZ 7000 da marca Minelab. Este tipo de detector é o mais utilizado entre os prospectores individuais profissionais, tendo em vista a profundidade de detecção (até 2 metros) e a acurácia de alvos metálicos pequenos (a partir de 2 mm). Os alvos metálicos foram retirados manualmente com auxílio de uma picareta. A etapa

final consistiu no fechamento das fileiras abertas e compactação do material eluvionar para minimização dos impactos ambientais associados.

3.2 Tratamento de dados

Após a etapa de campo, os dados obtidos foram transcritos e tabelados. Para seu tratamento foi utilizada estatística descritiva, coeficiente de correlação amostral de Pearson e teste de hipóteses para avaliar a sua significância. O coeficiente de correlação de Pearson r , valor adimensional, compreendido numericamente entre -1 e 1, indica como duas variáveis se modificam conjuntamente, além de sua intensidade e a direção linear. Os valores extremos (-1 e 1) indicam maior força de associação e o sinal representa a direção de variação.

Uma correlação amostral não significa necessariamente uma correlação populacional. Nesse sentido, é necessário testar o coeficiente de correlação de Pears \textcircled{r} para verificar sua correlação populacional. A hipótese da existência de uma relação entre duas variáveis se dá pela relação $\rho = 0$ (não existe correlação) ou $\rho \neq 0$ (existe correlação), onde ρ representa o valor populacional do coeficiente de correlação de Pe \textcircled{on} (r). De acordo com a teoria dos testes de hipótese, os coeficientes de correlação populacional (ρ) serão estatisticamente diferentes de zero se este ρ -valor obtido nos testes for inferior a um nível de significância (probabilidade de erro) pré-determinado (Morettin; Bussab, 2017).

Neste estudo, optou-se por utilizar um nível de significância de 10%, ou seja, $\alpha = 0.10$. Esse nível foi adotado com base na relação existente entre os erros do tipo I (α), erro do tipo II (β) e tamanho das amostras. Sabe-se que um tamanho amostral grande pode gerar conclusões errôneas quando um grande valor de α é adotado (comumente 0.05), sendo necessário ajustá-lo de forma a não comprometer o poder do teste estatístico ($1-\beta$). Esse poder é o que determina a capacidade do teste estatístico em detectar quando a hipótese nula é realmente falsa. Como neste estudo tem-se uma amostra relativamente pequena, faz-se necessário equilibrar as probabilidades de erro do teste (tipo I e tipo II) ajustando um dos parâmetros (neste caso, α). Logo, todos os testes, por coerência com o tamanho amostral, serão conduzidos a 10% de significância, ou seja, todos os ρ -valores inferiores a 0,10 levarão à conclusão de significância do coeficiente de correlação. Uma explicação mais detalhada acerca da relação entre os parâmetros α , β , poder e tamanho amostral é detalhada em (Kim, 2015).

Para realização destas análises foi utilizado o software R versão 4.0.3 (R Core Team, 2021). As amostras de ouro nativo encontradas nas etapas de prospecção foram detalhadamente descritas e fotografadas. Parte destas foram adquiridas pelo discente e se encontram em seu

acervo pessoal e outras são parte do acervo dos prospectores e foram cedidas temporariamente ao projeto.

3.3 Princípio de funcionamento – Sensores de indução eletromagnética

A terminologia “detector de metais” é comumente utilizada para se referir de equipamentos de indução eletromagnética que, por sua vez, são sistemas indutivos de baixa frequência, compostos por uma cabeça de busca e contendo uma ou mais bobinas que portam uma corrente elétrica variante no tempo. Esses sistemas podem ser divididos no domínio da frequência e no domínio do tempo (Bruschini, 2002). Para o propósito deste trabalho será discutido apenas o sistema do domínio do tempo.

Indução eletromagnética no domínio do tempo consiste basicamente em uma bobina transmissora que gera um campo magnético primário pulsante que, por sua vez, induz correntes parasíticas no qualquer objeto metálico adjacente. O decaimento destas correntes parasíticas no tempo gera um campo magnético secundário com uma taxa de decaimento específica que é determinada pelas características do objeto (tamanho, formato e composição). A mensuração do decaimento do campo secundário (resposta transiente), portanto, proverá a localização do alvo quando lida pela bobina receptora.

Detectores metálicos são comumente energeticamente ineficientes. Por essa razão, neste trabalho optou-se por utilizar o equipamento de detecção metálica GPZ 7000, marca Minelab, que se trate de detector de metais no domínio do tempo de alta sensibilidade, alta resolução e corrente constante. Este equipamento incorpora a tecnologias ZVT (do inglês “Zero Voltage Transmission”) e “Super-D”, além de trabalhar em uma frequência padrão de 3,675 KHz e profundidade máxima de detecção de 2 metros (Minelab, 2022).

O equipamento repete o ciclo do sinal que é composto por pelo menos um período receptor e pelo menos um período transmissor diferente de zero mantendo a corrente substancialmente constante de ciclo a ciclo independente da indutância da bobina de transmissão, denominada tecnologia ZVT (Candy, 2014). A bobina “Super-D” consiste em um enrolamento de transmissão central e dois enrolamentos de recepção externos que formam essencialmente a geometria “Double-D” simétricas. Essa configuração geométrica do enrolamento das bobinas resulta em uma resposta dupla para alvos próximos à superfície e se comporta como uma bobina tradicional para alvos mais profundos, que na região central terá um sinal mais forte. (Minelab, 2022).

ARTICLE

<https://doi.org/10.1590/2317-488920232022090>

BJGEO
Brazilian Journal of Geology



Artisanal and small-scale gold mining in the Southern Espinhaço Range, Brazil, using time-domain electromagnetic induction: prospecting, efficiency, and environmental aspects

Henrique Borgatti^{1*} , Aline Tavares Melo^{1,2} , Luiz Guilherme Knauer^{1,3} 

Abstract

Gold mining has profound ties to the history of Brazilian colonization and still takes place with many communities involved in artisanal and small-scale gold mining. The most relevant gold deposits in the Southern Espinhaço Range are related to the occurrence of shear zones in the region between the cities of Diamantina and Gouveia, Minas Gerais, Brazil. Former colonial-dated gold mines were depleted; however, the use of newer prospecting practices has brought new interest in these areas. In this context, this study assesses the efficiency, environmental impacts, and economic viability of time-domain electromagnetic induction as a gold exploration method for small-scale prospecting in Gouveia county. Additionally, this study provides a characterization of the local gold mineralization and brings awareness to the prospecting community regarding environmental and legal aspects of gold mining. This article presents the results of a field campaign of prospecting efforts in which 114 metallic targets were located, 35 of which were identified as native gold. The gold samples have specific morphology, depth, and weight that suggest a hypogenic origin with a low degree of transport at eluvial levels. From an environmental perspective, the time-domain electromagnetic induction method has presented fewer impacts, related mostly to site-specific remobilization of the soil.

KEYWORDS: artisanal and small-scale gold mining; geophysical prospecting, metal detecting; gold; Southern Espinhaço Range.

INTRODUCTION

Artisanal and small-scale gold mining is ongoing around the world, particularly in developing countries. These activities are mostly informal and, at times, illegal, performed under poor working conditions that often-times result in significant environmental impacts. On the other hand, gold mining presents an undeniable role in poverty reduction at a local level, representing a promising economic activity and often the single viable economic possibility for many poverty-stricken communities. The International Institute for Environment and Development estimates that at least 13 million people work directly in artisanal and small-scale gold mining around the world (Hentschel *et al.* 2002). In Brazil, the number of people working directly on small-scale gold mining is around 250,000; however, close to 1.5 million people are dependent on such activities (Hilson and Maconachie 2017). Brazil also takes the lead with the largest small-scale gold mining district,

located in the Tapajós River watershed (Lobo *et al.* 2016). Historically, such gold mining practices were significant for the discovery of many deposits around Brazil during colonial times; in contrast, nowadays they have great social and environmental impacts. Hence, there is an ever-growing need for research on such a controversial subject in both academic and governmental spheres regarding prospecting guidelines, new technology, and the regularization of this practice.

With the advent of new technology, very promising tools for artisanal mining are now metal detectors. Such equipment was developed alongside radiotelephony in the late 19th century and was quickly adapted for many diverse applications, such as war engineering, archeology, and mineral prospecting (Connor and Scott 1998). Initially used for amateur gold prospecting, metal detectors developed from 2000 to 2020 have evolved into robust equipment that is easily used with a relatively low cost and high efficiency, which generated major changes in subsurface gold prospecting (Dessertine 2016).

Metal detectors in Brazil have become increasingly popular in the past decades in gold prospecting regions. Many areas considered to be depleted, colonial-time mines, and even brand-new gold occurrences are now being targeted for exploration using this technology. One of these regions is located in the Southern Espinhaço Range (Fig. 1), in Gouveia county, Minas Gerais. This area, despite not presently having large gold mining enterprises, is exploited by small-scale individual prospectors that extract shallow subsurface-level gold utilizing

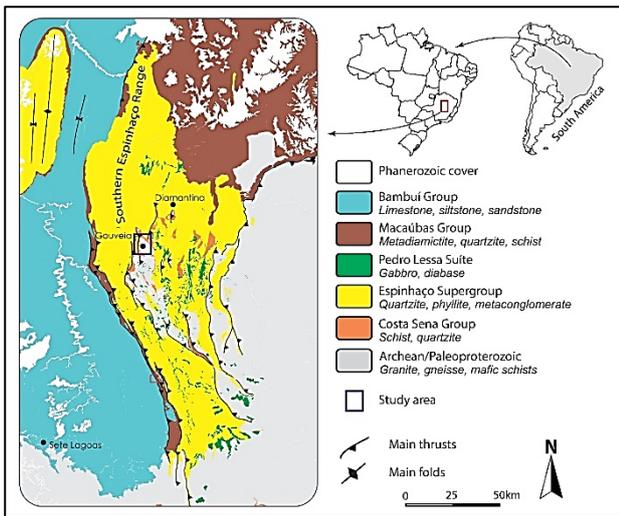
¹Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte (MG), Brazil. E-mails: hborgatti@gmail.com, geo.aline@gmail.com, gknauer@gmail.com

²School of Earth Sciences, University College Dublin – Dublin, Ireland.

³Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte (MG), Brazil.

*Corresponding author.





Source: modified from Kuchenbecker (2019).

Figure 1. Schematic geological map of the Southern Espinhaço Range and adjacent regions showing the study area in Gouveia county, Minas Gerais.

metal detecting equipment. Therefore, this study aimed to study gold prospecting campaigns that employ time-domain electromagnetic induction (EMI) in Gouveia/MG to assess their efficiency, environmental impacts, and economic viability; provide a characterization of the local gold mineralization; and finally bring awareness to the prospecting community regarding environmental and legal aspects of this small-scale gold mining.

GEOLOGICAL SETTING

Regional geology context

The study area is located in the Southern Espinhaço Range in the Araçuaí Belt. The Southern Espinhaço Range extends along the southeastern margin of the São Francisco Craton (Almeida 1977) and hosts the Gouveia granite-gneiss complex and the Pedro Pereira Group, composed of mafic schist and banded iron formations (BIFs), with both geological units dating to the Archean eon. There are also outcrops of metasedimentary rocks from the Costa Sena Group and Espinhaço Supergroup dating to the Proterozoic eon. Subordinately, metabasic rocks occur in association with the Pedro Lessa suite (Knauer 2007).

According to Dossin *et al.* (1990), the most significant gold deposits in the Southern Espinhaço Range coincide with the occurrence of ductile shear zones in association with quartz veins that predominantly occur in mylonitic schists, in which the main conditioning factors of mineralization are physical aspects of the host rock that control the flow of hydrothermal fluids. According to other authors (Abreu 1991), it is less common to find gold mineralizations in association with pelitic metasediment levels, with possible occurrences in hematitic phyllites related to the Espinhaço Supergroup.

Research on fluid inclusions in quartz veins associated with gold mineralizations in this region, conducted by Ronchi *et al.* (1992), suggested that gold precipitation took place due to the mixing of fluids of different compositions (carbonic

and aqueous), in which the oxygen fugacity of the mineralizing fluid is close to the conditions of the hematite-magnetite buffer solution. Furthermore, their research suggests that the metal complexing agent would be AuCl_2 and that destabilization would occur as a result of the process of progressive fluid dilution. In convergence, studies on fluid inclusions carried out by Freitas (2020) in quartz veins in Serra do Pasmar (20 km southwest of Diamantina, Fig. 1) suggested oxidizing conditions in the field of hematite stability, in addition to transport in the form of chloride complexes, supported by the low salinity of the fluids.

From a geotectonic perspective, the Brasiliano event (490–630 Mya) originated large folds and extensive and numerous ductile shear zones of preferential north-south direction and transported them to the west in the Espinhaço Range (Knauer 2007). The large amount of hydrothermal quartz veins, concordant or discordant with the foliation, developed during this event is associated with, besides gold, hematite, magnetite, rutile, anatase, brookite, and, more rarely, minerals from the groups of crichtonite, euclase, and monazite (Chaves *et al.* 2010).

Based on direct gold dating with radiogenic Helium (^4He) by the U/Th $-\text{}^4\text{He}$ method, Cabral *et al.* (2013) suggested an age of 515 ± 55 Mya, relating the gold mineralization of the Diamantina region to the Brasiliano orogenic event during the Gondwana amalgamation. Furthermore, according to these authors, gold mineralization can be understood as an oxidized variant within the series of orogenic gold deposits.

Local geology context

The exploration study area is located south of Cuiabá village, approximately 6 km northwest of the Gouveia urban area (Fig. 2A). The area is characterized by gentle-slope landscapes on “half dome-like” hillslopes in which rocks of the Gouveia granite complex outcrop. The rocks are composed of quartz, potassium feldspar, plagioclase, muscovite, and biotite; they are mylonitized and homogeneously weathered. The target area of this study is the top portion of a half-dome hillslope with a total area of 0.38 ha.

The region is covered by approximately 3.0 m of eluvial conglomeratic sediments with subangular to angular clasts that are texturally immature, mineralogically mature, and predominantly composed of quartz. Among the clasts, the pebble fraction is predominant, with rare occurrence of larger grain fractions (Fig. 2B). Regarding the matrix, there is a predominantly fine, silty-clay matrix with an orange-ocher color. In the south region of the area, there is a large gully (Fig. 3C) in which the white hue of kaolin can be seen, the result of the weathering of granite rocks. Such geological conditions are favorable for the exploration of native gold with metal detectors, considering the relatively shallow eluvial layer (up to 3 m).

METHODOLOGY

Exploration and data processing

The gold exploration campaign discussed here had a total duration of 7 days and encompassed a preliminary

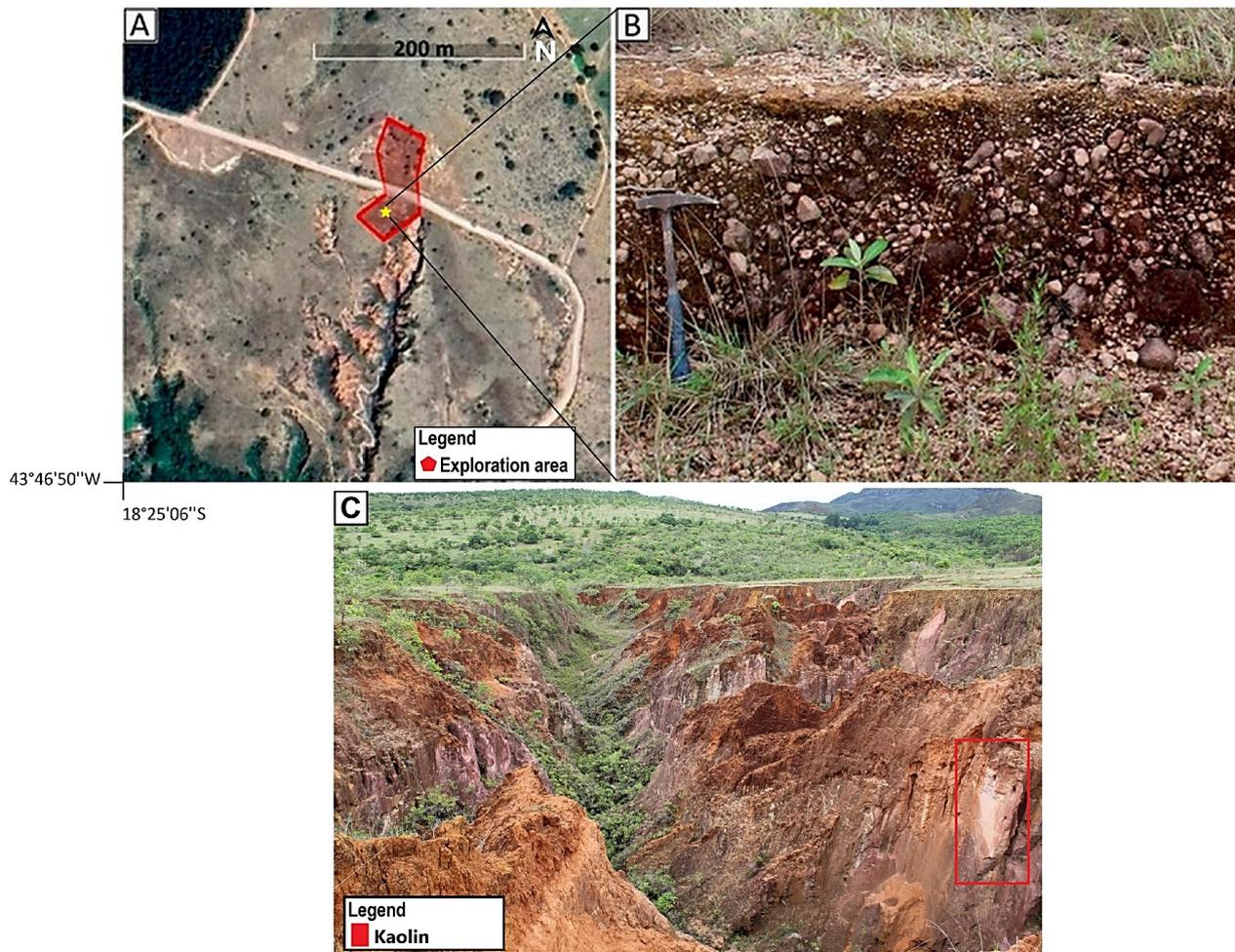


Figure 2. (A) Satellite image of the study area – Google Earth Pro 7.3 (2022). (B) Eluvial level of quartz angular gravels/pebbles. (C) Panoramic view of the adjacent gully (south sight).

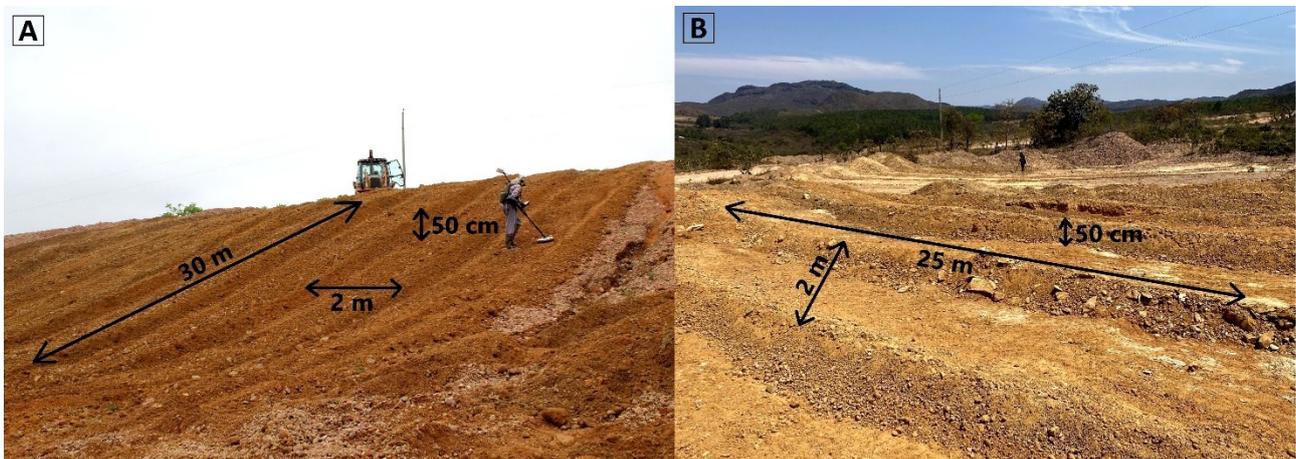


Figure 3. (A) and (B) Open rows excavated with the aid of mechanical scarification for metal prospecting at the eluvial gravel level, row dimensions 2 m × 0.5 m × 25–30 m.

reconnaissance of the area, terrain preparation (2 days), exploration (3 days), and finally row closure and soil compaction (2 days). The exploration stage was further subdivided into three parts, corresponding to each prospecting day. There was no difference in any variable on each prospecting day: same duration, area, and depth. This subdivision of the prospecting stage was carried out to emphasize the decrease in metallic targets found as a function of prospecting days. The terrain preparation comprised selection of row placement (length, width, and depth) followed by systematic excavation of 12 rows that were 2.0 m wide, 0.50 m deep, and 20–30 m long (Figs. 3A and 3B). It is noteworthy to emphasize that

the device depth investigation increases with the volume of the metal target until its maximum reach. Therefore, smaller metal targets are only found at shallow depths (less than 1 m), making the stage of terrain preparation fundamental to improve accuracy of the gold finds.

For such excavation, a Case backhoe model 580M was used. In the subsequent exploration days, the freshly excavated rows were randomly surveyed by two high-resolution Minelab metal detectors, model GPZ 7000. This type of metal detector is widely used among individual professional gold prospectors, considering its investigation depth (up to two meters), accuracy regarding small metallic targets (from

2 mm), and relatively affordable price (same price as a standard car). We only found gold targets in the rows given that the shallow eluvium blanket was already intensely surveyed. The metallic targets were manually extracted using a pickaxe. The final stage consisted of the closure of the excavated rows and the compaction of the eluvial materials to minimize related environmental impacts. Following the field campaign stage, the gathered data were logged into spreadsheets. The processing of the data used descriptive statistics, a sample Pearson correlation coefficient (r), and a hypothesis test to assess its significance.

In this study, a 10% significance level was adopted, that is, $\alpha = 0.10$. This level was selected based on the existing relationship between type I (α) and type II (β) and for consistency with the sample size (Kim 2015). Therefore, all p -values lower than 0.10 will lead to the conclusion of the significance of the correlation coefficient. The R software™ version 4.0.3 was used to perform the analyses.

