



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA E GEOQUÍMICA**

---

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 548**

**CARACTERIZAÇÃO DA ALTERAÇÃO HIDROTHERMAL NO  
ALVO COELHO CENTRAL, DEPÓSITO AURÍFERO PEDRA  
BRANCA, SEQUÊNCIA DE SERRA DAS PIPOCAS, MACIÇO  
DE TROIA, COM BASE EM ESTUDOS ISOTÓPICOS (O, H, S e  
C) E INCLUSÕES FLUIDAS**

**Dissertação apresentada por:**

**RAFAEL GUIMARÃES CORRÊA LIMA**

**Orientador: Prof. Dr. Evandro Luiz Klein (UFPA - CPRM)**

---

**BELÉM - PA  
2019**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD  
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará  
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

---

C824c Corrêa Lima, Rafael Guimarães

Caracterização da alteração hidrotermal no alvo Coelho Central, depósito aurífero Pedra Branca, sequência Serra das Pipocas, maciço de Troia, com base em estudos isotópicos (O, H, S e C) e inclusões fluidas / Rafael Guimarães Corrêa Lima. - 2019.

xxvii, 104 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Evandro Luiz Klein  
Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.

1. Ouro. 2. Greenstone Belt. 3. Fácies anfibolito. 4. CO<sub>2</sub>. 5. Fluidos magmáticos. I. Título.

CDD 669.22

---



**Universidade Federal do Pará**  
**Instituto de Geociências**  
**Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica**

**CARACTERIZAÇÃO DA ALTERAÇÃO HIDROTHERMAL NO  
ALVO COELHO CENTRAL, DEPÓSITO AURÍFERO PEDRA  
BRANCA, SEQUÊNCIA DE SERRA DAS PIPOCAS, MACIÇO  
DE TROIA, COM BASE EM ESTUDOS ISOTÓPICOS (O, H, S  
e C) E INCLUSÕES FLUIDAS**

**Dissertação apresentada por**

**RAFAEL GUIMARÃES CORRÊA LIMA**

**Como requisito parcial à obtenção do Grau de Mestre em Ciências na Área de  
GEOLOGIA**

**Data da Aprovação: 08 / 05 /2019**

**Banca Examinadora:**

**Prof. Dr. Evandro Luiz Klein**  
(Orientador - CPRM)

**Prof. Dr. Raimundo Neto Nobre Villas**  
(Membro-UFPA)

**Prof. Dr.ª. Lena Virginia Soares Monteiro**  
(Membro-USP)

A todos que não tiveram essa oportunidade.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Federal do Pará (UFPA), ao Instituto de Geociências (IG) e ao Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica (PPGG) pelo fornecimento de infraestrutura necessária para a realização deste trabalho e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) pela concessão de bolsa de estudo;

Agradecemos à Jaguar Mining Inc. pela disponibilização dos testemunhos de sondagem;

Agradeço ao orientador desta pesquisa, Dr. Evandro Luiz Klein, pela oportunidade e confiança dispensadas. Pela orientação, ainda que à distância, com críticas e sugestões à pesquisa e ao mestrando, e sobretudo pela “paciente” e desesperançosa espera da entrega desta dissertação.

Ao colega Dr. Felipe Grandjean da Costa, pelas discussões geológicas, sugestões e pelos momentos de descontração na beira do rio na UFPA. Valeu surfista...

Agradeço ao laboratório de Microanálises do Instituto de Geociências da UFPA, nas pessoas de Prof Claudio N. Lamarão, Gisele Marques, Ana Paula e Vivian de Araújo, pelo incondicional apoio com as análises no MEV e por sempre conseguirem aqueles “dias salvadores” para os alunos da Geologia Econômica. Devo muito a essa equipe.

Agradeço ao laboratório de Inclusões fluidas do Instituto de Geociências da UFPA.

Um “Muito Obrigado” especial ao técnico de laboratório Manoel pela disposição e precioso apoio com o nitrogênio para as análises de IF.

Agradeço à CPRM – Belém, nos nomes de Denise Lobato e Rosalva Santana, pelo apoio durante as etapas de separação mineralógica para as análises de isótopos estáveis. Obrigado pelos momentos de descontração também.

Agradeço também a Joelma Lobo e sua equipe de laminação que sempre se mostraram atenciosos e prestativos para comigo e minhas solicitações de lâminas “desafiadoras”.

Agradeço aos Prof Dr. Raimundo Netuno e Dr<sup>a</sup>. Lena Monteiro por aceitarem fazer a avaliação desta dissertação.

Aos companheiros de trabalho da Mineração Aurizona, Clebson Oliveira, Luiz Daniel Alencar, Luiz Claudio Lima, Nicolás Annunciato, Heraldo Silva e Ana Glória Noronha pelos momentos de descontração.

À Carolina Blois, pelo companheirismo e incentivo dedicados durante a fase final desta pesquisa.

