



**Universidade Federal do Pará**  
**Centro de Geociências**  
**Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica**

**EVOLUÇÃO GEOLÓGICA PRÉ-CAMBRIANA E ASPECTOS DA  
METALOGÊNESE DO OURO DO CRÁTON SÃO LUÍS E DO CINTURÃO  
GURUPI, NE-PARÁ / NW-MARANHÃO, BRASIL**

TESE APRESENTADA POR

**EVANDRO LUIZ KLEIN**

Como requisito parcial à obtenção do Grau de Doutor em  
Ciências na Área de GEOQUÍMICA E PETROLOGIA.

Data de Aprovação: 06 / 07 / 2004

Co-orientadores: **André Giret** e **Christopher Harris**

## Comitê de Tese

---

CANDIDO AUGUSTO VELOSO MOURA (Orientador)

---

ANDRÉ GIRET

---

BENJAMIM BLEY DE BRITO NEVES

---

RAIMUNDO NETUNO NOBRE VILLAS

---

JEAN MICHEL LAFON

Belém

---

T KLEIN, Evandro Luiz

K64e **Evolução geológica pré-cambriana e aspectos da metalogênese do ouro do Cráton São Luiz e do Cinturão Gurupi, NE-Pará/NW-Maranhão, Brasil.** / Evandro Luiz Klein; orientador, Cândido Augusto Veloso Moura. Belém: [s.n], 2004.

303f.; il.

Tese (Doutorado em Geoquímica e Petrologia) – Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, CG, UFPA, 2004.

1.GEOCRONOLOGIA 2.EVOLUÇÃO CRUSTAL  
3.METALOGÊNESE 4.OURO 5.ISÓTOPOS ESTÁVEIS  
6.CRÁTON SÃO LUIZ 7.CINTURÃO GURUPI  
8.PALEOPROTEROZÓICO 9.NEOPROTEROZÓICO  
10.MARANHÃO I.MOURA, Cândido Augusto Veloso,  
Orient. II. Título.

CDD: 551.70098121

---

## RESUMO

Na região limítrofe entre os estados do Pará e Maranhão, conhecida como Gurupi, afloram rochas ígneas e metamórficas recobertas por sedimentação fanerozóica, ocupando parte da Província Estrutural Parnaíba. Estudos geocronológicos pioneiros baseados nos métodos Rb-Sr e K-Ar mostraram a existência de dois domínios geocronológicos distintos nessa região com rochas aflorantes em direção à costa atlântica apresentando assinatura paleoproterozóica, com idades em torno de 2000 Ma, enquanto que rochas aflorantes para sul-sudoeste mostram assinatura neoproterozóica, principalmente entre 800 e 500 Ma. Esses domínios passaram a ser denominados, respectivamente, Cráton São Luís e Cinturão Gurupi. Propostas litoestratigráficas sucederam-se por mais de duas décadas, mas sempre careceram de dados geocronológicos robustos para justificar o posicionamento estratigráfico das unidades. Modelos evolutivos polarizaram-se entre propostas de evolução monocíclica ou policíclica para o Cinturão Gurupi, também carecendo de geocronologia e geologia isotópica para consubstanciar interpretações. Além disso, depósitos auríferos associam-se às duas unidades geotectônicas, mas raros foram alvo de estudos geológicos ou genéticos. Esta tese aborda em maior ou menor grau esses problemas gerais.

