



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

TESE DE DOUTORADO Nº 174

**ESTUDO ISOTÓPICO DO DEPÓSITO AURÍFERO VOLTA
GRANDE, DOMÍNIO BACAJÁ, SUDESTE DO CRÁTON
AMAZÔNICO**

Tese apresentada por:

HELMUT SOUSA PIMENTEL

Orientador: Prof. Dr. Moacir José Buenano Macambira (UFPA)

Coorientador: Dr. Marcelo Lacerda Vasquez (CPRM-SUREG)

**BELÉM – PARÁ
2024**

**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)**

P644e Pimentel, Helmut Sousa.
Estudo isotópico do depósito aurífero Volta Grande, Domínio Bacajá,
Sudeste do Crátão Amazônico / Helmut Sousa Pimentel. —2024.
xxiv, 165 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Moacir José Buenano Macambira Tese
(Doutorado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências,
Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Belém, 2024.

1. Geoquímica. 2. Geocronologia. 3. Sudeste da Amazônia. 4.
Ciclo Transamazônico. 5. Granito-greenstone. I. Título.

CDD 551.715098115



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

**ESTUDO ISOTÓPICO DO DEPÓSITO AURÍFERO VOLTA
GRANDE, DOMÍNIO BACAJÁ, SUDESTE DO CRÁTON
AMAZÔNICO**

TESE APRESENTADA POR

HELMUT SOUSA PIMENTEL

Como requisito parcial à obtenção de Grau de Doutor em Ciências na Área GEOQUÍMICA E PETROLOGIA Linha de Pesquisa Geocronologia e Geoquímica Isotópica.

Data de Aprovação: 22 / 03 / 2024

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Moacir José Buenano Macambira
(Orientador - UFPA)

Prof. Dr. Carlos Eduardo de Mesquita Barros
(Membro – UFPR)

Prof. Dr. Elton Luiz Dantas
(Membro – UnB)

Prof. Dr. Jean-Michel Lafon
(Membro – UFPA)

Prof. Dr. Carlos Marcello Dias Fernandes
(Membro – UFPA)

"Nesta tese, embarcamos em uma jornada científica fascinante pelas eras geológicas da Amazônia, em busca das respostas que as rochas nos oferecem. Com cada amostra analisada e cada datação realizada, nossa compreensão da história da região se aprofunda, revelando os processos geológicos que ajudaram a moldar a paisagem e a vida ao longo dos milênios. É com gratidão e admiração pela imensidão geológica do Cráton Amazônico que dedico esta pesquisa aos desbravadores do passado, aos cientistas incansáveis e à natureza majestosa que nos envolve."

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Federal do Pará (UFPA), ao Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica (PPGG), e ao Laboratório Pará-Iso do Instituto de Geociências (IG), pela oportunidade e infraestrutura fornecida para o desenvolvimento da tese de doutorado.

À empresa *Belo Sun Mining Inc.*, pelo apoio logístico, permissão e concessão das amostras utilizadas nesta tese através do *Confidentiality and Standstill Agreement*. Em especial, aos geólogos Stéphen Amireault, Antônio Ramos Bisneto, Ricardo Lopes, Everaldo Cavalcanti e Kleber Souza pelas discussões em campo e informações geológicas, além dos demais funcionários da empresa que contribuíram com este trabalho.

Ao meu orientador, professor Doutor Moacir José Buenano Macambira, pela habilidade e conhecimento científico único, tornando a conclusão deste documento possível.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo suporte financeiro através do Programa de Excelência Acadêmica – Doutorado (PROEX nº 88882.347895/2019-01).

Ao Serviço Geológico do Brasil, pelo apoio técnico-científico e, em especial, ao meu coorientador Doutor Geocientista Marcelo Lacerda Vasquez e a geóloga Mestra, Jenny Alexandra Ortega Cardozo, pelas análises ao MEV.