Aos amigos de graduação Rômulo Amaral, Reinaldo Fontoura, Adson Pinheiro, Afílton Brito, Edson Louzada, Daivesson Abreu;

À turma da fuzarca Helder Thadeu, Ramon Carvalho (Pipes), Bruna Nogueira, Patrícia Rodrigues (Paty Arroto), Paulo (Cara de Peixe), Christian (Bino), Victor Matheus (Lombra) e Leandro Melo (Quaxi) pelos inesquecíveis momentos e pela união. “A afinidade que nos une, mas as diferenças mantêm a união”.

Às amigas Shirley Medeiros e Thaíse Costa, por toda jornada.

À Ana Carolina Farias, pelo companheirismo e cumplicidade de sempre, quase nunca merecidos, e por ser a grande incentivadora e entusiasta dessa jornada geológica.

Sobretudo, agradeço aos meus pais, Siléa Guimarães e José Carlos, pelo duro esforço de sempre, sem o qual nada disso seria possível.

*“A gente habitua-se dizemo-lo ou dizem-no, com uma serenidade que parece autêntica, porque realmente não existe ou ainda não se descobriu outro modo de deitar cá para fora com a dignidade possível as nossas resignações, o que ninguém pergunta é à custa de quê se habitua a gente.”*

*José Saramago.*

## RESUMO

O depósito aurífero Pedra Branca está hospedado em rochas metavulcânicas riacianas do *Greenstone Belt* Serra das Pipocas, Maciço de Troia, um dos principais embasamentos arqueano/paleoproterozoico da Província Borborema. O depósito é formado por quatro alvos principais, Mirador, Queimadas, Igrejinha e Coelho Central e foi, recentemente, incluído na classe dos depósitos de ouro orogênico hipozonais com base no contexto geológico, tipos de alterações hidrotermais e dados isotópicos obtidos para os alvos Mirador e Queimadas. No alvo Coelho Central, as principais rochas hospedeiras do ouro são ilmenita- e granada anfíbolitos formados a partir de protólitos máficos. Ocorrências subordinadas de ouro foram reconhecidas também em lentes de metadacitos e metatonalitos hidrotermalizados encaixados nos anfíbolitos. Zonas hidrotermalizadas com mineralização aurífera associada mostram associações minerais formadas em condições equivalentes à fácies anfíbolito. Foram reconhecidas (i) Venulações cálcio-silicáticas (diopsídio, titanita, calcita, epidoto e sulfetos), (ii) Venulações com hornblenda, albita, biotita e granada, com pirrotita e ouro associado, (iii) Alteração potássica rica em biotita, com pirrotita, ouro e teluretos e (iv) Veios de quartzo com ouro livre. Registros hidrotermais pós-mineralização são evidenciados por (v) Bolsões com epidoto, titanita e calcita, (vi) Cloritização e (vii) Carbonatação fissural rica em pirita, os quais marcam um estágio de deformação dúctil-rúptil, provavelmente já em condições de fácies xisto verde. O ouro ocorre principalmente como micropartículas inclusas em pirrotita, calcopirita, pentlandita e Copentlandita indicando sua associação com fases de enxofre, e subordinadamente com micropartículas livres em veios de quartzo. A associação metálica das zonas sulfetadas inclui ainda abundantes teluretos de Ag, Bi, Ni e Pb. A geotermometria por isótopos de O e H em silicatos hidrotermais estima um intervalo de temperatura entre 484 e 586 °C para formação das alterações com ouro associado. A composição isotópica dos fluidos em equilíbrio com silicatos hidrotermais (quartzo, hornblenda, biotita, turmalina e titanita) mostra valores de  $\delta^{18}\text{O}$  (+6,8 a +10,7‰),  $\delta\text{D}$  (-58,4 a -35,5‰), tal como os valores de  $\delta^{34}\text{S}$  em sulfetos (-3,1 e +2,7‰) e de  $\delta^{13}\text{C}$  para calcita (-11,1 a -5,8‰), indicativos de fluidos oriundos de fonte magmático-hidrotermal profunda, com possível interação e mistura com fluidos da sequência *Greenstone* encaixante. Assembleias de inclusões fluidas reconhecidas em veios de quartzo revelam o predomínio de inclusões carbônicas, com densidade de até 1,15 g/cm<sup>3</sup> e até 15 mol % de CH<sub>4</sub>, coexistentes com inclusões de nitrogênio, e também com variedades aquocarbônicas e aquosas de baixa salinidade (<9,7 % equiv. NaCl). Os critérios petrográficos e microtermométricos sugerem processo de imiscibilidade de um fluido CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O-NaCl-N<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub> como o responsável