Operation principles: EMI devices

EMI sensors have been used for the detection of metallic objects since the 19th century and are currently considered a mature technology (Mlambo et al. 2018). The term “metal detectors” is commonly used to refer to EMI devices that are low-frequency inductive systems composed of a search head containing one or more coils carrying a time-varying electric current. These can be subdivided into frequency- domain and

time-domain systems (Bruschini 2002). This study will focus on the time-domain systems.

Field research using time-domain electromagnetic detection consists of a transmitter coil that generates a pulsating primary magnetic field that induces eddy currents in any nearby metallic objects. The decay of these currents with time generates a secondary magnetic field with a specific rate of decay that is determined by the object's characteristics (size, shape, and composition) (Telford *et al.* 1990). Measurement of the decay of this secondary field (the transient response) therefore provides the metallic location of the target once read through the receiving coil (Fig. 4A) (Bruschini 2002).

Traditional metal detectors are not commonly power-efficient. For this reason, in this study we opted to use the GPZ 7000 gold detector (Fig. 4B), which is a high-sensitivity, high-resolution, constant-current time-domain metal detector suitable for gold detection. This device emits a sonorous alert when it detects any metallic object in the subsurface. Expert metal prospectors can differentiate metals based on their sound characteristics; basically, two sound categories are informally classified: one, the target should be gold, silver, aluminum, or copper; the other, the target should be iron or steel alloys. This is expected due to the values of their electrical conductivities. Besides, this metal detector can also map their finds with a GPS and a PC mapper; however, this study did not map their finds given that this kind of prospection is not formally legalized with the regulatory agency and is not the purpose to harm local miners.

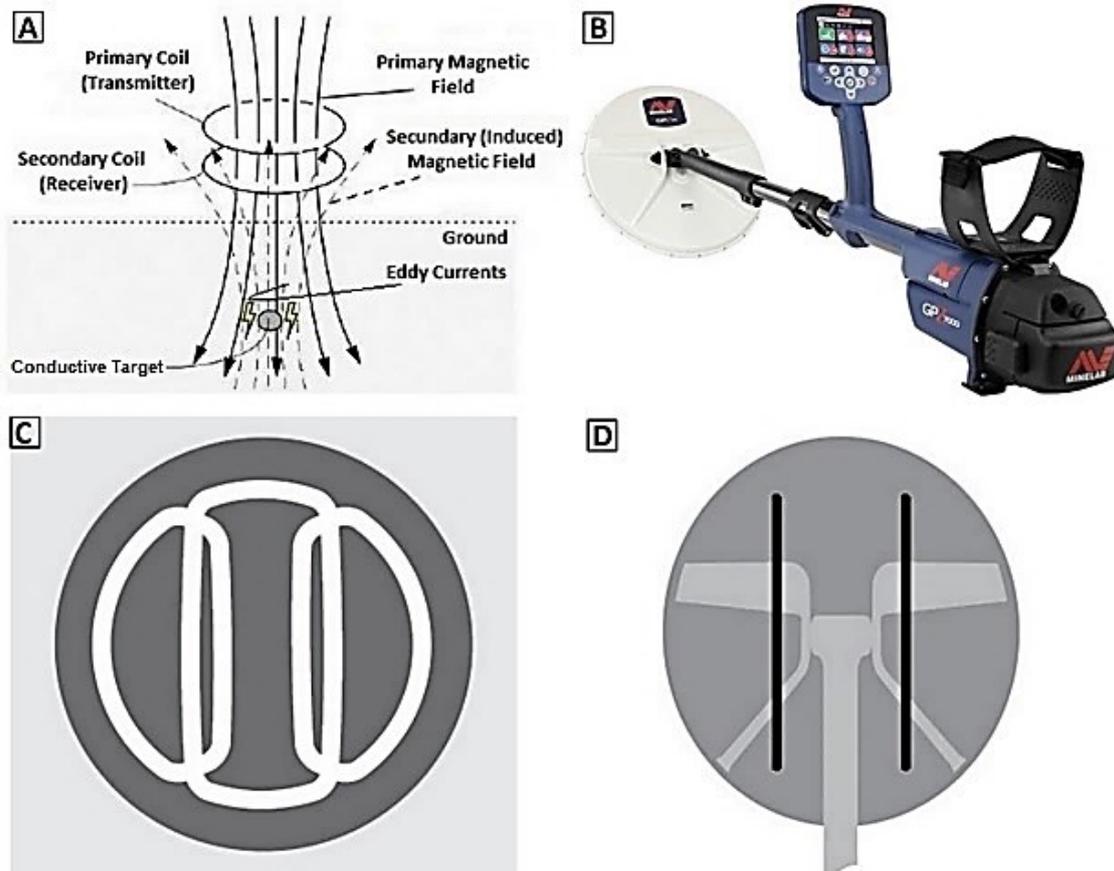


Figure 4. (A) Schematic illustration of the time domain electromagnetic detection principle showing the primary and secondary fields (modified from Bruschni 2002). (B) Geophysical equipment for detection of metallic materials – Minelab Model GPZ 7000 based on time-domain electromagnetics. Source: Minelab (2022). (C) The schematic Super-D technology model for positioning the coils; (D) the parallel lines represent the intersection area between coils, where the signal is strongest (modified from Minelab 2022).

The equipment incorporates the Zero Voltage Transmission (ZVT) and Super-D technologies and works at a standard frequency of 3675 kHz with a maximum investigation depth of 2 m (Minelab 2022). It repeats the signal cycle composed of at least one receiver period and one non-zero transmitter period, keeping the current substantially constant from cycle to cycle regardless of the inductance of the transmission coil due to the ZVT technology (Candy 2014). The Super-D coil (Fig. 4C) consists of one middle transmission winding and two outer receiving windings, which essentially form the equivalent of two symmetric Double-D coils, one on the left and one on the right. This winding interception setting results in a double response for targets close to the surface of the coil, whereas for deep targets it behaves like a traditional coil, which will show a stronger signal in the central parallel lines (Fig. 4D) (Minelab 2022).

RESULTS

The metallic targets were quantified for both gold and other metallic targets (any conductive metals), and the proportion between the two was calculated, as shown in Table 1.

A total of 114 targets were identified during the 3 days of exploration, of which 35 were samples of native gold and 79 were samples of other conductive metals. Individually, exploration days 1, 2, and 3 obtained 19, 11, and 5 gold targets, respectively. As mentioned in Table 1, the targets found for other metals were substantial, such as cans, nails, horseshoes, coins, and other discarded objects. The large number of discarded objects is probably due to the proximity to the road (Fig. 2A).

Figure 5 shows the variation in weight per sample of native gold between 0.05 and 1.50 g, with 75% of the samples found having masses up to 0.5 g. The depth at which the gold samples were found was also determined to range from surface level (0

cm) to 35 cm. Around 75% of the total samples were found in depths up to 19 cm (originally 79 cm).

The relationship between depth and weight for the gold targets was analyzed through the sample Pearson correlation coefficient (r) along with its population significance (Fig. 6). A crescent-linear correlation was found to exist between the variables weight (g) and depth (cm). For the gold targets, as the depth increases, the weight (g) also increases. Pearson's correlation coefficient (r) between the variables depth and weight, calculated for this scenario, is 0.35. Using a hypothesis test at the 10% level, a p-value of 0.03 (3%) was found.

Figures 7A, 7B, and 7C show the total number of gold samples found at exploration days 1, 2, and 3, respectively. In terms of mineralogy, the samples were mostly xenomorphic, spherical, angular, and intensely pitted, with the presence of cavities and voids. Rarely, in just one sample, multiple crystals with an arborescent habit were observed (Fig. 7D). Few samples were also xenomorphic with low sphericity, elliptical geometries, angular, intensely pitted, and numerous cavities and voids (Figs. 7E and 7F). Despite the results of this prospecting campaign for gold resulted in only grains and small gold nuggets, local gold prospectors report having found larger gold nuggets using the same geophysical device previously in the same region. Two of such samples (Figs. 8A and 8B) weighing 15.06 and 26.30 g, respectively, were temporarily provided to this study to be further described and characterized.

DISCUSSIONS

Prospecting and efficiency

Gold nuggets and grains are symbolic objects of mineral wealth, highly sought after by individual prospectors and, often, neglected by the mineral industry and academic world.

Table 1. Total targets and proportion of gold and other metals found through prospecting.

Exploration (day)	Total targets	Gold		Other metals	
		Absolute number	Proportion (%)	Absolute number	Proportion (%)
1	60	19	31.7	41	68.3
2	33	11	33.4	22	66.6
3	21	5	23.8	16	76.2
Total	114	35	30.7	79	69.3

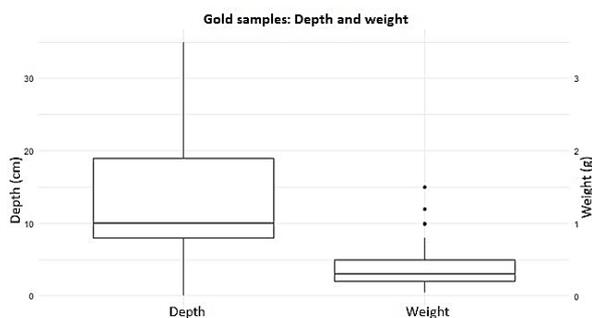


Figure 5. Boxplot for depth and sample weights of prospected native gold samples.



Figure 6. Weight versus depth for gold grains found during three exploration days.

The local concentrations and rarity of these specimens typically do not make large mineral exploration projects viable. Additionally, the high economic value and high liquidity of these finds make it difficult to acquire samples for scientific analysis, given that they are quickly sold and melted down for use in the jewelry industry.

The collected data shows the economic viability of the proposed project and methods, considering that the prospected gold value exceeded the production costs, thus

generating profits for both prospectors and the landowner. The 35 gold samples found with the geophysical device amount to 14.64 g in weight, valued at the price of gold at the time of extraction (R\$ 310/g) in R\$ 4,538 (November 5, 2020). The total exploration and extraction costs, including the backhoe rental, fuel, and team logistics, amounted to R\$ 2,750. At the studied area, the other prospection methodology possibility to find gold would be removing all the eluvial blanket by using backhoes and trucks to a washing area associated with

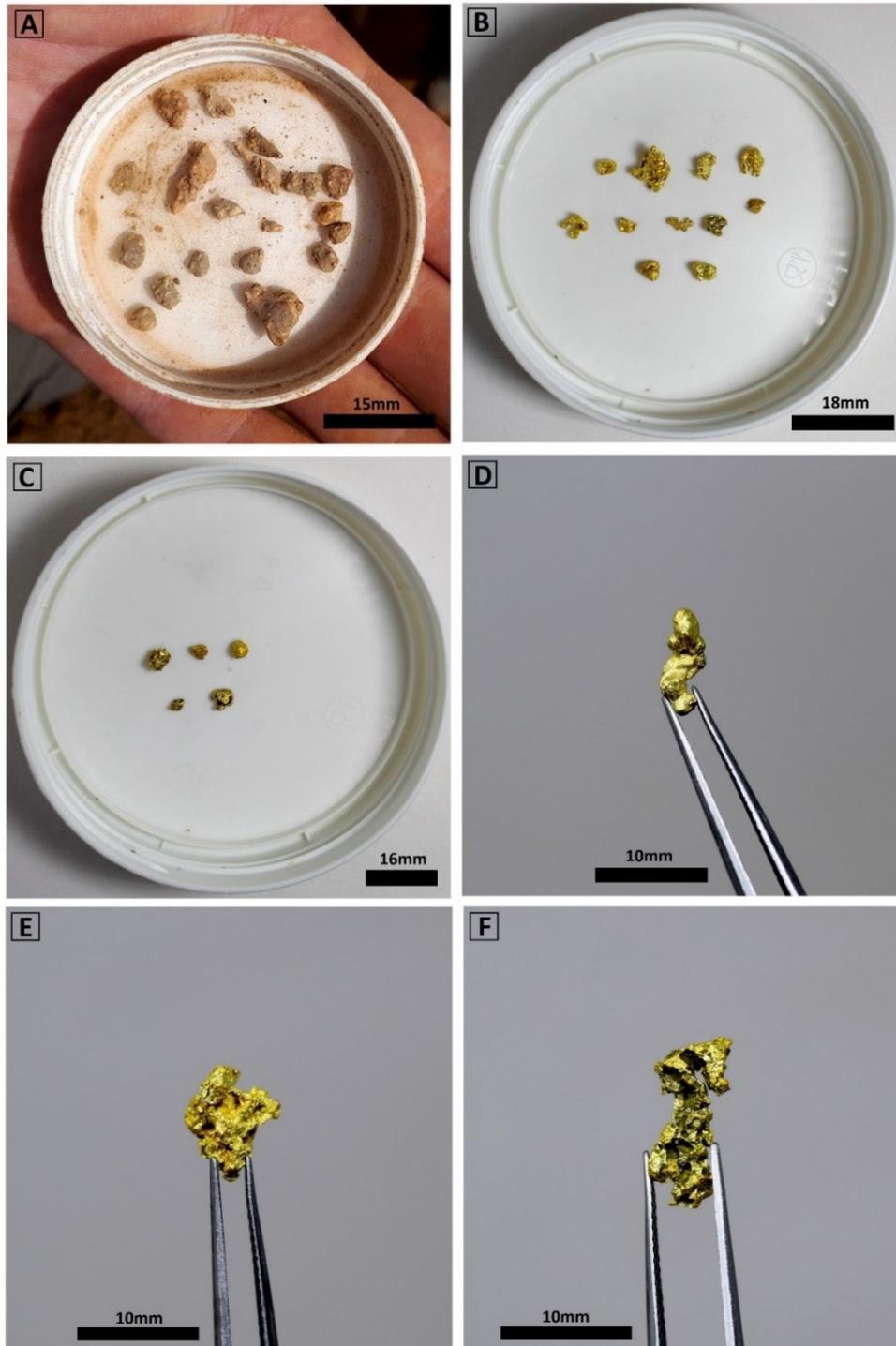


Figure 7. (A) Total native gold samples prospected during the first day, grains and nuggets with debris. (B) Total native gold samples prospected during the second day, clean grains. (C) Total native gold samples prospected during the third day, clean grains. (D) Native gold sample crystallized in arborescent habit with dimensions of 9×3×2 mm and a weight of 0.5 g. (E) Xenomorphic native gold sample, low sphericity, angular, with the presence of cavities and voids with dimensions of 9×7×5 mm and a weight of 1.0 g. (F) Xenomorphic native gold sample, low sphericity, angular, with numerous cavities and voids. Some voids have geometric surfaces, which are evidence of the dissolution of other minerals existing there (box works). Iron oxides/hydroxides were also found within the holes with dimensions of 13×6×2 mm and a weight of 0.9 g.

a gravimetric concentrator. This kind would need a considerably larger monetary investment and would definitely represent a huge environmental impact. Furthermore, that was not done in this and any nearby area to compare the results. It is worth mentioning that the project area is considered by the local prospectors as already depleted of large gold volumes, with previous reported exploitation of considerable gold volumes at the local level.

From a statistical standpoint, the value determined for the sample correlation coefficient (0.35) demonstrates a positive association between the weight of the samples according to the depth found. Despite the value of the sample association determined ($0.35 \ll 1$) not being considered a noteworthy value, the (r) value at the significance level of 10% found a p-value of 0.03 or 3%. As the p-value obtained in the hypothesis test was lower than the established significance level of 10% (error probability), it was concluded that the population correlation coefficient is statistically different from zero; hence, admittedly, the correlation coefficient is significant. Therefore, its population significance is confirmed, which, in turn, validates the tendency for larger nuggets to be found at a greater depth at the regolith level.

Except for a few specimens with defined habits and preserved faces typical of the cubic system, the prospected samples were xenomorphic and presented intensely pitted surfaces. This surface, which in some cases produces a spongy texture in the nuggets (Fig. 8B), added to the high angulation — prominent and pointed edges — suggests a low degree of transport of the nuggets, since such metal is highly malleable and ductile. With a small degree of transport, these nuggets would display significant changes in morphology (flattening, smoothing, and low angulation).

Native gold generally occurs in an alloy with silver. The atomic ratio of both metals is equal, allowing the formation of a continuous series between them (Hough *et al.* 2009). According to Butt *et al.* (2020), the depletion of silver can be understood as the first stage of weathering, in which a micro-porosity develops in the free gold particle, resulting in voids that facilitate the access of weathering fluids and fine particles, such as clays and secondary oxides. According to these authors, in larger samples, an extreme depletion of Ag associated with



Figure 8. (A) Gold nugget with dimensions of 2.9 cm × 2.3 cm × 1.5 cm and a weight of 15.06 g, crystallized in arborescent habit with a slightly pitted surface. (B) Gold nugget with dimensions of 3.4 cm × 2.3 cm × 1.2 cm and a weight of 26.30 g, xenomorphic, low sphericity, angular geometry, intensely pitted, spongy texture, and presence of voids and cavities, mostly filled with iron oxides/hydroxides.

Au dissolution can lead to the formation of a spongy texture on the intensely pitted surfaces of the gold nuggets.

The geological aspects of the study area integrated with the regional geology and the characteristics of the native gold samples found all indicate that the gold mineralization at the site is hypogenic and comes from quartz veins intruded into the host rocks. The preferential weathering of the host rocks, the Gouveia granite complex, simultaneously with the dismantling and accommodation of the voluminous quartz veins mechanically concentrated the gold nuggets and grains at this regolith level above the bedrock, and large nuggets naturally occupied great depths. The high degree of mineralogical maturity of the unconsolidated sediment of the regolith layer, formed almost exclusively of highly angular quartz pebbles, together with the irregular and angular morphology of the nuggets and auriferous grains, suggest low transport of this sediment, thus being interpreted as an eluvial layer originated from weathered granitic rocks underneath (Fig. 9).

Environmental and social aspects

Traditionally in Brazil, the main artisanal and small-scale gold mining methods use gravimetric concentration, blasting, washing, and dredging (Rodrigues *et al.* 1994). Artisanal alluvial mining, carried out with the help of pans and improvised gravimetric concentrators, is a widespread practice throughout Brazil. In the colonial period, this mining was synonymous with wealth; however, today it represents scarcity; those who practice it do so as a form of subsistence since the shallow alluvial gold deposits have already been exhaustively exploited, leaving tiny amounts of metallic mineral resources in the main water courses. Associated with this method of gold prospecting, it is quite common to use liquid mercury in order to unite fine-grained gold into a single amalgam, which, when burned, volatilizes the mercury and forms a single gold agglomerate. This practice is particularly harmful to the workers in direct

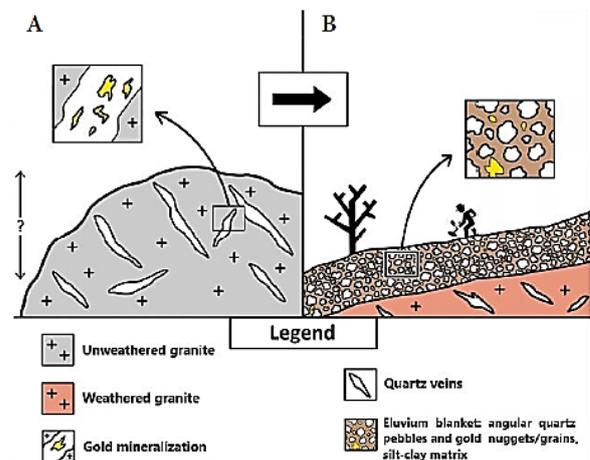


Figure 9. Schematic geological model of the genesis and concentration of the gold at the eluvium blanket. (A) Gold mineralization in quartz veins intruding the unweathered granite and (B) eluvium blanket composed of angular quartz pebbles and gold nuggets/grains, result of the weathering of the granite rock as well the dismantling and accommodation of the gold-quartz mineralized veins.

contact with such substances, as well as to the entire ecosystem since this volatile metal is easily oxidized in the environment and methylated to its most toxic form, methylmercury, which can then be incorporated into organisms through the food chain (De-Paula *et al.* 2006).

The dismantling of slopes and thick soils followed by washing, a typical method of artisanal small-scale gold mining in the Amazon region, also presents major environmental impacts, both physical and biotic. This practice encompasses first the deforestation of the target area, followed by removal and intense washing of the lateritic/saprolitic material, which results in the dumping of tons of sediment into waterways. This practice causes direct changes in the particle sedimentation dynamics, causing changes in the color and turbidity of the water (Rodrigues *et al.* 1994). The prospected site completely loses its original geomorphological features and becomes intensely susceptible to accelerated degradation from weathering and erosion. In addition, mercury is also utilized in this practice for separation and beneficiation in cases where the granulometry is fine.

Commonly used in larger watercourses, mining by dredging unconsolidated material deposited in thalwegs and subsequent gravimetric concentration is associated with major environmental impacts. According to Castro and Almeida (2012), the main aspects related to such practices are as follows: change of the hydraulic and sedimentological conditions of the flow, with possible alteration of the circulation patterns, water mixing, and turbidity; alteration of the conditions at the place of release of the dredged material; and pollution by toxic substances existing in the dredging material from its suspension and movement during the activity. In gold mining, the indiscriminate use of mercury is a significant addition in terms of impacts besides the previously mentioned issues since this ore, in large waterways and at great depths, is usually found in fine granulometry. Apart from the environmental impacts, the dredging of sediments in rivers requires a significant financial contribution for the acquisition of equipment and maintenance of activities.

In this study, it is understood that the gold prospecting method by high-resolution metal detectors imposes local impacts restricted to the remobilization of unconsolidated material where the metallic targets are located, usually in eluvium, colluvium, and low-depth alluvium, with this remobilization carried out manually with shovels and pickaxes. Although this technology cannot be considered effective in all environments (for instance, deep underwater environments or very fine-grained ores), prospecting using this method is effective, mercury-free, and has low impacts on local fauna and flora while providing a significant income to many people. It should be noted, however, that the opening of trenches/rows represents a more significant environmental impact, considering the removal of local undergrowth in addition to the remobilization of a greater volume of unconsolidated material.

The small-scale gold mining industry has remarkable economic significance at local level. However, a key point in the artisanal and small-scale gold prospecting issue is its legality, considering that such practices often do not comply with the

obligations imposed on them by local authorities. Thus, it is recommended that small local prospectors organize mineral cooperatives that can be duly formalized with the Agência Nacional de Mineração (National Mineral Agency) in favor of cooperation among prospectors, land owners, and proprietors of mineral rights in the area in question.

CONCLUSION

The employment of geophysical methods for prospecting subsurface gold occurrences carried out by time-domain EMI equipment proved to be effective in detecting several samples of native gold in eluvial material. The easy operation of the equipment and the rapid response associated with geological knowledge contribute to the expansion of this method, providing subsidies for investments in mineral exploration in this area and other regions.