Ao Laboratório de Laminação do IG/UFPA, coordenado pela técnica Joelma Lobo, pela confecção das seções delgadas e polidas, cruciais no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Doutor Colombo C. G. Tassinari, diretor do GeoLab-SHRIMP da Universidade de São Paulo, pelas análises U-Pb.

À biblioteca do IG pela colaboração na padronização das normas da tese.

Ao Eng. Florestal Antônio Carlos Rillo e ao ajudante de campo Acácio Braz, pelo apoio logístico e ajuda na coleta de amostras de campo.

*"A Terra é um livro aberto, cujas páginas são
escritas em rochas."
(James Lovelock)*

RESUMO

A área da Volta Grande do Rio Xingu é crucial para o entendimento geológico dos períodos Sideriano e Riáciano do Domínio Bacajá, Província Maroni-Itacaiúnas, Cráton Amazônico, que comporta mineralizações auríferas. O Domínio Bacajá é composto por associações tectônicas com direção NW-SE que comportam fragmentos arqueanos e siderianos retrabalhados essencialmente no Riáciano com expressivo crescimento crustal durante o Ciclo Transamazônico (2,26 a 2,06 Ga). O objetivo desta tese é investigar o ambiente tectônico e discutir a evolução crustal em ambiente de terrenos acrescionários e colisionais continentais. O estudo baseou-se no levantamento de campo, mapeamento geológico-geofísico, petrografia, geoquímica, geocronologia e geoquímica isotópica, tendo sido aplicados os métodos U-Pb e Lu-Hf em zircão via SHRIMP e LA-ICP-MS, U-Pb em titanita via LA-ICP-MS e Sm-Nd em rocha total via TIMS. A integração geológica-geofísica destacou a Zona de Cisalhamento Bacajá de direção NW-SE, com bordas bem delimitadas, com terrenos foliados de altas susceptibilidades magnéticas, que deformou plasticamente os litotipos em seu interior. O estudo petrográfico identificou rochas metavulcanossedimentares da sequência Três Palmeiras, Suíte Intrusiva Oca (composta de granodiorito, quartzo monzodiorito, quartzo monzonito, monzodiorito e diorito), além de granodiorito, monzogranito e sienogranito do Complexo Bacajá e da Suíte Intrusiva Arapari. A mineralização orogênica hidrotermal zonada de ouro ocorre no contato entre o Grupo Três Palmeiras com a Suíte Intrusiva Oca. A geoquímica das rochas vulcânicas máficas da Formação Itatá (inferior) do Grupo Três Palmeiras é de caráter toleítico evoluído em uma dorsal mesoceânica e em arcos de ilha juvenis, enquanto as rochas vulcânicas da Formação Bacajá (superior) estão relacionadas a arcos vulcânicos cálcio-alcalinos em margens continentais ativas de domínio compressional. Distingue-se três grupos de granitoides que representam diferentes fases da evolução magmática e tectônica do Domínio Bacajá no Riáciano, cujos resultados revelaram idades num intervalo de cerca de 110 Ma: granitoides de 2,20-2,17 Ga da Suíte Intrusiva Oca, e 2,17 Ga, sienogranito com biotita do Complexo Bacajá, além do monzogranito com biotita de 2,09 Ga da Suíte Intrusiva Arapari. A Suíte Intrusiva Oca é composta de rochas intermediárias a ácidas, cálcico a álcali-cálcico, ultramagnesianas a médio magnesianas, metaluminosas a peraluminosas formadas em ambiente de granitos de cordilheira relacionadas a arcos vulcânicos. Os ETR dos granitoides da Suíte Intrusiva Oca mostram forte fracionamento magmático, traduzido pela alta razão $(La/Lu)_N$, e enriquecimento nos elementos Rb, Th e K, e empobrecimento em Ba, Nb, P e Ti, tendo como fonte rochas máficas com alto a baixo teores de K. O Complexo Bacajá é representado por