pela formação das inclusões observadas. Considerando este como o fluido mineralizador, desestabilização de complexos como  $\text{Au}(\text{HS})^{-2}$  e precipitação de ouro e metais associados ocorreram por imiscibilidade e interação fluido-rocha, além de variações nas condições redox e pH do fluido entre 2,2 e 5,5 kbar (6,3 a 16,0 km). Tardiamente, um fluido com  $\text{H}_2\text{O-NaCl-CaCl}_2$  circulou na área do alvo e contribuiu para a cristalização de calcita, com pirita e esfalerita associadas, em fraturas e falhas. As características acima apresentadas permitem ratificar o alvo Coelho Central e depósito associado como hospedeiros de uma mineralização aurífera hipozonal formada em condições de fácies anfíbolito, a partir de fluidos magmáticos profundos ricos em  $\text{CO}_2$  que interagiram com a sequência metamórfica do *Greenstone Belt* Serra das Pipocas e precipitaram ouro e metais associados.

Palavras-chave: Ouro. *Greenstone Belt*. Fácies anfíbolito.  $\text{CO}_2$ . Fluidos magmáticos.

## ABSTRACT

The gold mineralization of Pedra Branca deposit is associated with rhyacian metavolcanic rocks of Serra das Pipocas Greenstone Belt, at the Archean–Paleoproterozoic Troia Massif, in Borborema Province, NE of Brazil. The deposit comprises four mineralized targets, Mirador, Queimadas, Igrejinha and Coelho Central and has been classified as a hypozonal orogenic gold deposit based on the geological context, types of hydrothermal alterations and isotopic data obtained for Mirador and Queimadas targets. At Coelho Central target, the main gold host rocks are ilmenite- and garnet amphibolites (after mafic volcanic rocks). Some gold occurrences has been recognized in altered metadacites and metatonalites intrusive lenses. Hydrothermal and mineralized zones show mineral assemblages formed under amphibolite facies conditions. (i) calc-silicate veinlets (diopside, titanite, calcite, epidote and sulfides), (ii) hornblende, albite, biotite and garnet veinlets with pyrrhotite and gold, (iii) biotite-rich potassic alteration containing pyrrhotite, gold and tellurides and (iv) quartz veins are the main types of ore-related alterations. In addition, (v) epidote, titanite and calcite pockets, (vi) chloritization and (vii) pyrite-rich fissural carbonatization are the late and no ore-related alterations that marks a ductile-brittle deformation, probably under greenschist facies conditions. Gold occurs predominantly as inclusions in pyrrhotite, chalcopyrite, pentlandite and Co-pentlandite indicating their association with sulfur species and subordinately as free-milling microparticles in quartz veins. The metallic association of sulfidation zones also includes abundant Ag, Bi, Ni and Pb tellurides. Oxygen and hydrogen geothermometry for hydrothermal silicates yielded temperatures from 484 to 586 °C for the gold-related alterations. The fluid isotopic composition in equilibrium with hydrothermal silicates (quartz, hornblende, biotite, tourmaline and titanite) shows values of  $\delta^{18}\text{O}$  (+6.8 to + 10.7 ‰) and  $\delta\text{D}$  (-58.4 to -35.5 ‰), as well as the values of  $\delta^{34}\text{S}$  in sulfides (-3.1 and +2.7 ‰) and  $\delta^{13}\text{C}$  for calcite (-11.1 to -5.8 ‰), indicative of deep-seated magmatic-hydrothermal fluid, with possible interaction and mixing with fluids of the greenstone sequence. Fluid inclusions assemblages in quartz veins show the predominance of  $\text{CO}_2$  inclusions, with a density up to 1.15 g/cm<sup>3</sup> and up to 15 mol% of  $\text{CH}_4$ , coexisting with  $\text{N}_2$  inclusions, and also with low salinity (< 9.7 wt% NaCl equiv.)  $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{NaCl}$  and  $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{FeCl}_2\pm\text{MgCl}_2$  varieties. The petrographic and microthermometric criteria suggest the immiscibility of a  $\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{N}_2-\text{CH}_4$  fluid as responsible for the generation of the observed inclusions. Destabilization of complexes such as  $\text{Au}(\text{HS})^{-2}$  and precipitation of gold and associated metals occurred by immiscibility, fluid-rock interaction, and changes in redox conditions and fluid pH, between 2.2 and 5.5 kbar (6.3 to 16.0 km). A  $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{CaCl}_2$  latter

fluid was the responsible for the calcite, with pyrite and sphalerite precipitation in fractures and faults. The characteristics presented above allow us to ratify the Coelho Central target and Pedra Branca deposit as a hypozonal gold mineralization formed under amphibolite facies conditions, from CO<sub>2</sub>-rich deep-seated magmatic fluids that interacted with the metamorphic sequence of Serra das Pipocas Greenstone Belt and precipitated gold and associated metals.

Keywords: Gold. Greenstone Belt. Amphibolite facies. CO<sub>2</sub>. Magmatic fluids.