Based on the collected data and statistical analyses conducted for both sample and population coefficients, there is a positive linear correlation between weight and depth for gold samples. Larger nuggets tend to be found at a deeper level. The gold mineralization in this area was found to be hypogenic, with native gold crystallized in the quartz veins present in the host rock. The current concentration of gold at regolith levels developed due to preferential weathering of granite rock with posterior dismantling and accommodation of gold in quartz veins in the local relief. The study of gold nuggets and grains provides an understanding of the mineralogy and metallogeny of such occurrences in the Southern Espinhaço Range, and further academic contributions are necessary to deepen the understanding of the subject in this region.

From an environmental perspective, traditional artisanal and small-scale gold mining practices in Brazil are undoubtedly related to several important environmental and social impacts. It is concluded that high-resolution metal detectors are a viable alternative to archaic and damaging prospecting practices and methods, particularly considering their effectiveness, relatively low cost, and significantly lower environmental impacts. Given this context, this study is likely applicable to all areas of the world where similar practices are utilized.

ACKNOWLEDGMENTS

This study was funded in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001. We especially thank the local prospector community, particularly Itamar Mauricio Pereira Neto, Emerson Aparecido Alves Afonso, and their families for their hospitality, for allowing the accompaniment of exploration campaigns, and for providing personal gold samples to be studied and characterized for this project. We would also like to thank professors Antônio Wilson Romano and Pedro Benedito Casagrande for their contributions to the field campaigns and in the geological discussions conducted during this study, and professor Ted Steinberg for his comments and review.

ARTICLE INFORMATION

Manuscript ID: 20220068. Received on: 19 NOV 2022. Approved on: 27 JUN 2023.

How to cite: Borgatti H., Melo A.T., Knauer L.G. 2023. Artisanal and small-scale gold mining in the Southern Espinhaço Range, Brazil, using time-domain electromagnetic induction: prospecting, efficiency, and environmental aspects. *Brazilian Journal of Geology*, **53**(3):e2022090. <https://doi.org/10.1590/2317-48892023022090>

H.B.: Conceptualization, Data curation, Formal Analysis, Investigation, Methodology, Project administration, Writing – original draft, Writing – review & editing. A.T.M.: Supervision, Writing – review & editing. L.G.K.: Resources, Validation, Writing – review & editing.

Competing interests: the authors declare no competing interests.

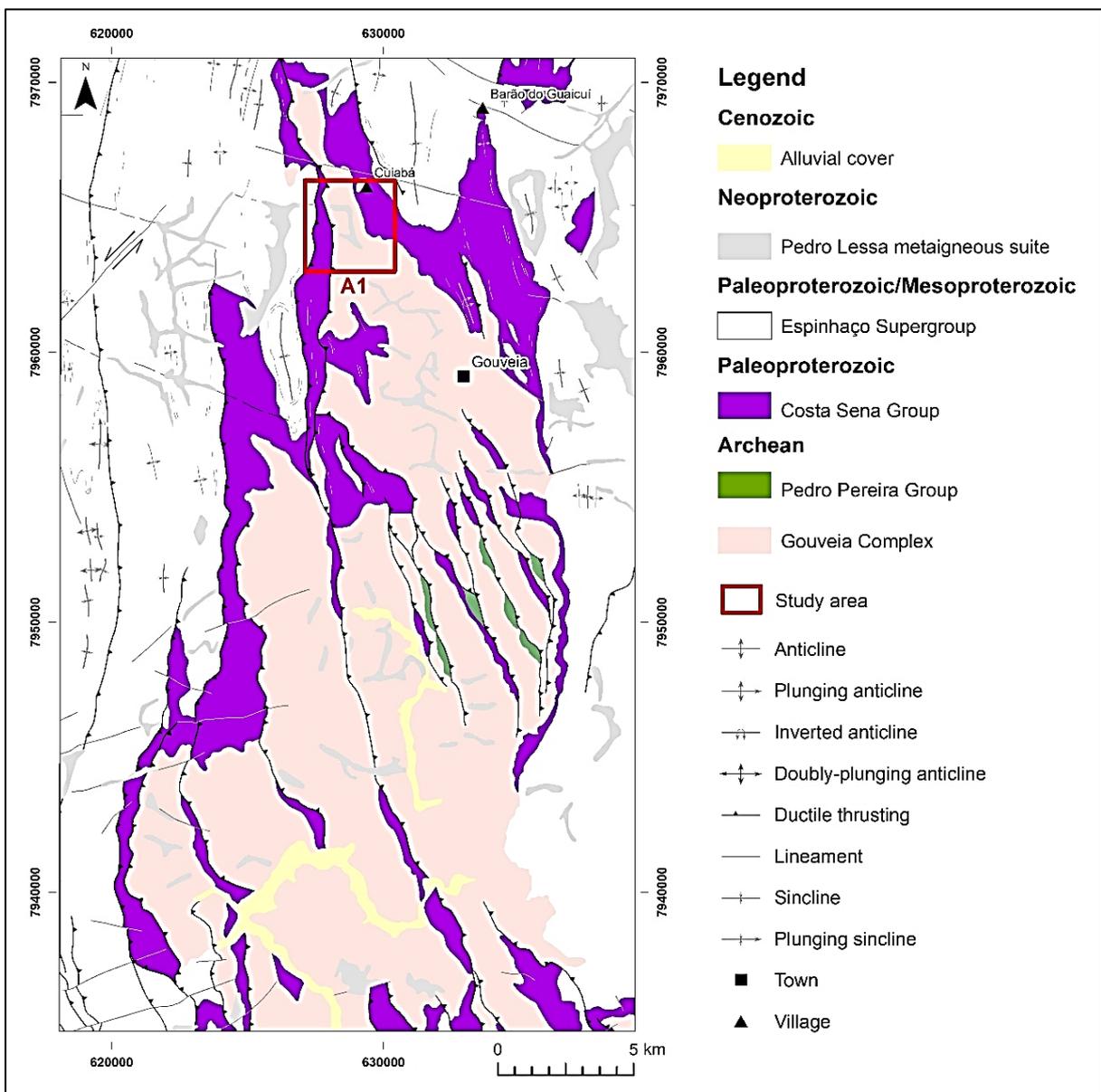
REFERENCES

- Abreu F.R. 1991. *Estudo das Mineralizações Auríferas Filonianas da Região da Cidade de Diamantina/MG*. Master's dissertation, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 85 p.
- Almeida F.F.M. 1977. O Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, **7**(4):349-364.
- Bruschini C. 2002. *A Multidisciplinary Analysis of Frequency Domain Metal Detectors for Humanitarian Demining*. Doctorate thesis, Faculty of Applied Sciences, Vrije Universiteit Brussel, Brussels, 230 p.
- Butt C.R.M., Hough R.M., Verrall M. 2020. Gold nuggets: the inside story. *Ore and Energy Resource Geology*, **4**-5:100009. <https://doi.org/10.1016/j.oreoa.2020.100009>
- Cabral A.R., Eugster O., Brauns M., Lehmann B., Rösel D., Zack T., Abreu F.R., Pernicka E., Barth M. 2013. Direct dating of gold by radiogenic helium Testing the method on gold from Diamantina, Minas Gerais, Brazil. *Geology*, **41**(2):163-166. <https://doi.org/10.1130/G33751.1>
- Candy B.H. 2014. *Constant current metal detector with driven transmit coil*. AU. N° US 2014/0232408 A1.
- Castro S.M., Almeida J.R. 2012. Dragagem e conflitos ambientais em portos clássicos e modernos: uma revisão. *Sociedade & Natureza*, **24**(3):519-533. <https://doi.org/10.1590/s1982-45132012000300011>
- Chaves M.L.S.C., Brandão P.R.G., Buhn B. 2010. Monazita em veios de quartzo da Serra do Espinhaço Meridional (MG): mineralogia, idades LA-ICP-MS e implicações geológicas. *Revista Brasileira de Geociências*, **40**(4):506-515. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.2010404506515>
- Connor M., Scott D.D. 1998. Metal detector use in archaeology: An introduction. *Historical Archaeology*, **32**(4):76-85. <https://doi.org/10.1007/bf03374273>
- De-Paula V.G., Lamas-Corrêa R., Tutunji V.L. 2006. Garimpo e mercúrio: impactos ambientais e saúde humana. *Universitas: Ciências da Saúde*, **4**(12):101-110. <https://doi.org/10.5102/ucs.v4i1.25>
- Dessertine A. 2016. From pickaxes to metal detectors: Gold mining mobility and space in Upper Guinea, Guinea Conakry. *The Extractive Industries and Society*, **3**(2):435-441. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2016.02.010>
- Dossin T.M., Chaves M.L.S.C., Dossin I.A. 1990. Mineralizações Auríferas Associadas às Zonas de Cisalhamento Brasileiras do Espinhaço Meridional (Minas Gerais). *Revista de Geologia*, **3**:19-28.
- Freitas M.H.G. 2020. *Característica das inclusões fluidas de veios de quartzo da Serra do Pasmor, Diamantina/MG e seu significado na deposição de ouro na Serra do Espinhaço Meridional*. Master's dissertation, Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 113 p.
- Google Earth Pro 7.3. 2022. *Landscapes and Reliefs 43°46' 50" W, 18°25' 06" S, elevation 1080 m*. Available at: www.google.com/intl/pt-BR_ALL/earth/about/versions/#earth-pro. Accessed April 1, 2022.
- Hentschel T., Hruschka F., Priester M. 2002. *Global Report on Artisanal and Small-Scale Mining*. Minerals Mining and Sustainable Development (MMSD) Project. London International Institute for Environmental Development.
- Hilson G., Maconachie R. 2017. Formalising artisanal and small-scale mining: insights, contestations and clarifications. *Area*, **49**(4):443-451. <https://doi.org/10.1111/area.12328>
- Hough R.M., Butt C.R.M., Fischer-Bühner J. 2009. The crystallography, metallography and composition of gold. *Elements*, **5**(5):297-302. <https://doi.org/10.2113/gselements.5.5.297>
- Kim J. 2015. Archive How to Choose the Level of Significance: A Pedagogical Note. *Munich Personal RePEc*. Available at: <https://mpra.ub.uni-muenchen.de/66373/>. Accessed in: March 2022.
- Knauer L.G. 2007. O Supergrupo Espinhaço em Minas Gerais: considerações sobre sua estratigrafia e seu arranjo estrutural. *Geonomos*, **15**(1):81-90. <https://doi.org/10.18285/geonomos.v15i1.109>
- Kuchenbecker M. 2019. Os processos geológicos por trás dos sítios arqueológicos da Serra do Espinhaço Meridional. *Revista Espinhaço*, **8**(2):2-12. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3583279>
- Lobo F., Costa M., Novo E., Telmer K. 2016. Distribution of Artisanal and Small-Scale Gold Mining in the Tapajós River Basin (Brazilian Amazon) over the Past 40 Years and Relationship with Water Siltation. *Remote Sensing*, **8**(7):579. <https://doi.org/10.3390/rs8070579>
- Minelab 2022. *Manual de instruções GPZ 7000*. Rev. 3. Available at: https://www.minelab.com/_files/f/408231/GPZ7000_InstructionalManual_PT.pdf. Accessed in: September 2021.
- Mlambo P., Dera H., Chiweshe E., Jonathan E. 2018. Inductive Metal Detectors and the Design of Prospecting Robots: a Possibility. *EAI International Conference for Research, Innovation and Development for Africa*, 10-19. <https://doi.org/10.4108/eai.20-6-2017.2270713>
- Rodrigues R.M., Mascarenhas A.F.S., Ichihara A.H., Souza T.M.C., Bidone E.D., Bellia V., Hacon S., Silva A.R.B., Braga J.B.P., Filho B.S. 1994. *Estudo dos impactos ambientais decorrentes do extrativismo mineral e poluição mercurial no Tapajós*. Rio de Janeiro: CETEM/CNPq, 220 p.
- Ronchi L.H., Giuliani G., Beny C., Fogaça A.C.C. 1992. Caracterização físico-química dos fluidos associados aos veios de quartzo auríferos de costa sena - MG. *Revista Brasileira de Geociências*, **22**(2):129-138. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.1992129138>
- Telford W.M., Telford W.M., Geldart L.P., Sheriff R.E. 1990. *Applied geophysics*. Cambridge: Cambridge University Press, 792 p

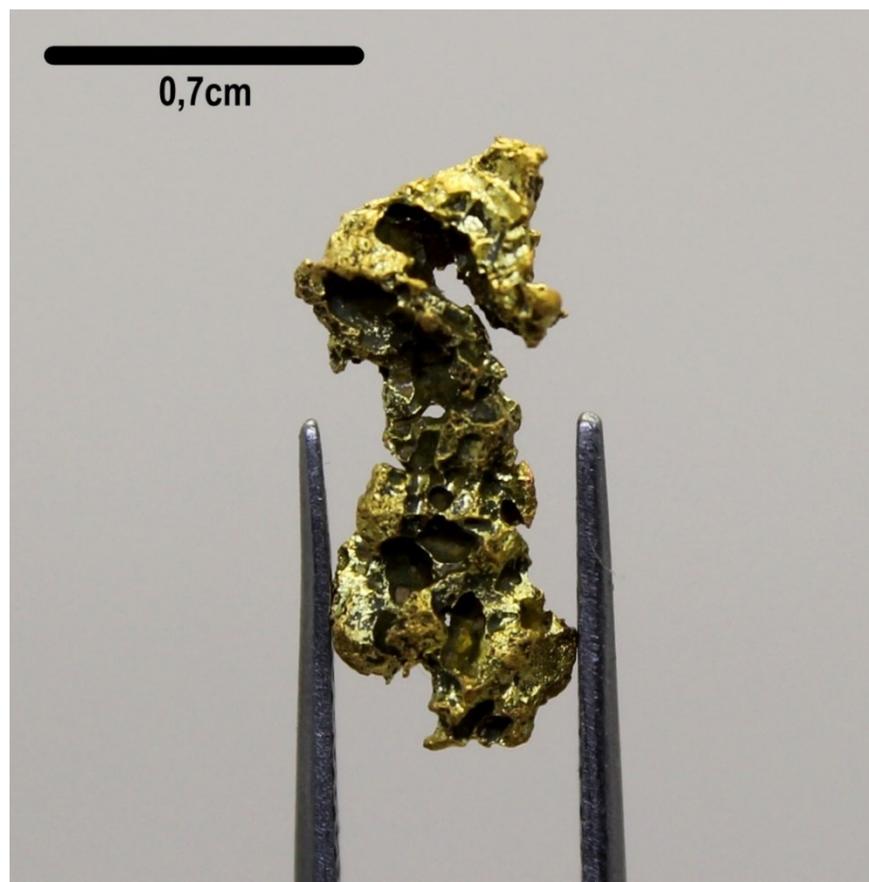
5 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

Neste capítulo complementar serão descritas e organizadas de acordo com seu local de origem diversas amostras de ouro nativo prospectadas nas áreas: A1, A2 e A3. Em seguida uma discussão mineralógica será apresentada sobre o entendimento das análises e discussões realizadas.

Figura 7. Mapa geológico esquemático da Serra Meridional do Espinhaço e regiões adjacentes, com detalhe para a Área 1, de onde as amostras descritas a seguir foram prospectadas



Fonte: Modificado de Freimann (2022, p. 62).

Figura 8. Amostra #A1-01

Descrição da amostra #A1-01

Amostra de ouro nativo de baixa esfericidade e bastante angulosa. Coloração amarelo-pálida com porções mais escuras. A superfície da pepita encontra-se intensamente esburacada com a presença numerosa de sulcos e espaços vazios decorrentes de corrosão. Nota-se que a superfície do interior das regiões esburacadas é consideravelmente mais lisa que a superfície externa da amostra. Observa-se, também, considerável presença de óxidos/hidróxidos de ferro/manganês recobrimo a superfície da amostra, predominantemente nas porções internas dos sulcos e buracos.

Nota: Dimensões: 1,4x0,6x0,3cm / Peso: 0,88g.

Fonte: Arquivo do autor.

Figura 9. Amostra #A1-02

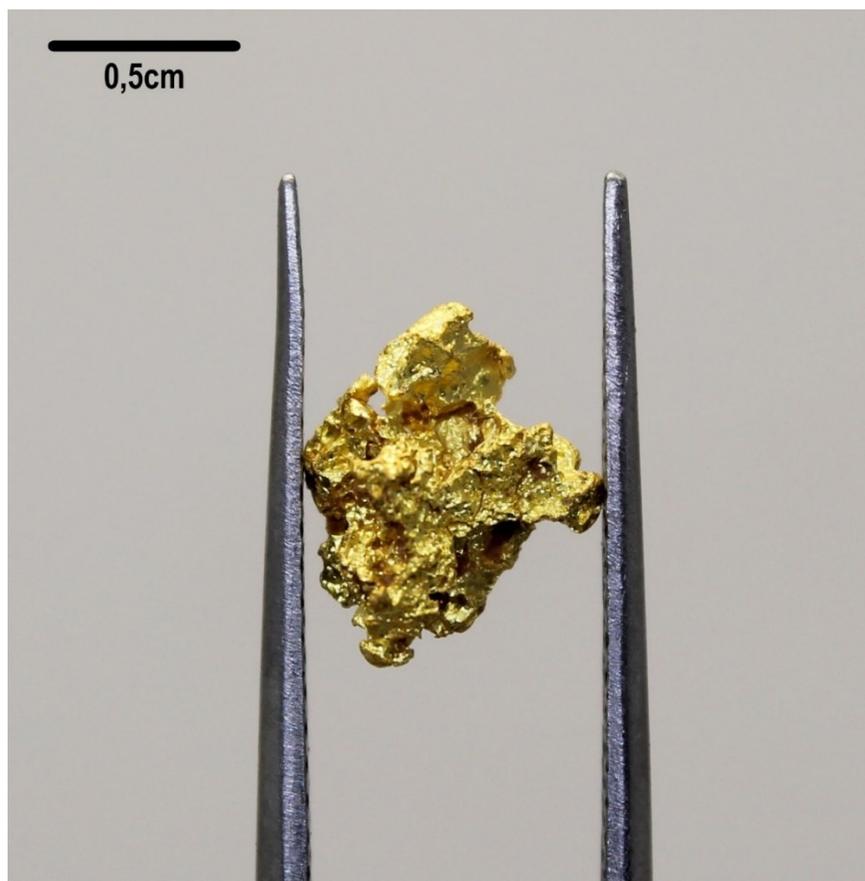
Descrição da amostra #A1-02

Amostra de ouro nativo angulosa e de baixa esfericidade. Coloração amarelo-pálido com porções ocre-alaranjadas. A superfície da pepita encontra-se intensamente esburacada com a presença numerosa de sulcos e superfícies vazias arredondadas decorrentes de corrosão, alguns destes espaços ainda apresentam inclusão de materiais argilosos e grãos arredondados de quartzo. A superfície da pepita possui uma textura, homogênea, moderadamente áspera. Observa-se, também, a presença de óxidos/hidróxidos de ferro/manganês recobrendo localmente a superfície da amostra, predominantemente nas porções internas dos sulcos e buracos.

Nota: Dimensões: 1,2x0,5x0,3cm/Peso: 0,85g.

Fonte: Arquivo do autor.

Figura 10. Amostra #A1-03



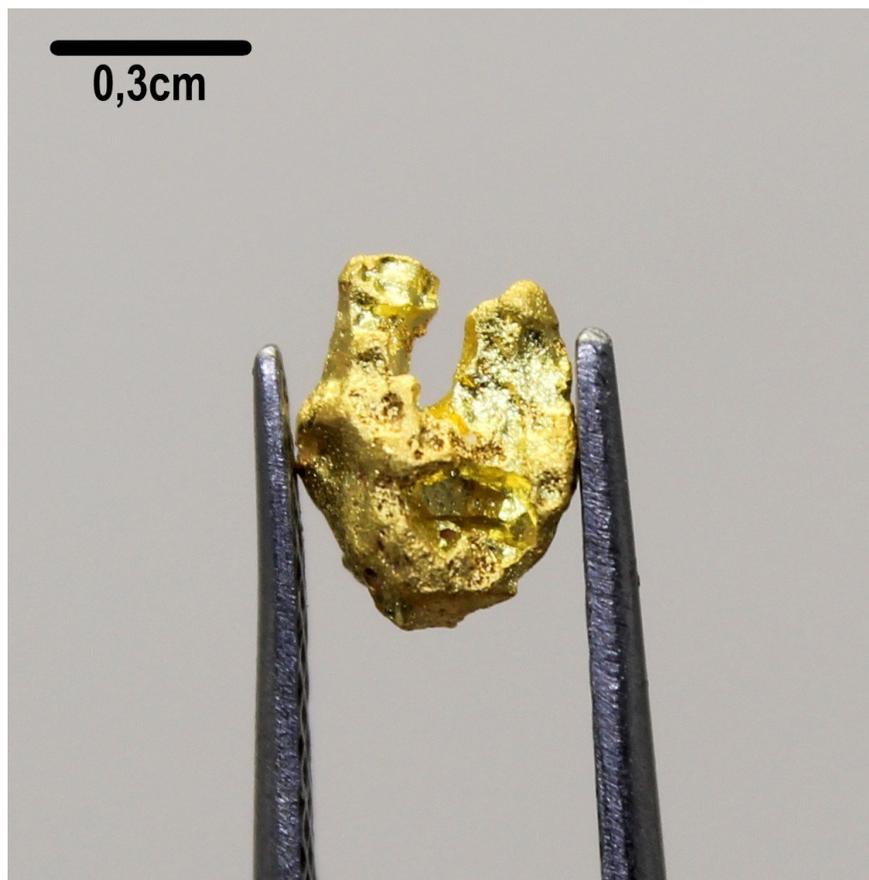
Descrição da amostra #A1-03

Amostra de ouro nativo bastante angulosa e de esfericidade intermediária. Coloração amarelo-pálido com porções ocre-alaranjadas. A superfície da pepita encontra-se moderadamente esburacada com a presença de sulcos e superfícies vazias predominantemente arredondadas e, subordinadamente, retilíneas, decorrentes de corrosão. Alguns destes espaços ainda apresentam inclusão de materiais argilosos. A superfície da pepita possui uma textura, homogênea, intensamente áspera.

Nota: Dimensões: 0,9x0,7x0,5cm / Peso: 1,00g

Fonte: Arquivo do autor.