quartzo monzonito, granito e granodiorito cálcico a álcali-cálcico, médio-magnesianos e peraluminosos, cujas fontes são rocha máficas com baixo-K e alto-K com alguma contribuição de metassedimentos. As rochas da Suíte Intrusiva Arapari são médio-magnesianas, cálcio-álcali a álcali-cálcico e metaluminosas, tendo como fontes rochas máficas com alto-K. Os granitoides sin a tardi-colisionais (Complexo Bacajaí e Suíte Intrusiva Arapari) são ricos em LILE e ETRL, apresentam anomalias negativas de Ni, P e Ti, e depletação em HFSE, típicos de granitos orogênicos de arcos vulcânicos. Em termos de isotópicos, a sequência Três Palmeiras possui Nd-T_{DM} de 2,35 a 2,58 Ga com $\epsilon\text{Nd}_{(t)}$ de -0,41 a +3,20. A Suíte Intrusiva Oca encerra rochas com Nd-T_{DM} entre 2,24 e 3,06 Ga e $\epsilon\text{Nd}_{(t)}$ que variam entre -5,99 e +2,44. As idades de cristalização U-Pb em zircão dessa suíte são: 2203 ± 23 Ma com Hf-T_{DM}^C entre 2,4 e 2,8 Ga e $\epsilon\text{Hf}_{(2,20\text{Ga})}$ entre -0,45 e +5,24 para o corpo Ouro Verde; 2173 ± 7 Ma com Hf-T_{DM}^C entre 2,3 e 2,6 Ga e $\epsilon\text{Hf}_{(2,17\text{Ga})}$ entre +2,04 e +7,65, adicionado a uma idade U-Pb 2171 ± 17 Ma em titanita, para o corpo Central, e 2171 ± 13 Ma com Hf-T_{DM}^C entre 2,4 e 3,4 Ga e $\epsilon\text{Hf}_{(2,17\text{Ga})}$ entre -10,32 e +4,34 para o corpo Buma, com gerações distintas de crosta entre o Mesoarqueano e o Sideriano/Riaciano. O Complexo Bacajaí apresenta idade de cristalização de 2165 ± 10 Ma, Hf-T_{DM}^C entre 2,5 e 2,8 Ga e $\epsilon\text{Hf}_{(2,16\text{Ga})}$ de -0,35 a +3,04, com fontes mantélicas do Neoarqueano. A Suíte Intrusiva Arapari possui idade de cristalização 2094 ± 13 Ma, Nd-T_{DM} de 2,38 Ga, $\epsilon\text{Nd}_{(2,09\text{Ga})}$ de -1,15, Hf-T_{DM}^C entre 2,6 e 2,8 Ga, e o $\epsilon\text{Hf}_{(2,09\text{Ga})}$ variando de -2,77 a +1,59, o que indica mistura de fonte mantélica e crustal geradas do Neoarqueano ao Sideriano. A evolução geológica da região estudada é marcada por diversos eventos. No Sideriano, sequências vulcanosedimentares com basaltos toleíticos e andesitos de arco de ilhas foram depositados, seguidas de colocação de granitoides durante a colisão e formação de arco continental composto por dioritos a granitos entre 2,20 e 2,09 Ga. O estágio mais avançado e tardio da orogenia Transamazônica na região da Volta Grande é representado pela colocação granitoides peraluminosos da Suíte Intrusiva Arapari, que encerram a complexa evolução geológica da região. A análise realizada neste estudo destaca a proposta de similaridade fundamentada na similaridade petrográfica, geocronológica e isotópica entre a região da Volta Grande e os domínios Lourenço e Carecuru, localizados no estado do Amapá, na porção nordeste da Província Maroni-Itacaiúnas.

Palavras-chave: geoquímica; geocronologia; sudeste da amazônia; ciclo transamazônico; granito-*greenstone*.