Figura 11. Amostra #A1-04



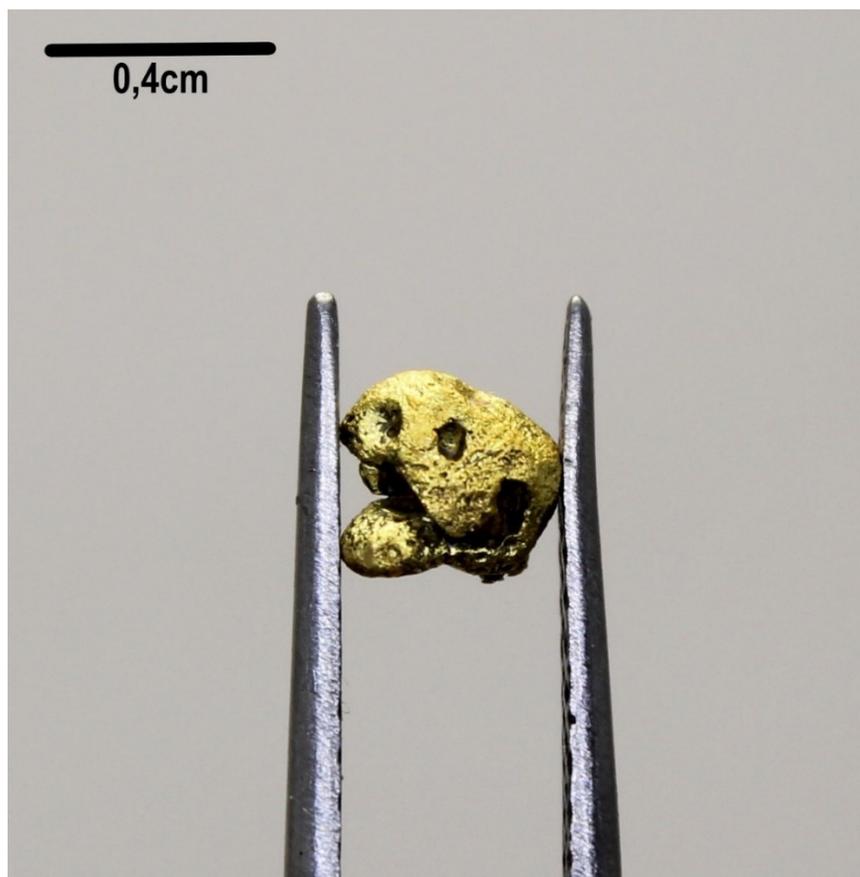
Descrição da amostra #A1-04

Amostra de ouro nativo angulosa e de esfericidade intermediária. Coloração amarelo-pálido com porções amarelo-alaranjado. A superfície encontra-se moderadamente esburacada com a presença de sulcos e superfícies vazias predominantemente arredondadas, decorrentes de corrosão. Em um desses espaços, nota-se feições geométricas que remetem superfícies de contato com outros minerais (box works). A superfície da amostra possui uma textura, heterogênea, sendo moderadamente lisa com regiões mais ásperas.

Nota: Dimensões: 0,6x0,4x0,2cm / Peso: 0,38g.

Fonte: Arquivo do autor.

Figura 12. Amostra #A1-05

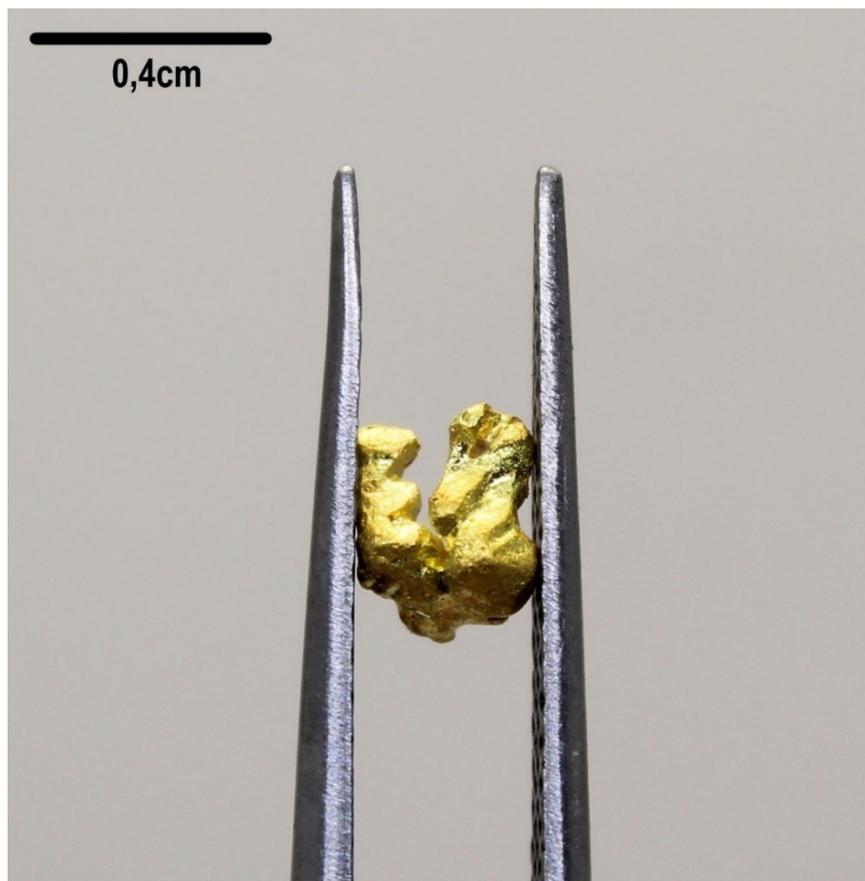


Descrição da amostra #A1-05

Amostra de ouro nativo moderadamente arredondada e de esfericidade intermediária. Coloração amarelo-pálido com porções mais escuras. A superfície encontra-se moderadamente esburacada com a presença de sulcos e superfícies vazias arredondadas e retilíneas, decorrentes de corrosão. A superfície da amostra possui uma textura, homogênea, moderadamente áspera. Observa-se, também, a presença de óxidos/hidróxidos de ferro/mangânês recobrindo a superfície da amostra, predominantemente nas porções internas dos sulcos e buracos.

Nota: Dimensões: 0,4x0,4x0,2cm / Peso: 0,31g.

Fonte: Arquivo do autor.

Figura 13. Amostra #A1-06

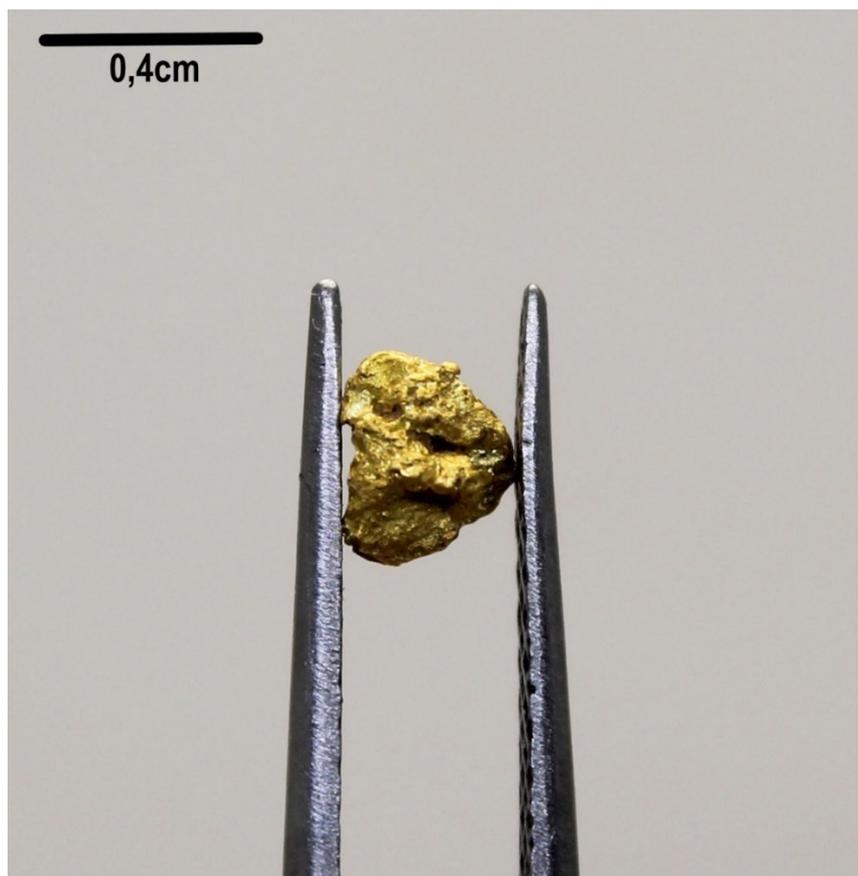
Descrição da amostra #A1-06

Amostra de ouro nativo moderadamente angulosa e de esfericidade baixa. Coloração amarelo-pálido com porções mais saturadas em amarelo. A superfície encontra-se moderadamente esburacada com a presença de sulcos e superfícies vazias arredondadas e retilíneas, decorrentes de corrosão. Nota-se algumas faces preservadas, porém intensamente deformadas. A superfície da amostra possui uma textura, homogênea, moderadamente lisa.

Nota: Dimensões: 0,4x0,3x0,3cm / Peso: 0,26g.

Fonte: Arquivo do autor.

Figura 14. Amostra #A1-07

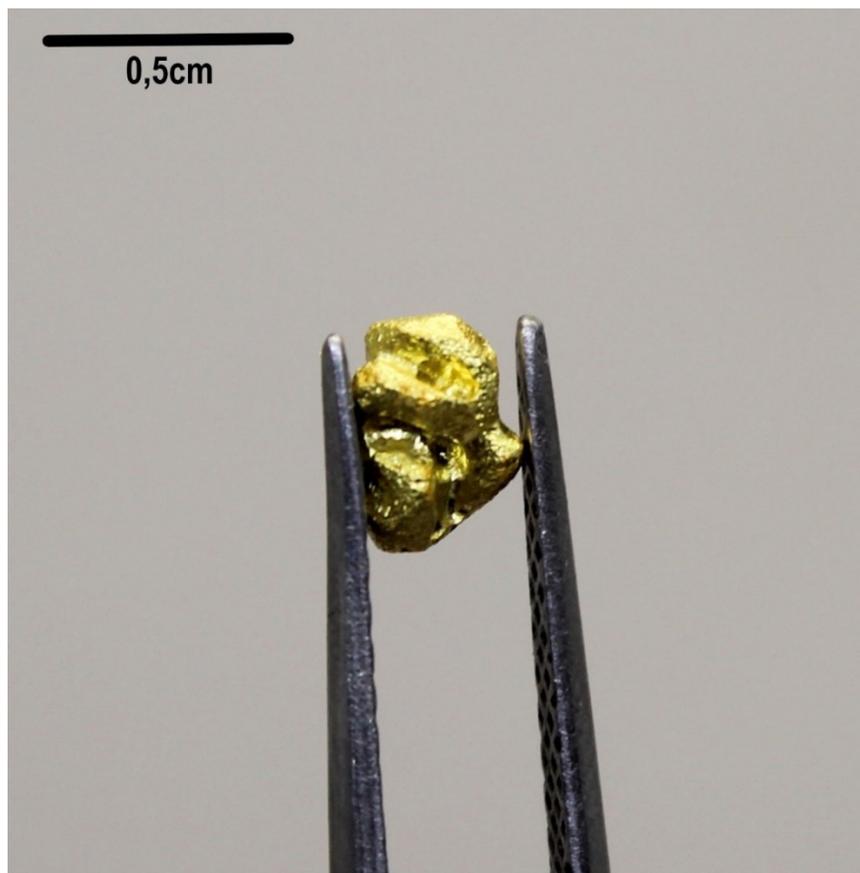


Descrição da amostra #A1-07

Amostra de ouro nativo moderadamente arredondada e de esfericidade alta. Coloração amarelo levemente alaranjado. A superfície encontra-se moderadamente esburacada com a presença de sulcos e superfícies vazias predominantemente retilíneas, decorrentes de corrosão. A superfície da amostra possui uma textura, homogênea, moderadamente áspera.

Nota: Dimensões: 0,4x0,3x0,2cm / Peso: 0,28g.

Fonte: Arquivo do autor.

Figura 15. Amostra #A1-08

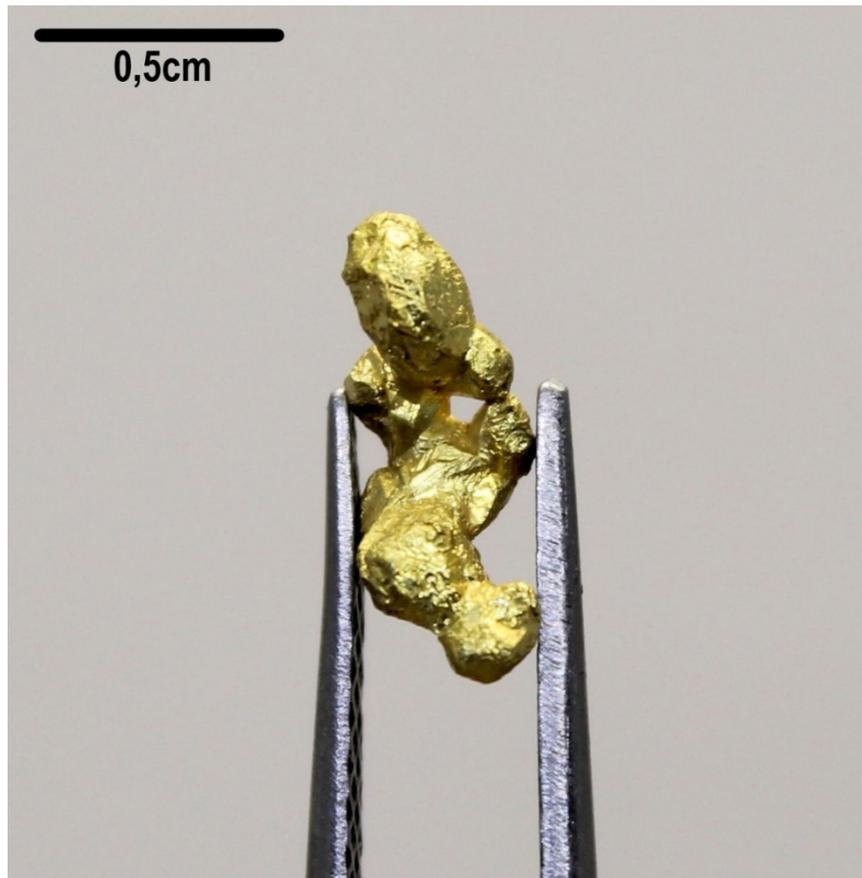
Descrição da amostra #A1-08

Amostra de ouro nativo moderadamente angulosa e de esfericidade baixa. Coloração amarelo-pálido com porções mais saturadas em amarelo. A superfície da amostra encontra-se levemente esburacada com a presença de sulcos e superfícies vazias predominantemente retilíneas, decorrentes de corrosão. Nota-se faces preservadas, porém intensamente deformadas. A superfície possui uma textura, homogênea, moderadamente lisa, sendo intensamente lisa nas regiões internas dos sulcos e espaços vazios.

Nota: Dimensões: 0,5x0,3x0,3cm / Peso: 0,40g.

Fonte: Arquivo do autor.

Figura 16. Amostra #A1-09



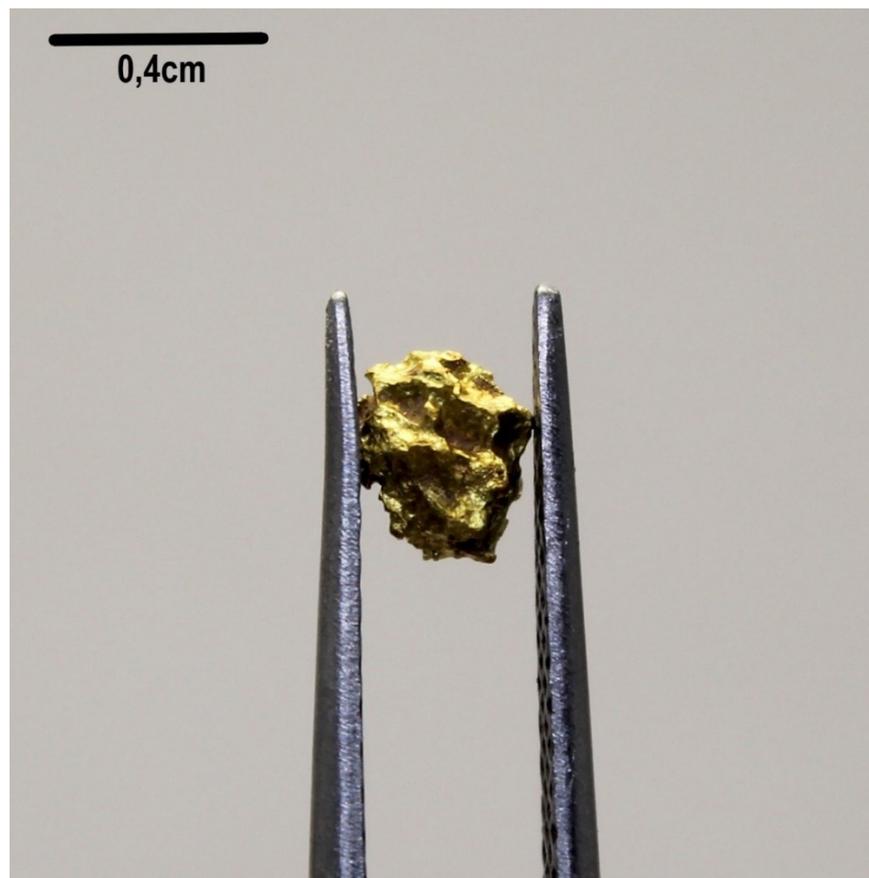
Descrição da amostra #A1-09

Amostra de ouro nativo moderadamente angulosa e de esfericidade baixa. Coloração amarelo-pálido. A superfície da pepita encontra-se predominantemente lisa com marcas de crescimento trigonais e feições proto-esqueletais. Nota-se faces preservadas típicas da classe hexoctaédrica do sistema isométrico, cristalizadas em hábito arborescente.

Nota: Dimensões: 0,9x0,3x0,3cm/ Peso: 0,50g.

Fonte: Arquivo do autor.

Figura 17. Amostra #A1-10



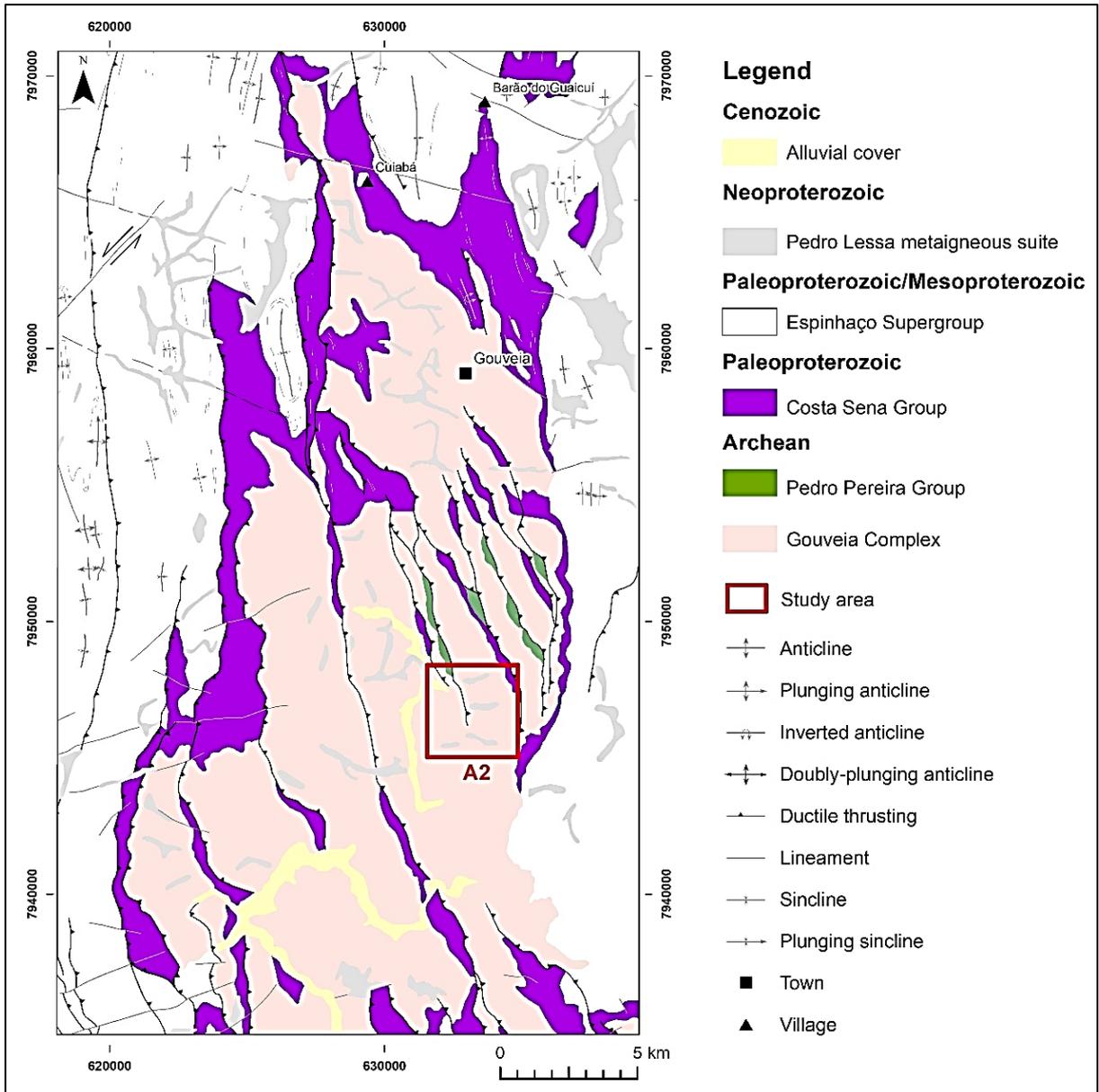
Descrição da amostra #A1-10

Amostra de ouro nativo moderadamente arredondada e de esfericidade elevada. Coloração amarelo pálido. A superfície encontra-se intensamente esburacada com a presença de sulcos e superfícies vazias predominantemente arredondadas, decorrentes de corrosão. Em um desses espaços, nota-se feições geométricas que remetem superfícies de contato com outros minerais (box works). Em relação à textura, a superfície da amostra é homogênea e intensamente áspera. Observa-se, também, resquícios de materiais argilosos nas porções internas dos sulcos/espacos vazios.

Dimensões: 0,4x0,3x0,3cm / Peso: 0,41g.

Fonte: Arquivo do autor.

Figura 18. Mapa geológico esquemático da Serra Meridional do Espinhaço e regiões adjacentes, com detalhe para a Área 2, de onde as amostras descritas a seguir foram prospectadas



Fonte: Modificado de (Freimann, 2022, p. 62).