ABSTRACT

The area of the Volta Grande of the Xingu River is crucial for the geological understanding of the Siderian and Riacian periods in the Bacajá Domain, Maroni-Itacaiúnas Province, Amazonian Craton, which hosts significant gold mineralizations. The Bacajá Domain is composed of tectonic associations with NW-SE orientation that contain reworked Archean and Siderian fragments, mainly during the Riacian, with significant crustal growth during the Transamazonian Cycle (2.26 to 2.06 Ga). The objective of this thesis is to investigate the tectonic environment and discuss the crustal evolution in accretionary and continental collision settings. The study relied on field surveys, geological-geophysical mapping, petrography, geochemistry, geochronology, and isotopic geochemistry, employing U-Pb and Lu-Hf methods in zircon via SHRIMP and LA-ICP-MS, U-Pb in titanite via LA-ICP-MS and Sm-Nd on whole rock via TIMS. The geological-geophysical integration reveals the NW-SE trending Bacajá Shear Zone with well-defined edges and foliated terrains of high magnetic susceptibilities, plastically deforming the lithotypes within. Petrographic analyses identified metavolcanosedimentary rocks of the Três Palmeiras sequence, the Intrusive Oca Suite (composed of granodiorite, quartz monzodiorite, quartz monzonite, monzodiorite, and diorite), as well as granodiorite, monzogranite, and sienogranite of the Bacajaí Complex and the Arapari Intrusive Suite. The zoned hydrothermal orogenic gold mineralization occurs at the contact between the Três Palmeiras Group and the Intrusive Oca Suite. The geochemistry of mafic volcanic rocks from the lower Itatá Formation of the Três Palmeiras Group indicates evolved tholeiitic character in a mid-oceanic ridge and juvenile island arc setting, while the volcanic rocks of the upper Bacajá Formation are related to calc-alkaline volcanic arcs in active compressional continental margins. Three groups of granitoids representing different phases of magmatic and tectonic evolution in the Bacajá Domain during the Riacian were distinguished, with ages spanning around 110 M.y.: granitoids from the Intrusive Oca Suite at 2.20-2.17 Ga, syenogranite with biotite from the Bacajaí Complex at 2.17 Ga, and biotite-bearing monzogranite from the Arapari Intrusive Suite at 2.09 Ga. The Intrusive Oca Suite comprises intermediate to acid, calcic to alkali-calcic, ultramafic to medium-mafic, metaluminous to peraluminous rocks formed in a cordilleran granitic setting related to volcanic arcs. The REE of Intrusive Oca Suite granitoids exhibit strong magmatic fractionation, reflected in high $(La/Lu)_N$ ratios, enrichment in Rb, Th, and K, and depletion in Ba, Nb, P, and Ti, sourced from mafic rocks with varying K contents. The Bacajaí Complex consists of calcic to alkali-calcic, medium-mafic, and peraluminous quartz monzonite, granite, and granodiorite, sourced from