Figura 19. Amostra #A2-01



Descrição da amostra #A2-01

Amostra de ouro nativo cristalizada em formato de chapa alongada. Coloração homogênea amarelo-pálido. A superfície do cristal encontra-se predominantemente lisa com feições de crescimento escalonadas. Nota-se faces preservadas nas arestas do sólido, entretanto intensamente deformadas.

Nota: Dimensões: 2,0x0,4x0,1cm / Peso: 0,91g.

Fonte: Arquivo do autor.

Figura 20. Amostra #A2-02



Descrição da amostra #A2-02

Amostra cristalizada em formato de fio, parte superior e parte inferior em formato arredondado com faces ainda preservadas e morfologia típica da classe hexoctaédrica do sistema isométrico. A parte superior, em formato de fio, também apresenta resquícios dos planos de cristalização. Em relação à cor, se apresenta homogênea em tonalidade amarelo-pálido.

Nota: Dimensões: 1,0x0,2x0,1cm / Peso: 0,36g.

Fonte: Arquivo do autor.

Figura 21. Amostra #A2-03



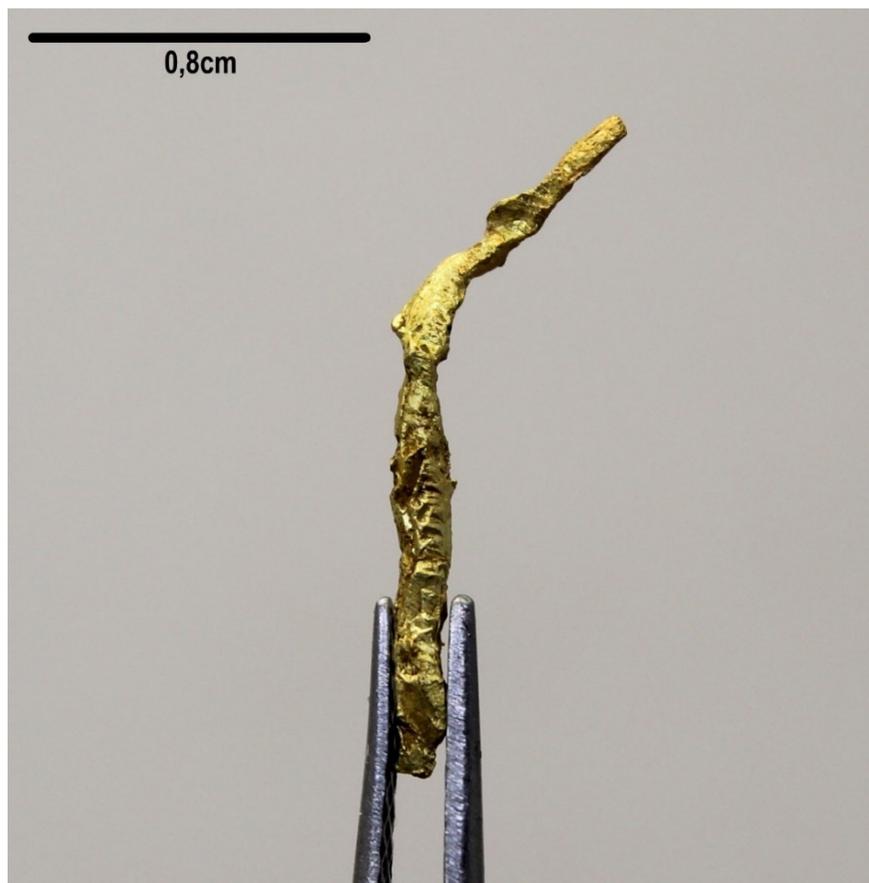
Descrição da amostra #A2-03

Amostra cristalizada em formato de fio, com geometria arredondada, afinando da base para o topo. Observa-se estrias de crescimento paralelas à direção de crescimento do cristal. Em relação à cor, se apresenta homogênea em tonalidade amarelo-dourado.

Nota: Dimensões: 1,6x0,3x0,2cm / Peso: 0,64g.

Fonte: Arquivo do autor.

Figura 22. Amostra #A2-04



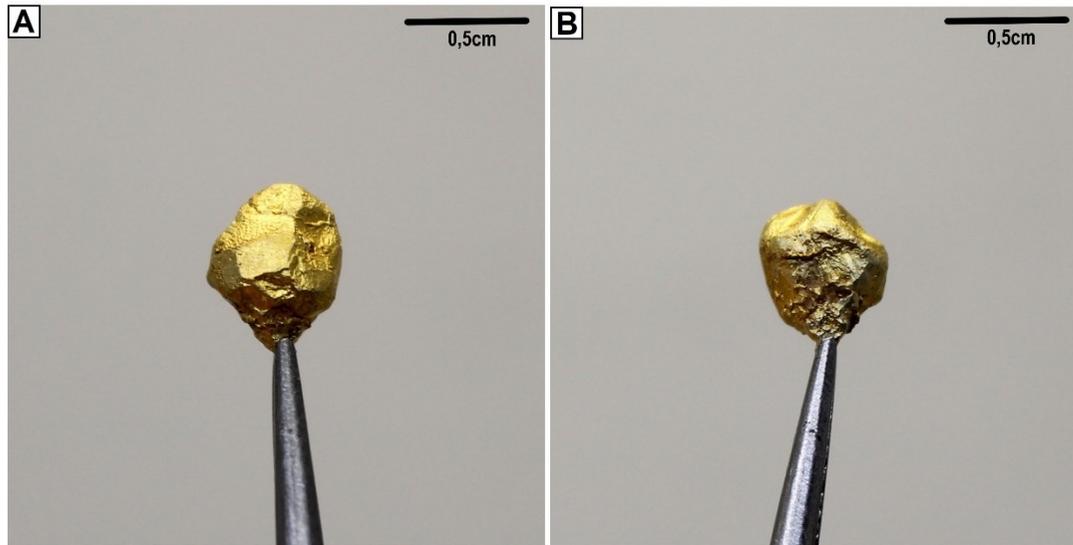
Descrição da amostra #A2-04

Amostra cristalizada em formato de fio, com geometria em chapa, afinando da base para o topo. Observa-se feições do tipo “espinha de peixe” perpendiculares à direção de crescimento do cristal. Em relação à cor, se apresenta em tonalidade amarelo-pálido, com presença de regiões mais escuras nas quais há resquícios de materiais argilosos, bem como presença de óxidos/hidróxidos.

Nota: Dimensões: 1,7x0,1x0,05cm / Peso: 0,19g.

Fonte: Arquivo do autor.

Figura 23. Amostra #A2-05



Nota: Dimensões: 0,7x0,5x0,4cm / Peso: 1,09g.

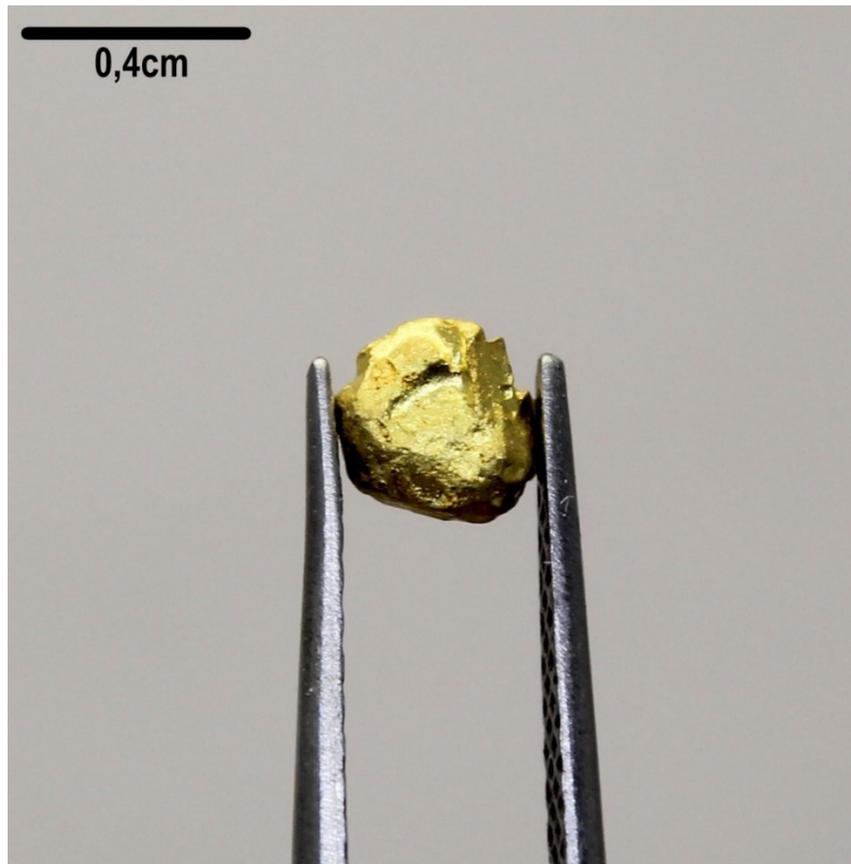
A) Foto frontal; B) Foto em 180° em relação à posição frontal.

Fonte: Arquivo do autor.

Descrição da amostra #A2-05

Amostra cristalizada em geometria trapezoedra com faces bastante deformadas. A superfície do cristal apresenta-se moderadamente rugosa na parte superior e lisa na parte inferior (Figura 15A). Na figura 15B observa-se o inverso, parte superior lisa e inferior rugosa. Feições proto-esqueletais são presentes. Em relação à cor, nota-se uma interessante diferenciação entre amarelo-dourado e amarelo-pálido em ambas as figuras do topo a base, respectivamente.

Figura 24. Amostra #A2-06



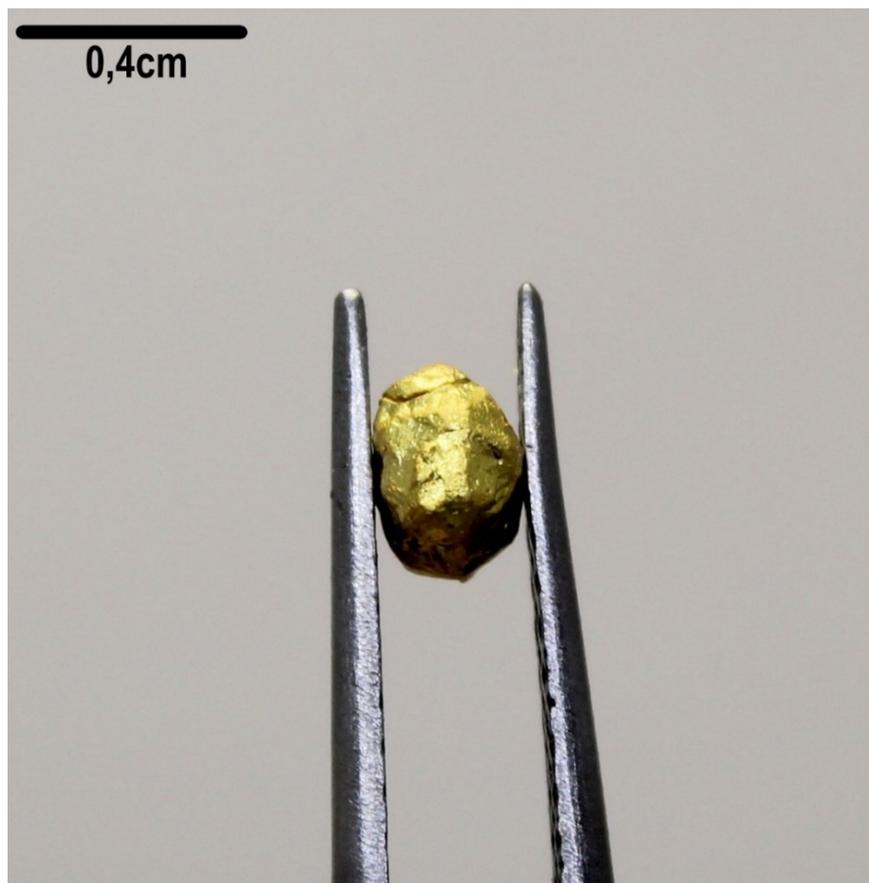
Descrição da amostra #A2-06

Amostra de ouro nativo moderadamente arredondada e de esfericidade alta. Coloração homogênea amarelo-pálido. Nota-se faces preservadas, possivelmente em geometria tetraexaédrica, porém intensamente deformadas. A superfície possui uma textura, homogênea, lisa. Observa-se feições geométricas que remetem superfícies de contato com outros minerais e nesta região a textura é ainda mais lisa que ao seu redor.

Nota: Dimensões: 0,4x0,3x0,3cm / Peso: 0,51g.

Fonte: Arquivo do autor.

Figura 25. Amostra #A2-07



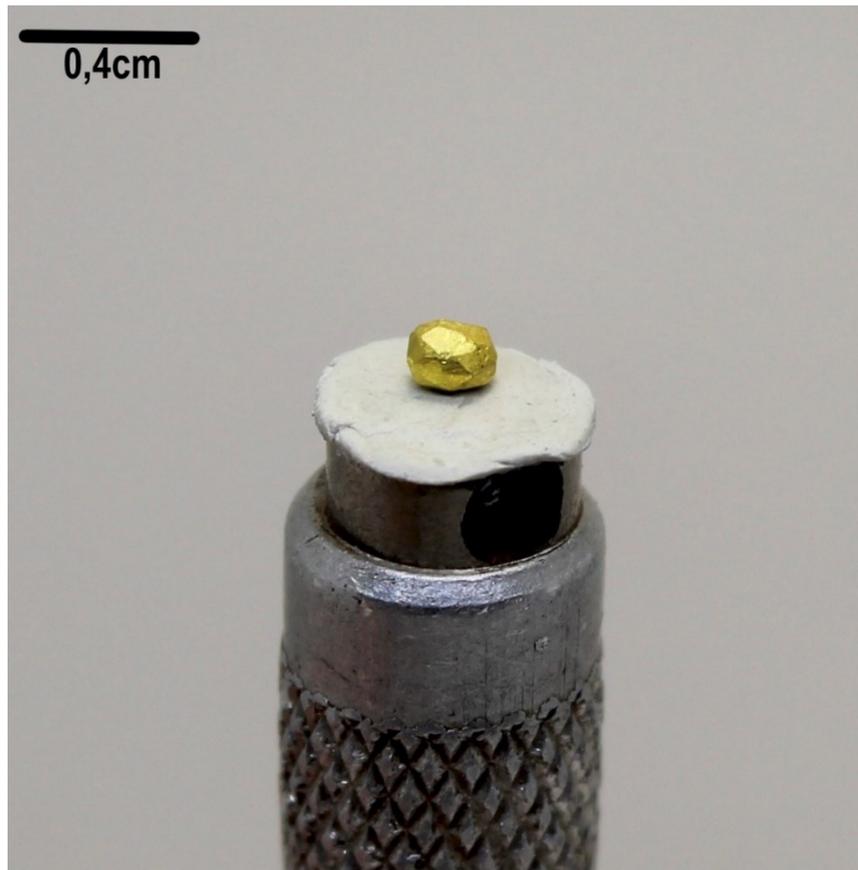
Descrição da amostra #A2-07

Amostra de ouro nativo arredondado e de esfericidade alta. Coloração amarelo-pálido. A superfície da amostra encontra-se levemente esburacada com a presença de sulcos e superfícies vazias retilíneas, decorrentes de corrosão. Nota-se faces preservadas, porém intensamente deformadas. A superfície possui uma textura, homogênea, predominantemente lisa.

Nota: Dimensões: 0,4x0,3x0,25cm / Peso: 0,30g.

Fonte: Arquivo do autor.

Figura 26. Amostra #A2-08



Descrição da amostra #A2-08

Amostra cristalizada em geometria trapezoédrica, possivelmente $\{113\}$. As fácies se caracterizam por trapézios, com superfícies lisas. Tendo em vista o tamanho da amostra, não foi possível confirmar as 24 fácies previstas para tal sólido, entretanto, a quantidade de fácies contadas supera o previsto para dodecaedros, e, somado a ausência de fácies triangulares, pode-se inferir que sua cristalização faz parte dos sólidos trapezoédricos.

Nota: Dimensões: 0,2x0,2x0,15cm / Peso: 0,07g.

Fonte: Arquivo do autor.

Figura 27. Amostra #A2-09



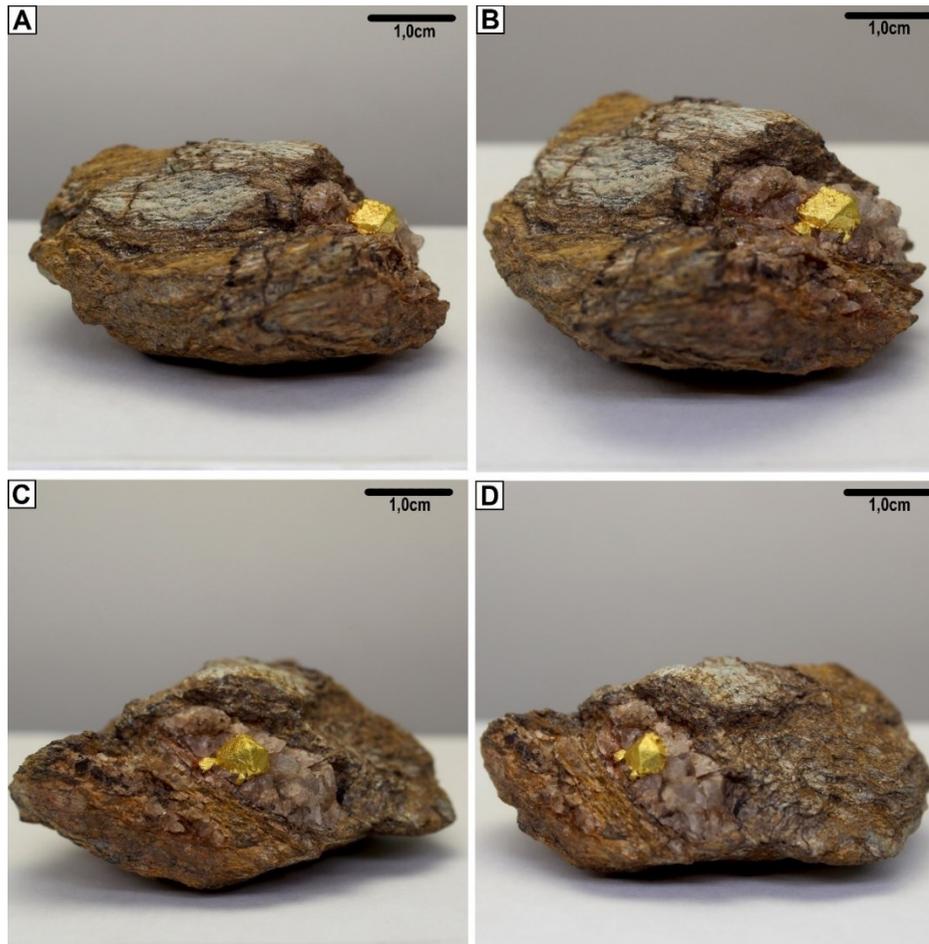
Descrição da amostra #A2-09

Amostra de veio de quartzo com 12 pontos de mineralizações auríferas. Os ouros nativos na amostra se encontram parcialmente cristalizados, com apenas algumas faces visíveis. Algumas geometrias possivelmente rombododecaédricas foram observadas. A coloração dos ouros é homogênea amarelo-pálido. Para além das ocorrências descritas, a amostra possui diversos espaços vazios com geometrias de contato definidas, indicando a presença de outros pontos de ouro que se desprenderam (box works). Também nota-se a presença de pequenas drusas de quartzo prismáticos em micro cavidades da amostra.

Nota: Dimensões: 4,3x2,5x2,2cm.

Fonte: Arquivo do autor.

Figura 28. Amostra #A2-10



Descrição da amostra #A2-10

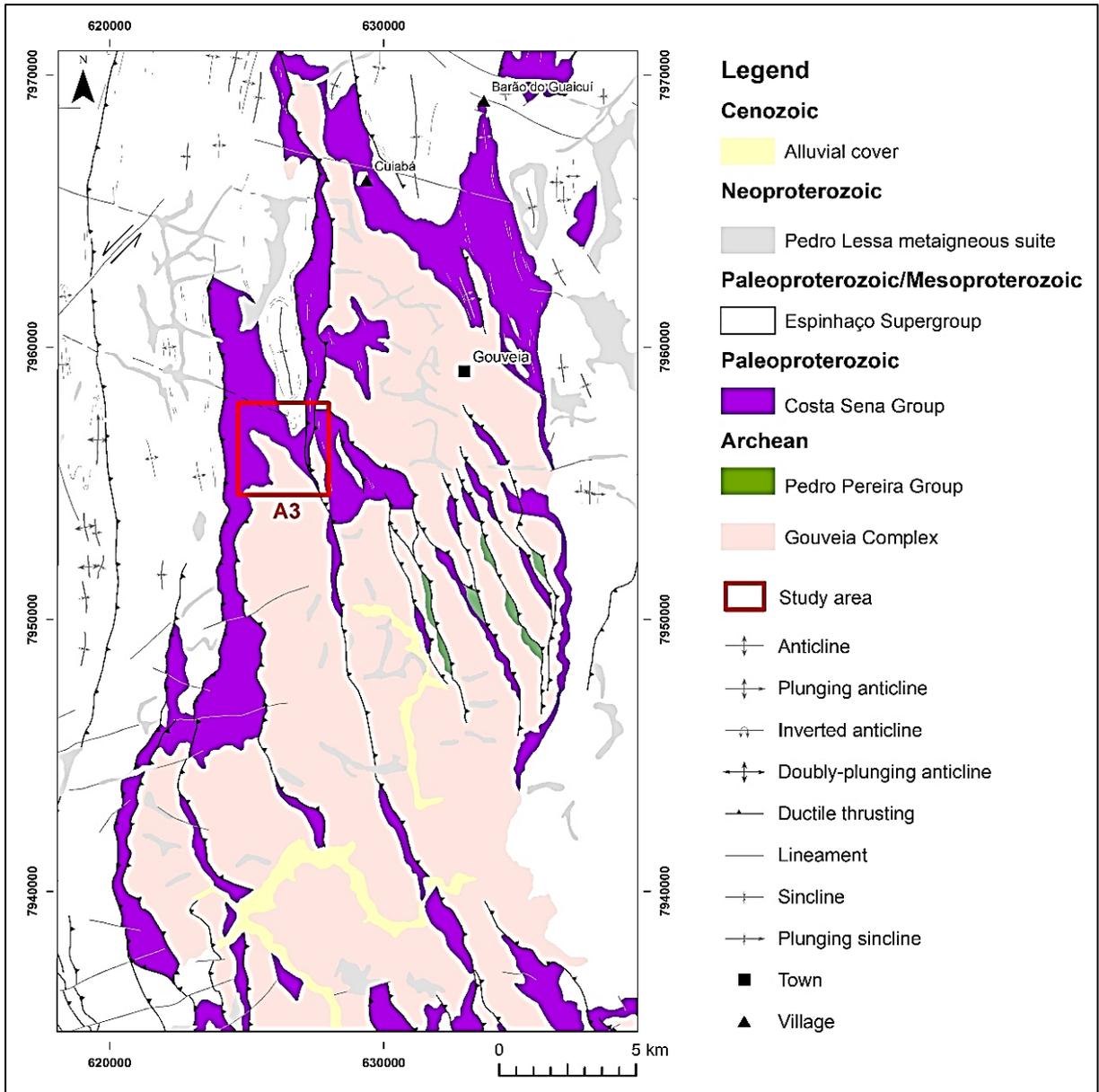
Amostra de muscovita quartzo xisto ferruginoso com veio sigmoidal de quartzo com cristal centimétrico de ouro. A rocha encontra-se foliada, com minerais filossilicatos estirados e veios de quartzo sigmoidal, indicando forte influência estrutural. Observa-se níveis paralelos de hematita especularita e cristais euédricos de magnetita milimétricos. O cristal de ouro possui geometria tetrahexaédrica, possivelmente $\{012\}$. Nota-se estrias de crescimento em todas as faces do sólido. Em relação à coloração do cristal de ouro, observa-se homogênea e amarelo-dourado.