mafic rocks with low-K and high-K components and some input from metasediments. The rocks of the Arapari Intrusive Suite are medium-mafic, calcium-alkali to alkali-calcic, and metaluminous, sourced from mafic rocks with high-K content. The syn- to late-collisional granitoids (Bacajaí Complex and Arapari Intrusive Suite) are enriched in LILE and LREE, exhibiting negative anomalies in Ni, P, and Ti, and depletion in HFSE, typical of orogenic granites in volcanic arcs. In terms of isotopes, the Três Palmeiras sequence has Nd- T_{DM} values ranging from 2.35 to 2.58 Ga, with $\epsilon Nd_{(t)}$ varying from -0.41 to +3.20. The Intrusive Oca Suite includes rocks with Nd- T_{DM} between 2.24 and 3.06 Ga and $\epsilon Nd_{(t)}$ ranging from -5.99 to +2.44. U-Pb zircon crystallization ages for this suite are 2203 ± 23 Ma, with Hf- T_{DM}^C values between 2.4 and 2.8 Ga and $\epsilon Hf_{(2.20Ga)}$ ranging from -0.45 to +5.24 for the Ouro Verde body; 2173 ± 7 Ma with Hf- T_{DM}^C ranging between 2.3 and 2.6 Ga, and $\epsilon Hf_{(2.17Ga)}$ between +2.04 and +7.65, added to a U-Pb age of 2171 ± 17 Ma in titanite, for the Central body, and 2171 ± 13 Ma, with Hf- T_{DM}^C values between 2.4 and 3.4 Ga and $\epsilon Hf_{(2.17Ga)}$ ranging from -10.32 to +4.34 for the Buma body, indicating distinct crustal generations between the Mesoarchean and Siderian/Riacian. The Bacajaí Complex has a crystallization age of 2165 ± 10 Ma, Hf- T_{DM}^C values between 2.5 and 2.8 Ga, and $\epsilon Hf_{(2.16Ga)}$ ranging from -0.35 to +3.04, with mantelic sources from the Neoproterozoic. The Arapari Intrusive Suite has a crystallization age of 2094 ± 13 Ma, Nd- T_{DM} at 2.38 Ga, $\epsilon Nd_{(2.09Ga)}$ at -1.15, Hf- T_{DM}^C values between 2.6 and 2.8 Ga, and $\epsilon Hf_{(2.09Ga)}$ varying from -2.77 to +1.59, indicating a mixture of mantle and crustal sources generated from the Neoproterozoic to the Siderian. The geological evolution of the study region is marked by various events. In the Siderian, volcanic-sedimentary sequences with tholeiitic basalts and island arc andesites were followed by the emplacement of diorites to granites around 2.20 to 2.09 Ga and collision, originating continental arcs. The most advanced and late stage of the Transamazonian orogeny in the Volta Grande region is represented by the emplacement of peraluminous granitoids from the Arapari Intrusive Suite, closing the complex geological evolution of the region. The analyses in this study highlight the proposed similarity based on petrographic, geochronological, and isotopic similarities between the Volta Grande region and the Lourenço and Carecuru domains, located in the state of Amapá, in the northeastern portion of the Maroni-Itacaiúnas Province.

Keywords: geochemistry; geochronology; southeastern amazon; transamazonian cycle; granite-greenstone.



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

PARECER

Sobre a Defesa Pública da Tese de Doutorado de HELMUT SOUSA PIMENTEL

A banca examinadora da Tese de Doutorado de **HELMUT SOUSA PIMENTEL**, orientando do Prof. Dr. Moacir José Buenano Macambira (UFPA), e coorientação do Dr. Marcelo Lacerda Vasquez (SGB), composta pelos professores doutores Carlos Eduardo de Mesquita Barros (UFPR), Elton Luiz Dantas (UnB), Carlos Marcello Dias Fernandes (UFPA) e Jean Michel Lafon (UFPA), após apresentação da sua tese intitulada “**ESTUDO ISOTÓPICO DO DEPÓSITO AURÍFERO VOLTA GRANDE, DOMÍNIO BACAJÁ, SUDESTE DO CRÁTON AMAZÔNICO**”, emite o seguinte parecer:

O candidato realizou sua apresentação de forma clara, bem organizada, segura e no tempo estipulado. Na arguição mostrou domínio em parte da temática abordada e respondeu a maioria das perguntas formuladas pelos membros da banca. O trabalho escrito foi apresentado na forma de monografia clássica, que está de acordo com as normas do programa. As sugestões da banca foram no sentido de contribuir para a elaboração de artigos científicos oriundos da tese. Dessa forma, o volume atende às exigências básicas para uma Tese de Doutorado. Finalmente, a banca examinadora decidiu por unanimidade aprovar a tese de doutorado.

Belém, 22 de março de 2024.

Prof. Dr. Moacir José Buenano Macambira (Orientador – UFPA)

Prof. Dr. Carlos Eduardo de Mesquita Barros (Membro – UFPR)

Prof. Dr. Elton Luiz Dantas (Membro – UnB)

Prof. Dr. Carlos Marcello Dias Fernandes (Membro – UFPA)

Prof. Dr. Jean Michel Lafon (Membro – UFPA)