Nota: Dimensões: 5,5x4,2x2,4cm.

A), B), C) e D) Amostra em diversas posições sendo girada em sentido horário.

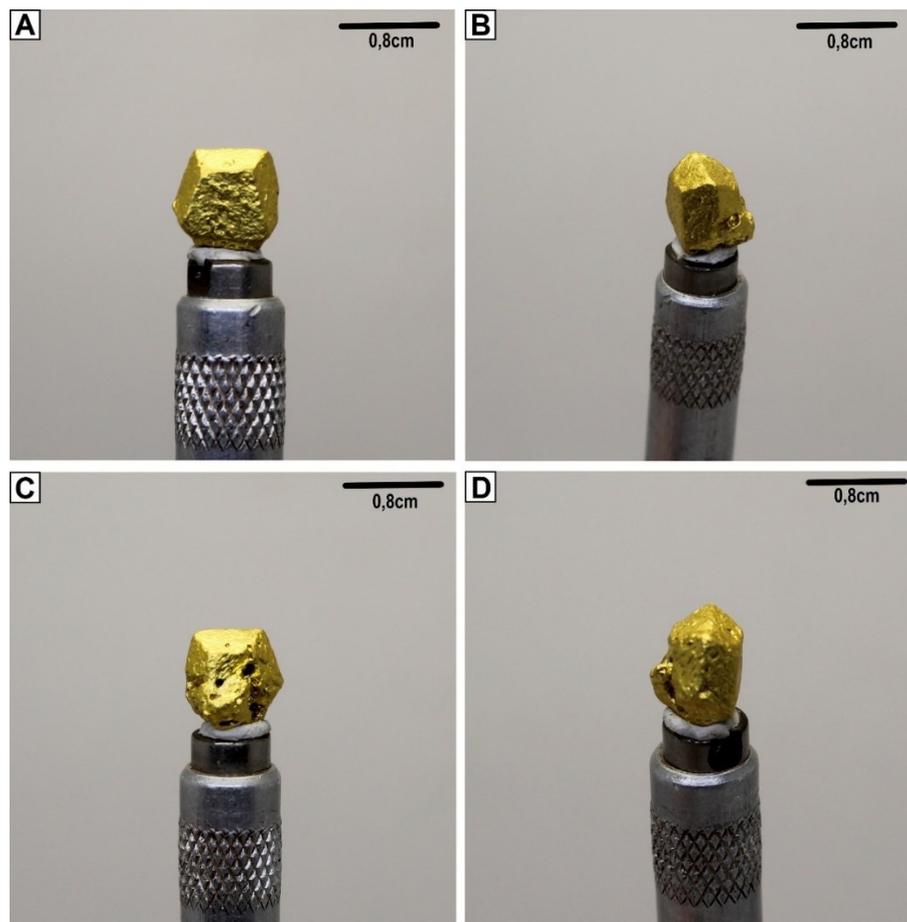
Fonte: Arquivo do autor.

Figura 29. Mapa geológico esquemático da Serra Meridional do Espinhaço e regiões adjacentes, com detalhe para a Área 3, de onde as amostras descritas a seguir foram prospectadas



Fonte: Modificado de (Freimann, 2022, p. 62).

Figura 30. Amostra #A3-01



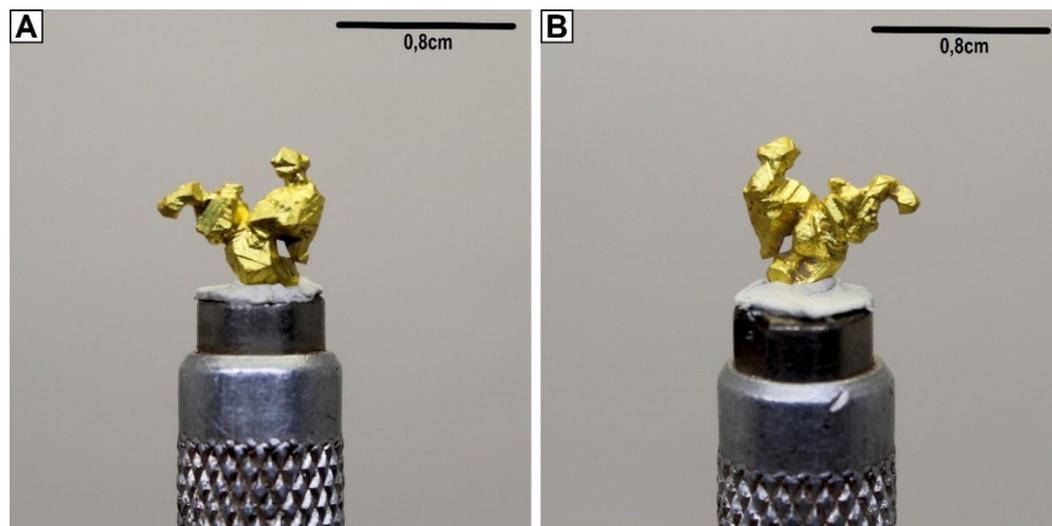
Descrição da amostra #A3-01

Cristal de ouro apresentando oito faces individualizáveis. O cristal se apresenta em geometria incomum, imaginando-se uma deformação na geometria rombododecaedral. A superfície da amostra é predominantemente rugosa e moderadamente esburacada, sendo os espaços vazios superfícies arredondadas. A coloração da amostra é homogênea amarelo-dourado.

Nota: Dimensões: 0,8x0,8x0,7cm / Peso: 3,39g.

A), B), C) e D) Amostra em diversas posições sendo girada em sentido horário.

Fonte: Arquivo do autor.

Figura 31. Amostra #A3-02**Descrição da amostra #A3-02**

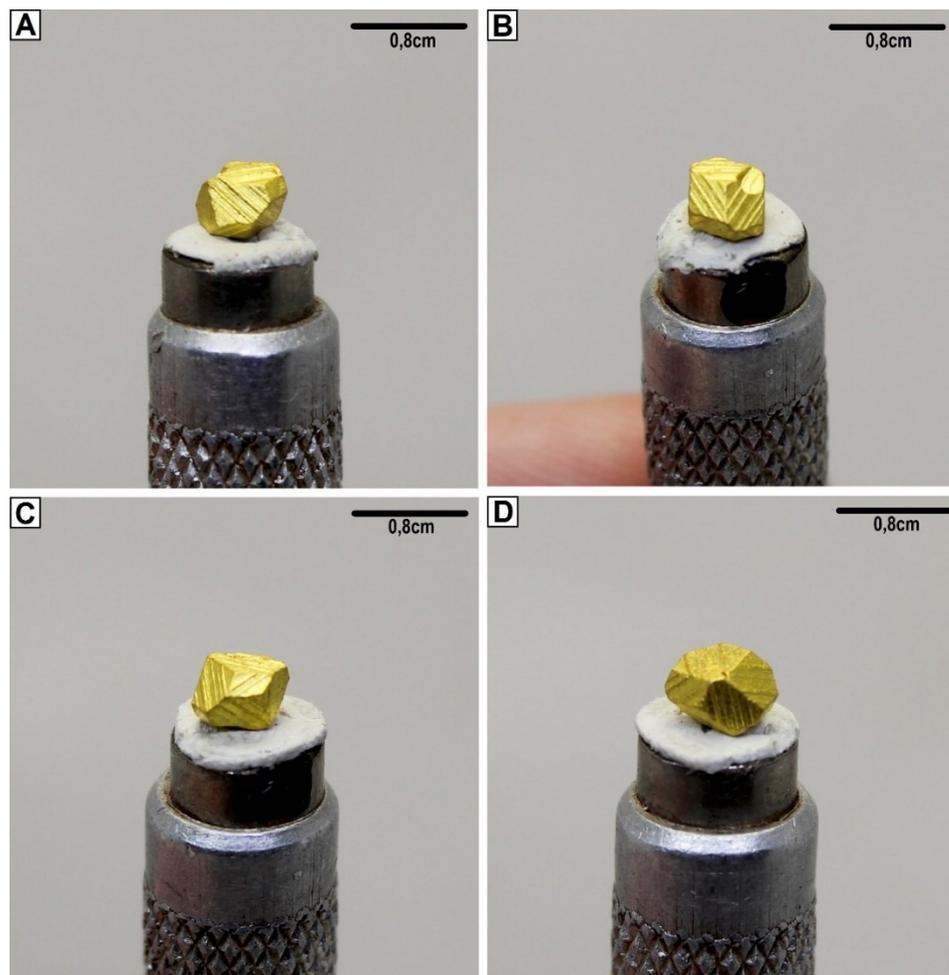
Amostra de cristais de ouro evidenciando interessante padrão de intercrescimento/coalescência entre os cristais, os quais com geometrias rombododecaedrais. Observa-se frequentes marcas de crescimento trigonais, além de estrias de crescimento em praticamente todas as faces dos cristais. A coloração da amostra é homogênea amarelo-pálido.

Nota: Dimensões: 0,7x0,6x0,2cm / Peso: 0,57g.

A) Foto frontal; B) Foto em 180° em relação à posição frontal.

Fonte: Arquivo do autor.

Figura 32. Amostra #A3-03



Descrição da amostra #A3-03

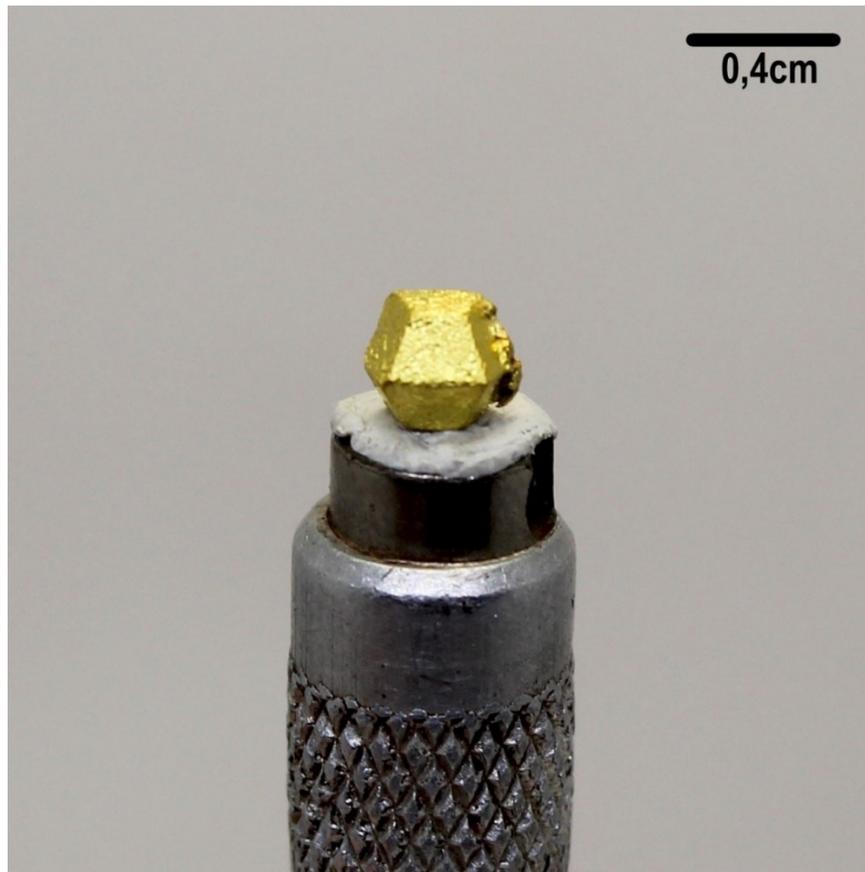
Amostra de cristal de ouro em geometria rombododecaédrica com 12 faces trapezoédricas individualizáveis. As faces do sólido teórico (rombododecaedro) deveriam ser losangos, entretanto neste sólido alternam-se entre losangos, trapézios e pentágonos irregulares, devido à distorção sofrida durante a fase de crescimento do cristal. Nota-se, também, a presença de numerosas e bastante visíveis estrias de crescimento em todas as faces do sólido. A coloração da amostra é homogênea amarelo-dourado

Nota: Dimensões: 0,3x0,3x0,2cm / Peso: 0,35g.

A), B), C) e D) Amostra em diversas posições sendo girada em sentido horário.

Fonte: Arquivo do autor.

Figura 33. Amostra #A3-04



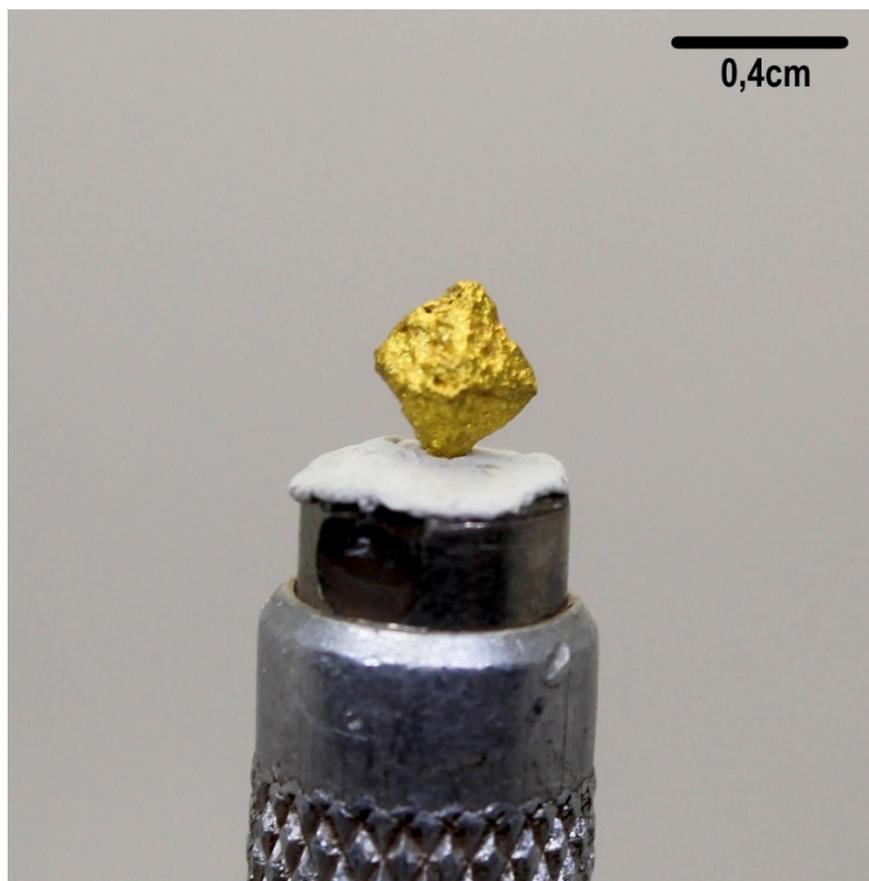
Descrição da amostra #A3-04

Cristal de ouro apresentando oito faces individualizáveis. O cristal se apresenta em geometria incomum, imagine-se uma deformação na geometria rombododecaedral. A superfície da amostra é predominantemente lisa. Observa-se alguns indícios de deformação mecânica na amostra. A coloração da amostra é homogênea amarelo-pálido.

Nota: Dimensões: 0,4x0,3x0,3cm / Peso: 0,51g.

Fonte: Arquivo do autor.

Figura 34. Amostra #A3-05



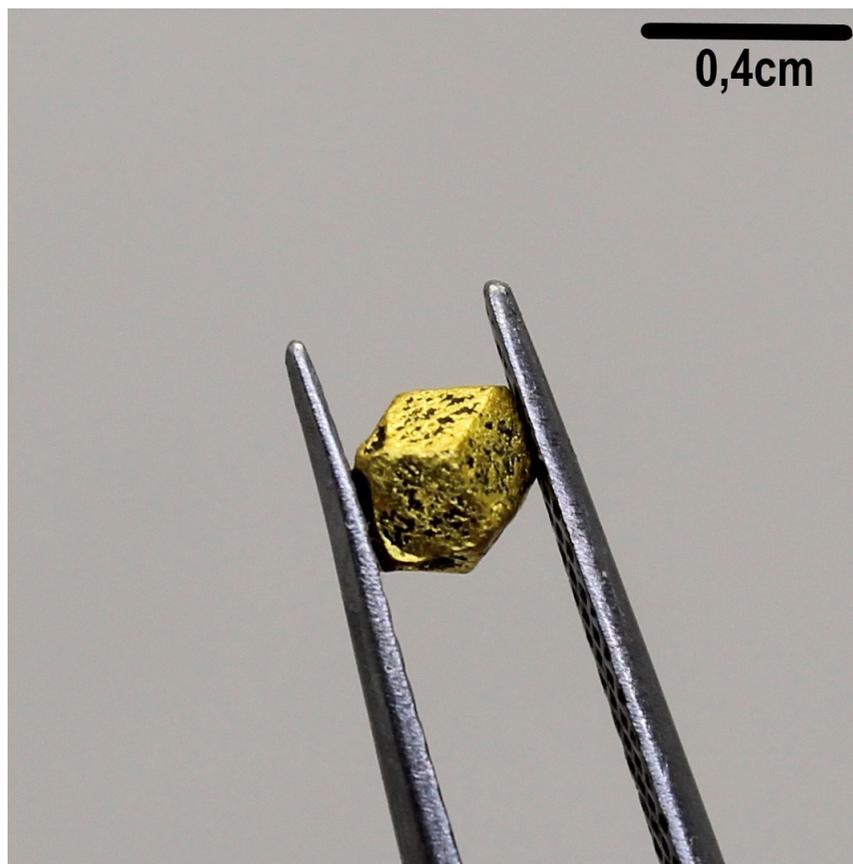
Descrição da amostra #A3-05

Amostra de cristal de ouro em geometria octaédrica com 8 faces triangulares individualizáveis. A amostra possui superfície rugosa com presença de feições proto-esqueletais. A coloração da amostra é homogênea amarelo-dourado.

Nota: Dimensões: 0,4x0,3x0,3cm / Peso: 0,31g.

Fonte: Arquivo do autor.

Figura 35. Amostra #A3-06



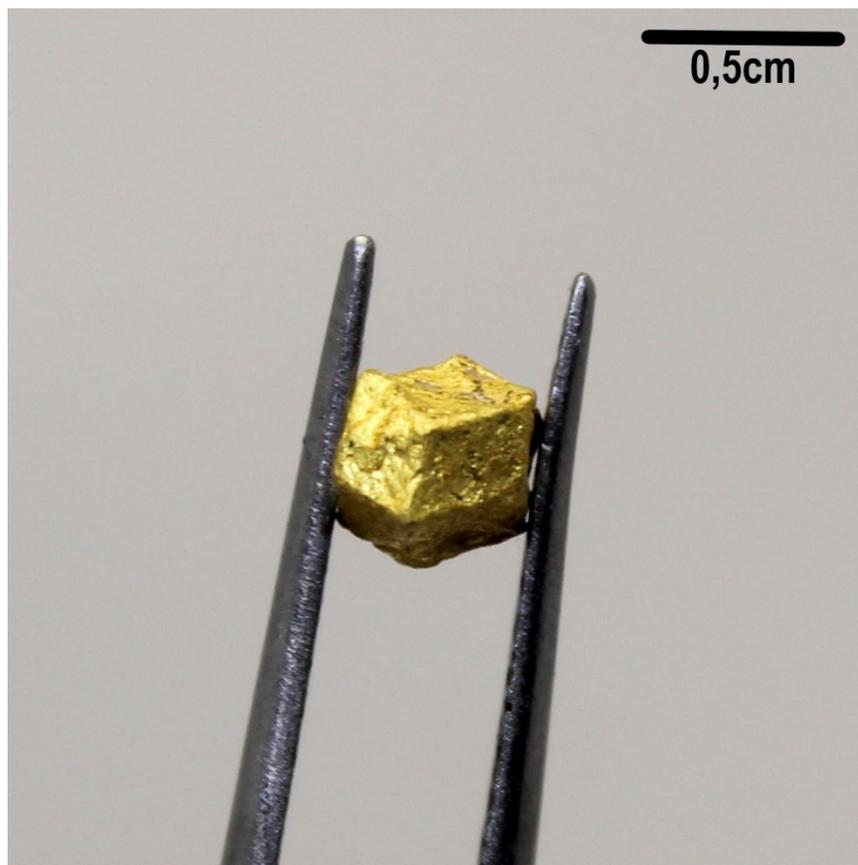
Descrição da amostra #A3-06

Amostra de cristal de ouro em geometria rombododecaédrica com 12 faces losangulares individualizáveis. As faces da amostra são praticamente todos losangos perfeitos, com pouca ou nenhuma distorção sofrida durante a fase de crescimento do cristal. Nota-se, também, a presença de estrias de crescimento algumas faces do sólido. Feições trigonais de crescimento também são presentes. A superfície do cristal é moderadamente rugosa, permitindo o preenchimento de óxidos/hidróxidos nas microcavidades. A coloração da amostra é amarelo-dourado e mais escura nas regiões dos óxidos/hidróxidos.

Nota: Dimensões: 0,4x0,3x0,3cm / Peso: 0,50g.

Fonte: Arquivo do autor.

Figura 36. Amostra #A3-07



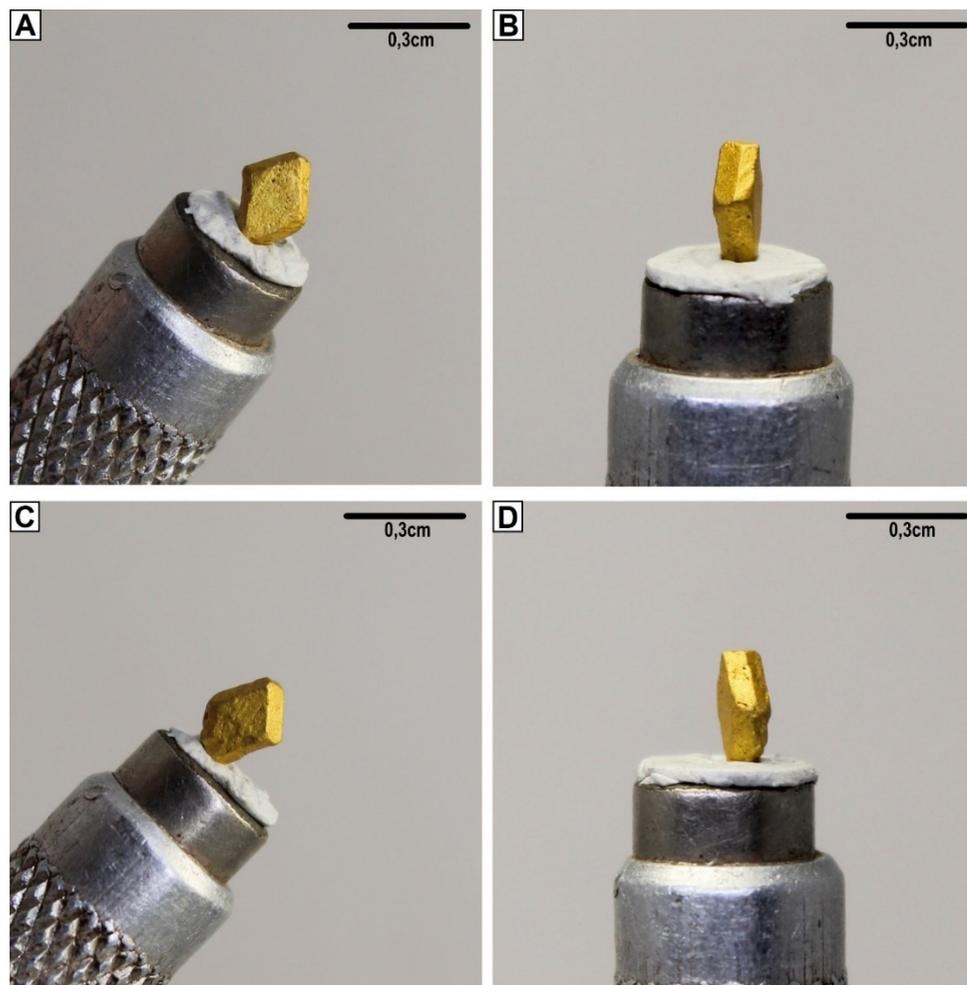
Descrição da amostra #A3-07

Amostra de cristal de ouro em geometria rombododecaédrica com 12 faces losangulares individualizáveis. As faces da amostra são praticamente todos losangos perfeitos, com pouca ou nenhuma distorção sofrida durante a fase de crescimento do cristal. As arestas do sólido são bastante proeminentes, indícios de uma cristalização quase perfeita. Nota-se, também, a presença de estrias de crescimento algumas faces do sólido. A superfície do cristal é predominantemente lisa e a coloração da amostra é homogênea amarelo-dourado.

Nota: Dimensões: 0,5x0,4x0,3cm / Peso: 0,53g.

Fonte: Arquivo do autor.

Figura 37. Amostra #A3-08



Descrição da amostra #A3-08

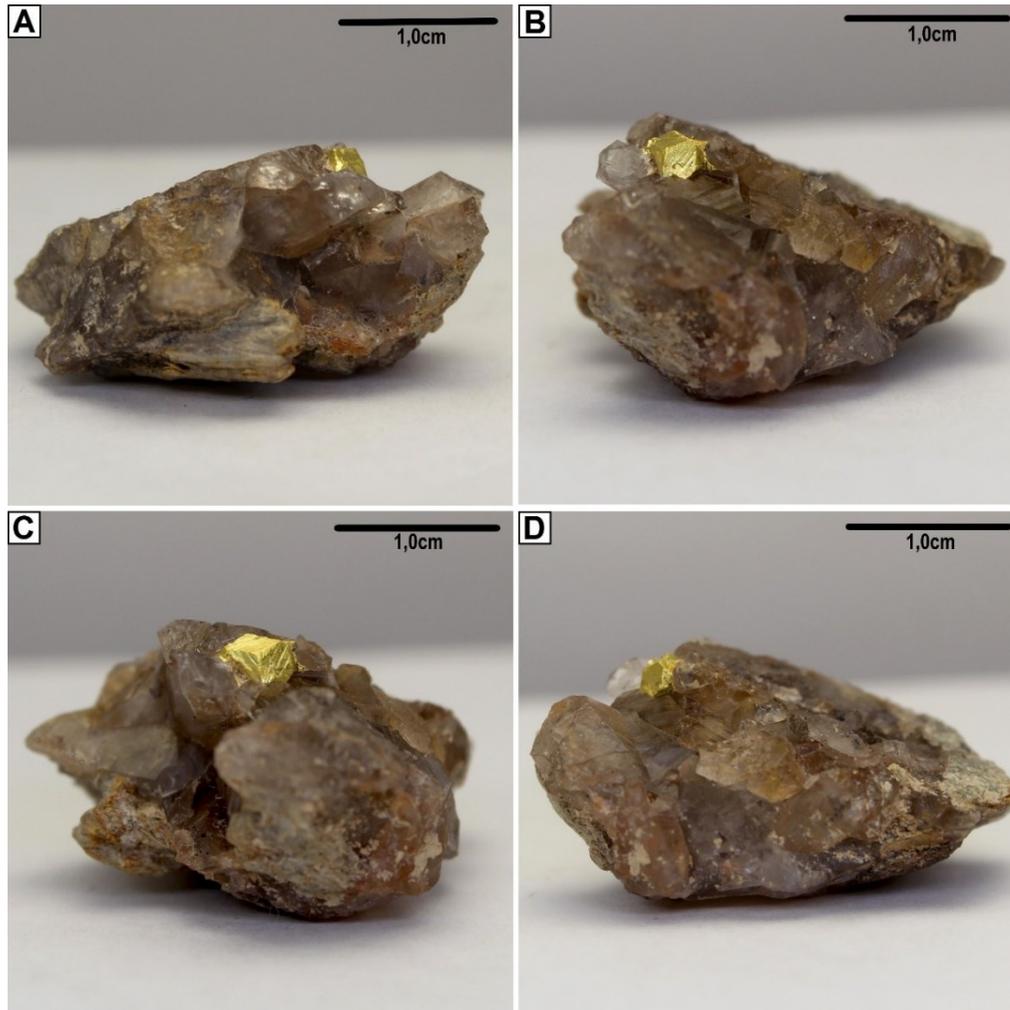
Cristal de ouro apresentando dez faces individualizáveis. O cristal se apresenta em geometria bastante incomum, imagina-se uma distorção em relação aos eixos de simetria. A superfície da amostra é predominantemente lisa e as arestas são bastante proeminentes. A coloração da amostra é homogênea amarelo-dourado.

Nota: Dimensões: 0,3x0,25x0,1cm / Peso: 0,16g.

A), B), C) e D) Amostra em diversas posições sendo girada em sentido horário.

Fonte: Arquivo do autor.

Figura 38. Amostra #A3-09



Descrição da amostra #A3-09

Amostra de cristal euédrico de ouro em matriz de quartzo. A matriz trata-se de uma pequena drusa com vários cristais prismáticos de quartzo. O cristal de ouro se encontra em geometria rombododecaédrica com faces losangulares típicas. Observa-se a presença de numerosas e bastante visíveis estrias de crescimento em todas as faces externas da matriz. Nota-se também feições de crescimento escalonadas e trigonais, arestas proeminentes e afiadas. A coloração do cristal de ouro é homogênea amarelo-pálido.

Nota: Dimensões: 3,0x2,4x1,4cm.

A), B), C) e D) Amostra em diversas posições sendo girada em sentido horário.

Fonte: Arquivo do autor.

Figura 39. Amostra #A3-10



Descrição da amostra #A3-10

Amostra de cristal subédrico de ouro em matriz de quartzo. A matriz trata-se de um veio com poucos cristais prismáticos. Nota-se a presença de elementos bióticos (raízes de plantas) na matriz de quartzo. O cristal de ouro se encontra com algumas faces preservadas, possivelmente em geometria rombododecaédrica. Observa-se a presença de estrias de crescimento em algumas faces externas da matriz. A coloração do cristal de ouro é homogênea amarelo-dourado.

Nota: Dimensões: 2,0x1,7x1,3cm.

Fonte: Arquivo do autor.

5.1 Discussões mineralógicas

A partir dos dados obtidos em campo e das amostras descritas, observa-se nas três áreas prospectadas uma grande diversidade de morfologias de amostras de ouro nativo. Na Área 1, predominam amostras de ouro nativo tipicamente de ambientes eluvio-coluvionares, com morfologias anédricas, superfícies esburacadas, texturas “retorcidas” e em alguns casos hábitos arborescentes. Na Área 2 observa-se, peculiarmente, amostras em hábitos de fios e chapas alongados, além de cristais em geometrias típicas da classe hexoctaédrica do sistema isométrico, algumas bastantes distorcidas e/ou deformadas. Segue uma breve discussão sobre a mineralogia das amostras prospectadas e descritas. Já a Área 3 se caracteriza por produzir, quase que exclusivamente, cristais euédricos de ouro nativo, com geometrias típicas da classe hexoctaédrica do sistema isométrico, sendo a forma mais comum os rombododecaedros, mas também combinações geométricas e distorções complexas.

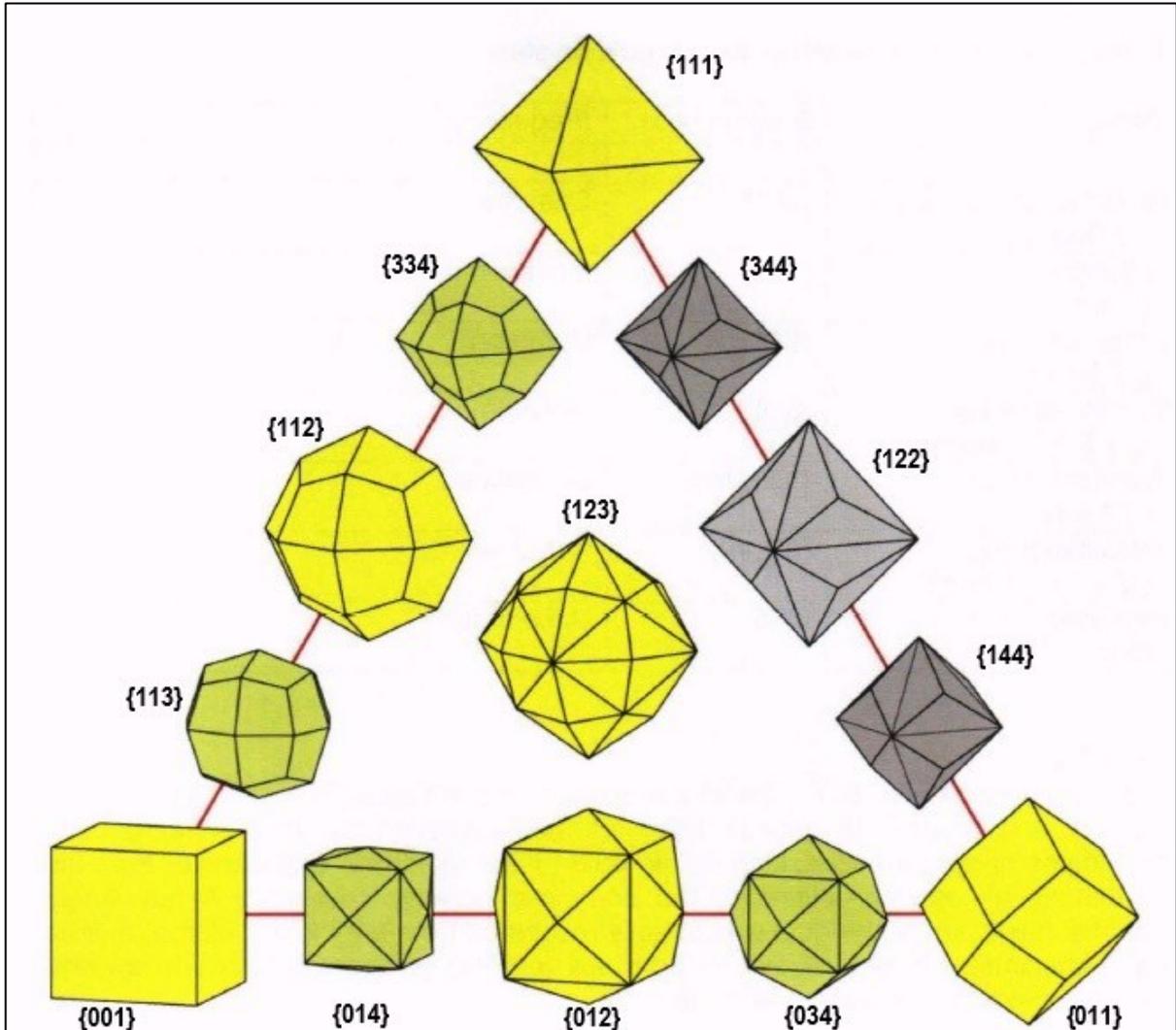
O ouro em cristais bem formados é extremamente raro em comparação com a quantidade de metal produzida. De acordo com Dana e Ford (1922), ouro se cristaliza na classe hexoctaédrica do sistema isométrico e suas formas mais comuns, quando cristalizado são o octaedro $\{111\}$, dodecaedro rômico $\{011\}$, cubo $\{001\}$ e os trapezoedros $\{112\}$ e $\{113\}$. O tetrahexaedro $\{012\}$ e o hexoctaedro $\{123\}$ também são reportados, porém menos frequentes. O curador do Museu de Mineralogia de Harvard, Francis, C.A. (2004) concluiu, durante o período de 1977-2011, após extensos estudos acerca da coleção do Museu (acervo com mais de 1200 amostras de ouro), que as cinco formas mais comuns para o ouro cristal são o octaedro $\{111\}$, dodecaedro rômico $\{011\}$, cubo $\{001\}$, o trapezoedro $\{113\}$ e o hexoctaedro $\{1.10.18\}$.

Tabela 2. Formas do sistema cúbico, índice de Miller e frequência relativa

Formas do sistema cúbico e sua frequência em cristais de ouro		
Formas	Índices de Miller	Probabilidade
Hexaedro (seis faces)	$\{001\}$	Provável
Octaedro (oito faces)	$\{111\}$	Mais provável
Dodecaedro (12 faces)	$\{011\}$	Provável
Tetrahexaedro (24 faces)	$\{0kl\}$	Menos provável
Trapezoedro (24 faces)	$\{hhl\}$, $h < l$	Menos provável
Tris octaedro (24 faces)	$\{hll\}$, $h < l$	Não observado
Hexoctaedro (48 faces)	$\{hkl\}$	Menos provável

Fonte: Modificado de Francis (2004, p. 10).

Figura 40. Diagrama triangular com as relações geométricas entre os sete tipos distintos de formas do sistema cristalográfico isométrico



Nota: Os vértices são definidos por formas e índices de Miller fixos. No topo está o octaedro, $\{111\}$. O cubo, $\{001\}$, está no canto inferior esquerdo e o dodecaedro, $\{011\}$, está no canto inferior direito. As bordas e o interior representam geometrias com índices e formas variáveis. Trapezoedros situam-se ao longo da borda esquerda entre o octaedro e o cubo. Trisoedros situam-se ao longo da borda direita entre o octaedro e o dodecaedro. Tetrahexaedro situam-se ao longo da borda inferior entre o cubo e o dodecaedro. Hexoedro ocupa o interior da figura. Formas de cor amarelas e beges são observadas em cristais de ouro; formas cinzentas (somente trisoedros) não foram relatadas em cristais de ouro.

Fonte: Modificado de Francis (2010, p. 9).

De acordo com Dana e Ford (1922), a cristalização ideal deve produzir formas de simetria geométrica exata, sendo os ângulos não apenas iguais, mas também as faces homólogas dos cristais e as dimensões nas direções dos eixos cristalográficos. Essa simetria, em realidade, é extremamente incomum. Os cristais são geralmente distorcidos e muitas vezes as formas resultantes são tão distantes do ideal que uma familiaridade ímpar com as possíveis irregularidades é necessária para desvendar suas complexidades. Os autores, ainda, subdividem as distorções em irregulares e simétricas. Os irregulares ocorrem quando os cristais apresentam

alguma modificação na forma ideal, porém sem desvio das leis de simetria cristalográfica. Este tipo de distorção cristalográfica foi observado em praticamente todos os cristais euédricos descritos. Apesar de claramente apresentarem geometrias rombododecaédricas, as faces não possuíam exatamente as mesmas dimensões, demonstrando algum encurtamento ou alongamento em determinado eixo de simetria cristalográfico. Já a distorção simétrica gera à forma distorcida a simetria de um grupo ou sistema diferente daquele ao qual realmente pertence. Os exemplos mais complexos de distorção simétrica ocorrem nos minerais do sistema isométrico. Um alongamento na direção de um dos eixos cúbicos pode gerar a aparência da simetria tetragonal, ou em na direção de dois eixos cúbicos a aparência da simetria ortorrômbica; enquanto na direção de um eixo octaédrico, o seu encurtamento ou alongamento originará à forma uma simetria romboedral.

A amostra #A3-08 (Figura 37) possui interessante geometria ortorrômbica, tal fato pode ser explicado a partir das distorções simétricas. Também, poderia se tratar de uma pseudomorfose, entretanto entende-se menos provável tendo em vista a mineralogia acessória padrão da mineralização em questão. Ademais, irregularidades ainda maiores se devem ao fato de que, em muitos casos, os cristais estão ligados a outros cristais ou a alguma superfície de rocha e, conseqüentemente, são apenas parcialmente desenvolvidos.

Além das distorções cristalográficas, observa-se em alguns minerais metálicos formas cristalinas complexas que resultam do crescimento de cristais parciais paralelos na direção dos eixos cristalográficos (Dana; Ford, 1922). Estes podem ser alongados em fios, formar grupos reticulados ou arborescentes, ou ser achatados em folhas. Repetitivas geminações em (111) é uma característica comum destas geometrias, (Francis, 2004). Quando associadas à uma ramificação em 60° alternada resulta em formas dendríticas e reticuladas, estas, também estão associadas à uma rápida cristalização, segundo Taber (1948). Exemplos destas complexas cristalizações são as amostras #A2-01 (Figura 19); #A2-02 (Figura 20); #A2-03 (Figura 21); #A2-04 (Figura 22).

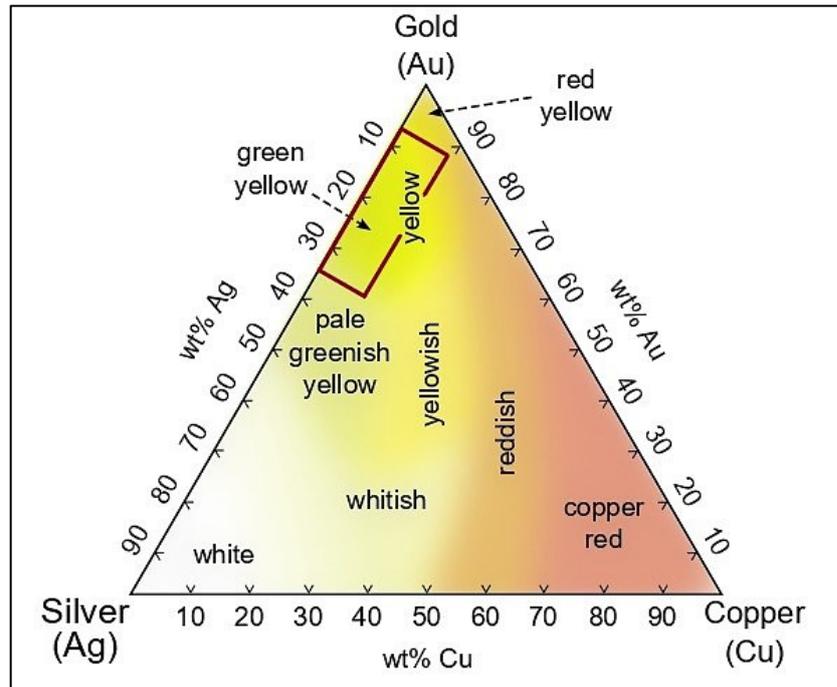
Uma feição notável em algumas amostras é a estria de crescimento – *e.g.* amostras #A2-10 (Figura 28); #A3-02 (Figura 31); #A3-03 (Figura 32); #A3-06 (Figura 35); #A3-07 (Figura 36); #A3-09 (Figura 38). Presente em diversas amostras descritas, esta imperfeição na superfície cristalina é explicada por Dana e Ford (1922) como pequenas cristas em uma superfície estriada que são delimitadas por planos estreitos e retilíneos em vales. Esses planos em crista correspondem em posição a diferentes faces do cristal. Essa combinação de diferentes planos na formação de uma superfície é denominada combinação oscilatória. Por este meio, as superfícies de um cristal são marcadas em linhas paralelas, com uma sucessão de planos

estreitos que se encontram em determinado ângulo e constituem as referidas estrias de crescimento.

Outra feição observada em algumas amostras são as estruturas cavernosas rebaixadas que ocorrem em algumas faces, tipicamente dos octaedros, denominada morfologia esquelética – *e.g.* #A2-05 (Figura 23) e #A3-05 (Figura 34). Em concordância com Taber (1948), essa característica se dá pelo rápido crescimento e, portanto, tempo insuficiente para as moléculas se difundirem no interior dos cristais. Ainda segundo este autor, os cristais euédricos de ouro tendem a se formar em cavidades. Muitos minerais têm forte tendência a desenvolver a forma cristalina e, ao crescer, abrem espaço para si mesmos, deslocando ou substituindo a maioria dos outros minerais adjacentes. O ouro é tão macio e maleável que tem pouca tendência a deslocar outros minerais, e estes podem facilmente exercer pressão suficiente para destruir os cristais de ouro. Das amostras descritas, observa-se cristais de ouro em matriz de quartzo formadas em cavidades nas amostras #A2-09 (Figura 27); #A3-09 (Figura 38); #A3-10 (Figura 39).

Para além das características cristalográficas e morfológicas das amostras, outro notável fato observado nas amostras é a diferença de coloração entre os ouros nativos e em alguns casos na própria amostra – *e.g.* #A2-05 (Figura 23). Segundo Saeger e Rodies (1977), ouro e cobre são os únicos metais que não são brancos ou cinzas em suas formas nativas e coloração amarela do ouro resulta de uma queda significativa na curva de refletividade dentro do campo mais energético do espectro da luz visível (verde e azul). Sabe-se que o ouro nativo sempre está presente na natureza em uma liga metálica e os elementos mais comuns que o acompanham são a prata e o cobre. Com base neste fato, Hough, Butt e Fischer-Bühner (2009) propõem um diagrama ternário entre Au-Cu-Ag em termos da variação da coloração da liga com base na porcentagem destes elementos. Com a adição de Cu, a queda na refletividade é deslocada ainda mais para a extremidade de baixa energia do espectro de luz visível, produzindo cores amarelas mais profundas e uma tonalidade rosa a avermelhada se um elevado teor de Cu. Em contraste, se Ag estiver presente, a queda na curva de refletividade é deslocada para a extremidade de alta energia do espectro de luz visível, dando cores amarelo pálido, amarelo esverdeado, acinzentado ou esbranquiçado, dependendo do conteúdo de Ag (Figura 41).

Figura 41. Variação colorimétrica no sistema Au-Ag-Cu



Nota: As cores mostradas são indicativas das cores reais. O retângulo em vermelho representa a área possível para as amostras descritas com base em suas variações colorimétricas e teor estimado de ouro.

Fonte: Modificado de Arslan e Dogan (2019).

6 CONCLUSÃO

A prospecção artesanal de ouro em pequena escala é realidade no Brasil e em diversos países. Esta atividade representa subsistência para milhões de pessoas ao redor do mundo e ao mesmo tempo contribui para diversos impactos socioambientais negativos. É urgente o aprofundamento da contribuição científica nesta polêmica temática em prol da conscientização da população, apresentação de novas técnicas, supressão de técnicas danosas e formalização da atividade.

Nesse sentido, entende-se que a prospecção geofísica de ocorrências de ouro nativo realizadas pelo método de eletromagnetismo indutivo no domínio do tempo é eficaz, uma vez que foi possível detectar diversas amostras de ouro em subsuperfície. A fácil operação dos equipamentos e a rápida resposta associada ao conhecimento geológico pode contribuir para ampliação do método, fornecendo subsídios para investimentos em pesquisa mineral nesta e em outras regiões.

Da perspectiva ambiental, as atividades tradicionais minerárias artesanais e em pequena escala para o ouro no Brasil claramente estão correlacionadas à múltiplos danos ambientais e sociais. Entende-se que os detectores metálicos de alta resolução se inserem como alternativa sustentável, em contrapartida a alguns métodos arcaicos de garimpagem, tendo em vista ter se provado eficiente, de relativo baixo custo aquisicional e baixo impacto ambiental e esta técnica prospectiva pode ser facilmente aplicada em outras regiões auríferas.

Com base nos dados obtidos em campo, associados aos dados estatísticos calculados para os coeficientes amostrais e populacionais, nota-se uma relação linear positiva entre peso das amostras de ouro e sua profundidade. Pepitas maiores tendem a se encontrarem em uma profundidade maior. Entende-se que a mineralização aurífera de toda região estuda é hipogênica, sendo o ouro livre cristalizado nos veios de quartzos presentes nas rochas encaixantes. No caso da Área 1 sua concentração no atual nível regolítico se deu pelo intemperismo preferencial das rochas graníticas com posterior desagregação e acomodação dos veios de quartzo aurífero ao relevo local. Nas Áreas 2 e 3, observa-se um comportamento semelhante para sua concentração nos níveis regolíticos, entretanto, as rochas matrizes dos veios auríferos são diferentes, o que modifica o grau de intemperismo e conseqüentemente a espessura dos níveis colúvio-eluvionares.

Do ponto de vista regional, conclui-se que a mineralização aurífera da região possui forte controle estrutural, nenhum controle estratigráfico e está associada, via de regra, aos veios de quartzos. O estudo de grãos, pepitas e cristais de ouro tem o potencial de fornecer entendimento sobre a mineralogia e metalogenia destas ocorrências na Serra do Espinhaço Meridional e mais contribuições acadêmicas são necessárias para o melhor entendimento deste tópico na região.

A nível local é notável a importância econômica deste tipo de prospecção. Todavia, um ponto chave na discussão da mineração artesanal de ouro e em pequena escala é a questão de sua legalidade, uma vez que, geralmente esta atividade não cumpre com as obrigações impostas à prática minerária. Assim sendo, sugere-se a organização dos prospectores em cooperativas minerárias devidamente formalizadas junto à Agência Nacional de Mineração, em favor da colaboração entre os mineradores, superficiários e proprietários do direito mineral da área em questão, de modo que os interesses sejam mutuamente profícuos para todas as partes envolvidas.

7 REFERÊNCIAS

ABREU, F. R. *Estudo das Mineralizações Auríferas Filonianas da Região da Cidade de Diamantina/MG*. 1991. 85 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1991.

ALMEIDA, F.F.M. O Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 7, n. 4, p. 349–364, 1977.

ALMEIDA-ABREU, P.A. *A evolução geodinâmica da Serra do Espinhaço Meridional, Minas Gerais, Brasil*. 1993. 150 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade de Freiburg, Freiburg, 1993.

ALMEIDA-ABREU, P.A. O Supergrupo Espinhaço da Serra do Espinhaço Meridional (Minas Gerais): o rifte, a bacia e o orógeno. *Geonomos*, v. 3, n. 1, p. 1–18, 1995.

ARSLAN, H.; DOGAN, A. Surface Tension and Surface Tension Assessment of Ag-Au-Cu Ternary and Sub-Binary Alloy Systems. In: LI, L. *Hysteresis of Composites*. [S. l.]: IntechOpen, 2019. p. 1–25. Disponível em: <https://doi.org/10.5772/intechopen.84701>. Acesso em: 25 abr. 2022.

BRUSCHINI, C. *A Multidisciplinary Analysis of Frequency Domain Metal Detectors for Humanitarian Demining*. 2002. 230 p. Thesis (Doctorate in Applied Sciences) – Faculty of Applied Sciences, Vrije Universiteit Brussel, Brussels, 2002.

BUTT, C.R.M.; HOUGH, R.M.; VERRALL, M. Gold nuggets: the inside story. *Ore and Energy Resource Geology*, v. 4–5, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.oreoa.2020.100009>. Acesso em: 14 abr. 2022.

CABRAL, A.R.; EUGSTER, O.; BRAUNS, M.; LEHMANN, B.; RÖSEL, D.; ZACK, T.; ABREU, F.R.; PERNICKA, E.; BARTH, M. Direct dating of gold by radiogenic helium: Testing the method on gold from Diamantina, Minas Gerais, Brazil. *Geology*, v. 41, n. 2, p. 163–166, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1130/G33751.1>. Acesso em: 27 fev. 2022.

CANDY, B.H. *Constant Current Metal Detector With Driven Transmit Coil*. AU. N° US 2014/0232408 A1. 21 Aug. 2014.

CARVALHO, A.S. *Geologia e gênese das mineralizações de quartzo no Espinhaço Meridional-MG*. 1982. 104 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal de Brasília, Brasília, 1982.

CASTRO, S.M.; ALMEIDA, J.R. Dragagem e conflitos ambientais em portos clássicos e modernos: uma revisão. *Sociedade & Natureza*, v. 24, n. 3, p. 519–533, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1982-45132012000300011>. Acesso em: 27 fev. 2022.

CHAVES, M.L.S.C.; BRANDÃO, P.R.G.; BUHN, B. Monazita em veios de quartzo da Serra do Espinhaço Meridional (MG): mineralogia, idades LA-ICP-MS e implicações geológicas. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 40, n. 4, p. 506–515, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.25249/0375-7536.2010404506515>. Acesso em: 27 fev. 2022.

- CHAVES, M.L.S.C.; KARFUNKEL, J.; HOPPE, A.; HOOVER, D.B. Diamonds from the Espinhaço Range (Minas Gerais, Brazil) and their redistribution through the geologic record. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 14, n. 3, p. 277–289, 2001.
- CHAVES, M.L.S.C.; UHLEIN, A. Dados preliminares sobre geologia e mineralizações do distrito aurífero de Diamantina, MG. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DE MINAS GERAIS, 3., 1985, Belo Horizonte. *Anais...* Belo Horizonte: SBG, 1985. p. 246–275.
- CHEMALE JR., F.; DUSSIN, I.; ALCKIMIN, F.F.; MARTINS, M.S.; QUEIROGA, G.; ARMSTRONG, R.; SANTOS, M.N. Unravelling a Proterozoic basin history through detrital zircon geochronology: the case of the Espinhaço Supergroup, Minas Gerais, Brazil. *Gondwana Research*, v. 22, p. 200–206, 2012.
- CONNOR, M.; SCOTT, D.D. Metal detector use in archaeology: An introduction. *Historical Archaeology*, v. 32, n. 4, p. 76–85, 1998. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/bf03374273>. Acesso em: 4 mar. 2022.
- DANA, Edward Salisbury; FORD, Willaim E. *A Text-Book of Mineralogy: with an extended treatise on crystallography and physical mineralogy*. New York: John Wiley & Sons; London: Chapman & Hall, 1922. 720 p.
- DE-PAULA, V.G.; LAMAS-CORRÊA, R.; TUTUNJI, V.L. Garimpo e mercúrio: impactos ambientais e saúde humana. *Universitas: Ciências da Saúde*, v. 4, n. 1, p. 101–110, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.5102/ucs.v4i1.25>. Acesso em: 4 mar. 2022.
- DESSERTINE, A. From pickaxes to metal detectors: Gold mining mobility and space in Upper Guinea, Guinea Conakry. *The extractive industries and society*, v. 3, n. 2, p. 435–441, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.exis.2016.02.010>. Acesso em: 4 mar. 2022.
- DOSSIN, I.A.; DOSSIN, T.M.; CHARVET, J.; COCHERIE, A.; ROSSI, P. Single-zircon dating by step-wise Pb evaporation of Middle Proterozoic magmatism in the Espinhaço Range, Southeastern São Francisco cráton (Minas Gerais, Brazil). In: SIMPÓSIO SOBRE O CRÁTON DO SÃO FRANCISCO, 2., 1993, Salvador. *Anais...* Salvador: SBG/SGM, 1993. p. 39–42.
- DOSSIN, I.A.; DOSSIN, T.M.; CHAVES, M.L.S.C. Compartimentação estratigráfica do Supergrupo Espinhaço em Minas Gerais – Os grupos Diamantina e Conselheiro Mata. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 20, n. 1-4, p. 178–186, 1990.
- DOSSIN, I.A.; UHLEIN, A.; DOSSIN, T.M. Geologia da Faixa Móvel Espinhaço em sua porção meridional, MG. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 23., 1984, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: SBG, 1984. v. 3. p. 3118–3134.
- DOSSIN, T.M.; CHAVES, M.L.S.C.; DOSSIN, I.A. Mineralizações Auríferas Associadas às Zonas de Cisalhamento Brasileanas do Espinhaço Meridional (Minas Gerais). *Revista de Geologia*, v. 3, p. 19–28, 1990.
- DUSSIN, I.A.; DUSSIN, T.M. Supergrupo Espinhaço: Modelo de evolução geodinâmica. *Geonomos*, v. 3, n. 1, p. 19–26, 1995.
- ESCHWEGE, W.L. von. *Pluto Brasiliensis*. Belo Horizonte: Itatiaia; São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1979. 222 p.

FIGUEIREDO, L. *Boa ventura! A corrida do ouro no Brasil (1697 – 1810)*. Rio de Janeiro: Record, 2012. 387 p. *E-book*.

FOGAÇA, A.C.C.; ALMEIDA-ABREU, P.A. Depósitos de planícies de mares na Formação Sopa-Brumadinho Proterozoico Inferior, Cordilheira do Espinhaço, Minas Gerais, Brasil. *In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE GEOLOGIA*, 5., 1982, Buenos Aires. *Actas...* Buenos Aires: SGN, 1982. p. 373–388.

FOGAÇA, A.C.C.; SCHÖLL, W.U. Estratigrafia e tectônica das rochas arqueanas e proterozoicas da região de Guinda e Gouveia, Minas Gerais. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 33.1984, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: SBG, 1984. p. 2638–2653.

FRANCIS, C.A. Gold Crystals: A Primer. *Rocks & Minerals*, v. 79, n. 1, p. 24–29, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00357529.2004.9925671>.

FRANCIS, C.A. The natural history of gold. *In: KONGSBERG MINERAL SYMPOSIUM*, Kongsberg, Norway: Norwegian Mining Museum, 2010. p. 5–16. Disponível em: <http://www.nags.net/mineralsymposium/2010/2010-Francis.pdf>. Acesso em: 17 abr. 2022.

FREIMANN, M.A. *Significado tectônico das sequências metavulcanossedimentares pré-estaterianas na Serra do Espinhaço Meridional em Minas Gerais e Bahia*. 2022. 142 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2022. 120 p.

FREITAS, M.H.G. *Característica das inclusões fluidas de veios de quartzo da Serra do Pasmor, Diamantina/MG e seu significado na deposição de ouro na Serra do Espinhaço Meridional*. 2019. 113 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2019.

GONÇALVES, C.S. Diamantina: breve relato de sua formação. *Arq.urb.*, n. 8, p. 38–59, 2012. Disponível em: <https://revistaarqurb.com.br/arqurb/article/view/336>. Acesso em: 3 maio 2022.

GOOGLE EARTH PRO 7.3. *Landscapes and Reliefs 43°46'50"W, 18°25'06"S, elevation 1080 m*. 2022. Disponível em: www.google.com/intl/pt-BR_ALL/earth/about/versions/#earth-pro. Acesso em: 1º abr. 2022.

HENTSCHEL, T.; HRUSCHKA, F.; PRIESTER, M. *Global Report on Artisanal & Small-Scale Mining*. London: Minerals Mining and Sustainable Development; International Institute for Environment Development, n. 70, Jan. 2002.

HILSON, G.; MACONACHIE, R. Formalising artisanal and small-scale mining: insights, contestations and clarifications. *Area*, v. 49, n. 4, p. 443–451, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/area.12328>. Acesso em: 11 abr. 2022.

HOFFMANN, C. CHI-square testing of zircon populations from an Archean granite-greenstone terrain, Minas Gerais, Brazil. *Neues Jahrbuch für Mineralogie - Abhandlungen*, v. 140, i. 2, p. 202–220, 1981.

HOFFMANN, C. The Costa Sena Group – an Early Proterozoic supracrustal succession and the evolution of the southern Serra do Espinhaço, Minas Gerais, Brazil. *Zbl. Geol. Paläont.*, v. 3-4, p. 446–458, 1983.

HOUGH, R.M.; BUTT, C.R.M.; FISCHER-BÜHNER, J. The crystallography, metallography and composition of gold. *Elements*, v. 5, n. 5, p. 297–302, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.2113/gselements.5.5.297>. Acesso em: 11 abr. 2022.

IBGE. *IBGE Cidades – Serro/MG*. 2022. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/serro/historico>. Acesso em: 13 mar. 2022.

KIM, J. How to Choose the Level of Significance: A Pedagogical Note. *Munich Personal RePEc*, p. 1–13, 2015. Disponível em: <https://mpira.ub.uni-muenchen.de/66373/>. Acesso em: 13 mar. 2022.

KNAUER, L.G. *Evolução geológica do Precambriano da porção centro-leste da Serra do Espinhaço Meridional e metalogênese associada*. 1990. 298 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1990.

KNAUER, L.G. O Supergrupo Espinhaço em Minas Gerais: considerações sobre sua estratigrafia e seu arranjo estrutural. *Geonomos*, v. 15, n. 1, p. 81–90, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.18285/geonomos.v15i1.109>. Acesso em: 11 abr. 2022.

KNAUER, L.G.; SCHRANK, A. A origem dos filitos hematíticos da Serra do Espinhaço Meridional, Minas Gerais. *Geonomos*, v. 1, n. 1, p. 33–38, 1994. Disponível em: <https://periodicos.ufmg.br/index.php/revistageonomos/article/view/11461/8199>. Acesso em: 11 abr. 2022.

KUCHENBECKER, M. Os processos geológicos por trás dos sítios arqueológicos da Serra do Espinhaço Meridional. *Revista Espinhaço*, v. 8, n. 2, p. 1–12, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3583279>. Acesso em: 29 maio 2022.

KUCHENBECKER, M.; FRAGOSO, D.G.C.; SANGLARD, J.C.D.; FANTINEL, L.M. A utilização de lavras desativadas como laboratórios naturais para o ensino de geociências: exemplos de Diamantina (MG). *Terrae Didática*, v. 12, n. 1, p. 56–58, 2016. Disponível em: <https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/td/article/view/8645965/13161>. Acesso em: 29 maio 2022.

LOBO, F.; COSTA, M., NOVO, E.; TELMER, K. Distribution of Artisanal and Small-Scale Gold Mining in the Tapajós River Basin (Brazilian Amazon) over the Past 40 Years and Relationship with Water Siltation. *Remote Sensing*, v. 8, n. 7, 579, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs8070579>. Acesso em: 29 maio 2022.

LOPES-SILVA, L.; KNAUER, L.G. Posicionamento estratigráfico da formação bandeirinha na região de Diamantina, Minas Gerais: Grupo Costa Sena ou Supergrupo Espinhaço? *Geonomos*, v. 19, n. 2, p. 131–151, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.18285/geonomos.v19i2.49>. Acesso em: 29 maio 2022.

MACHADO, N.; SCHRANK, A.; ABREU, F.R.; KNAUER, L.G.; ALMEIDA ABREU, P.A. Resultados preliminares da geocronologia U/Pb na Serra do Espinhaço Meridional. *In:*

SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DE MINAS GERAIS, 5., 1989, Belo Horizonte. *Anais...* Belo Horizonte: SBG, 1989. p. 171–174.

MAGALHÃES, J.R.; PEDROSA-SOARES, A.; DUSSIN, I.; MÜNTENER, O.; PINHEIRO, M.A.P.; SILVA, L.C.; KNAUER, L.G.; BOUVIER, A.S.; BAUMGARTNER, L. First Lu-Hf, $\delta^{18}\text{O}$ and trace elements in zircon signatures from the Statherian Espinhaço anorogenic province (Eastern Brazil): Geotectonic implications of a silicic large igneous province. *Brazilian Journal of Geology*, v. 48, n. 4, p. 735–759, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2317-4889201820180046>. Acesso em: 13 mar. 2022.

MINELAB. *Manual de instruções GPZ 7000*. Rev. 3. [2021]. Disponível em: https://www.minelab.com/_files/f/408231/GPZ7000_InstructionalManual_PT.pdf. Acesso em: 15 set. 2021.

MLAMBO, P.; DERA, H.; CHIWESHE, E.; JONATHAN, E. Inductive Metal Detectors and the Design of Prospecting Robots: a Possibility. *In: EAI INTERNATIONAL CONFERENCE FOR RESEARCH, INNOVATION AND DEVELOPMENT FOR AFRICA, 2017, Victoria Falls. Annals...* Victoria Falls, Zimbabwe: EAI, 20th–21st Jun 2017. p. 10–19. Disponível em: <https://eudl.eu/pdf/10.4108/eai.20-6-2017.2270713>. Acesso em: 13 mar. 2022.

MORAES, L.J.; BARBOSA, O.; ARROJADO LISBOA, J.M.; LACOURT, F.; GUIMARÃES, D. *Geologia econômica do norte de Minas Gerais*. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura: 1937. 192 p.

MORETTIN, P.A.; BUSSAB, W.D.O. *Estatística básica*. 9. ed. São Paulo: Saraiva, 2017. 453 p.

PFLUG, R. *Observações sobre a estratigrafia da Série Minas na região de Diamantina, Minas Gerais*. Rio de Janeiro: Ministério das Minas e Energia; DNPM/DGM, 1968. 20 p.

PFLUG, R.; RENGER, F. Estratigrafia e evolução geológica da margem SE do Cráton São Francisco. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 27., 1973, Aracaju. Anais...* Aracaju: SBG, 1973. v. 2. p. 5–19.

R CORE TEAM. *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2021. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 8 dez. 2021.

RODRIGUES, R.M.; MASCARENHAS, A.F.S.; ICHIHARA, A.H.; SOUZA, T.M.C.; BIDONE, E.D.; BELLIA, V.; HACON, S.; DA SILVA, A.R.B.; BRAGA, J.B.P.; STILIANIDI FILHO, B. *Estudo dos impactos ambientais decorrentes do extrativismo mineral e poluição mercurial no Tapajós*. Rio de Janeiro: CETEM/CNPq, 1994. 220 p.

RONCHI, L.H.; GIULIANI, G.; BENY, C.; FOGAÇA, A.C.C. Caracterização físico-química dos fluidos associados aos veios de quartzo auríferos de costa sena - MG. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 22, n. 2, p. 129–138, 1992. Disponível em: <https://doi.org/10.25249/0375-7536.1992129138>. Acesso em: 11 mar. 2021.

SAEGER, K.E.; RODIES, J. The colour of gold and its alloys – The mechanism of variation in optical properties. *Gold Bulletin*, v. 10, n. 1, p. 10–14, 1977. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF03216519>. Acesso em: 11 mar. 2021.

SCHÖLL, W.U.; FOGAÇA, A.C.C. Estratigrafia da Serra do Espinhaço na região de Diamantina. *In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DE MINAS GERAIS*, 1., 1979, Diamantina. *Anais...* Diamantina: SBG, 1979. p. 55–73.

SILVA, R.R. Depositional sequences of the rift phase of the Proterozoic Espinhaço Supergroup in the area between Diamantina and Gouveia, Minas Gerais, Brazil. *In: INTERNATIONAL SEDIMENTOLOGY CONGRESS*, 14., 1995, Recife. *Abstracts...* Recife: [s. n.], 1995. p. 75–76.

SILVEIRA, C.E.; MEDAGLIA, J.; BULHÕES, N.G.; SOUZA JUNIOR, R.F. Caminhos do turismo em Diamantina: a relação com a origem mineradora, a cultura e o título de patrimônio cultural da humanidade. *Vozes dos Vales*, ano 1, n. 1, p. 1–21, 2012.

TABER, S. Gold crystals from the Southern Appalachians. *American Mineralogist*, v. 33, p. 482–788, 1948.

TELFORD, W.M.; TELFORD, W.M.; GELDART, L.P.; SHERIFF, R.E. *Applied geophysics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1990. 792 p.

UHLEIN, A. *Transição cráton faixa dobrada: exemplo do Cráton São Francisco e da Faixa Araçuaí (Ciclo Brasileiro) no Estado de Minas Gerais*. Aspectos estratigráficos e estruturais. 1991. 295 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991.