Uma reformulação da litoestratigrafia regional e uma proposta de evolução geológica foi alcançada através da reavaliação dos dados geológicos, geoquímicos, geocronológicos e isotópicos existentes, e da geração de novos dados geocronológicos em zircão por evaporação de Pb e U-Pb convencional e por LAM-ICP-MS. Dados isotópicos de Nd em rocha total foram também obtidos, permitindo a investigação de processos de acreção e retrabalhamento crustal. Os resultados mostram que a região possui uma evolução relativamente complexa, com intensa e extensa geração de rochas juvenis calcico-alcálicas e subordinado retrabalhamento de crosta continental arqueana entre 2,24 e 2,15 Ga, e com fusão crustal, migmatização localizada, plutonismo peraluminoso, metamorfismo e deformação em torno de 2,10 Ga. Os seguintes resultados foram obtidos para as unidades litoestratigráficas e litodêmicas estudadas no Cráton São Luís: Grupo Aurizona, metavulcanossedimentar ligado a arcos de ilha, idade máxima 2241 Ma (juvenil), com provável evolução até cerca de 2200 Ma; Suíte Intrusiva Tromai, tonalitos metaluminosos, calcico-alcálicos de arco de ilha oceânico, 2168 Ma (juvenil); Granito Areal, calcico-alcálico fracamente peraluminoso, 2150 Ma (mistura de material juvenil e retrabalhamento de arco de ilha). No Cinturão Gurupi foram obtidos os seguintes resultados: Metatonalito Igarapé Grande, tonalito granoblástico de ocorrência localizada, 2594 Ma; Complexo Itapeva, gnaisses tonalíticos localmente migmatizados, 2167 Ma (dominantemente juvenil); Formação Chega Tudo, vulcanossedimentar ligada a arcos de ilhas, 2150-2160 Ma (juvenil); Granito Maria Suprema, muscovita leucogranito (peraluminoso) intrusivo sintectonicamente no Complexo Itapeva há 2100 Ma (fusão crustal), idade de outros granitoides peraluminosos já datados anteriormente na região. O Grupo Gurupi é tentativamente posicionado no Paleoproterozóico (>2160 Ma), mas não há elemento que comprove essa hipótese. Os dados são interpretados em termos de tectônica de placas, com abertura de bacia oceânica um pouco antes de 2260 Ma, formação de arcos de ilha oceânicos, subducção e produção volumosa de magmas calcico-alcálicos e retrabalhamento dos arcos entre 2170-2150 Ma. Esse conjunto foi amalgamado a uma margem continental periférica a um bloco arqueano existente ao sul (parte arqueana do Cráton Amazônico ou núcleo cratônico encoberto atualmente pela sedimentação fanerozóica) numa colisão fraca, dirigida de NNE para SSW, mas suficiente para gerar algum espessamento crustal e permitir a fusão de parte da crosta paleoproterozóica recém formada e da crosta arqueana (ou de seus derivados detríticos) preexistente. Esse episódio colisional, ocorrido

há cerca de 2100-2080 Ma refletiu-se no metamorfismo, deformação e migmatização local, além da intrusão dos granitóides peraluminosos.

A região foi novamente palco de atividade no Neoproterozóico, com o bloco amalgamado no Paleoproterozóico sendo rompido, com formação de rifte continental marcado pela intrusão de magma alcalino (Nefelina Sienito Gnaiss Boca Nova) há 732 Ma. Rochas sedimentares depositadas nessa bacia (Formação Marajupema) apresentam cristais detríticos de zircão, os mais jovens com 1100 Ma. Esse rifte evoluiu provavelmente para uma bacia oceânica, de dimensões ainda desconhecidas, o que é sugerido por dados recentes da literatura que mostram grande quantidade de cristais detríticos de zircão com idade em torno de 600-650 Ma em bacias sedimentares da região, que contêm sedimentos imaturos, e pela intrusão de granitóide peraluminoso (colisional), há 550 Ma. Essa bacia foi fechada, com a colisão do orógeno contra o bloco amalgamado no Paleoproterozóico, com transporte de massa de SSW para NNE. A idade do clímax desse episódio orogênico neoproterozóico e do metamorfismo que o acompanhou não foi claramente determinada, existindo informações ambíguas que apontam para o intervalo 650-520 Ma (zircão do nefelina sienito e idades Rb-Sr e K-Ar em minerais).

A metalogenia dos depósitos auríferos foi abordada numa escala de reconhecimento através do estudo geológico dos mesmos, dos fluidos hidrotermais e das condições físico-químicas de formação dos depósitos. As investigações envolveram análises químicas de cloritas, estudos de inclusões fluidas e geoquímica de isótopos estáveis (O, H, C, S) e radiogênicos (Pb). Relações estruturais e texturais permitiram caracterizar os depósitos como pós-metamórficos e tardi- a pós-tectônicos com relação aos eventos paleoproterozóicos, conforme sugerido pelos isótopos de Pb (pós 2080 Ma). Regionalmente os depósitos foram formados em condições de T-P entre 280°-380°C e 2-3 kb, a partir de fluidos aquo-carbônicos relativamente reduzidos, de baixa salinidade (5% massa equiv. NaCl), moderada a alta densidade, e ricos em CO<sub>2</sub> (tipicamente <20 moles %; traços de CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>), que sugerem fortemente separação de fases. Estudos de isótopos estáveis sugerem fontes distintas para fluidos e solutos. Duas fontes são indicadas para o carbono presente em carbonatos, grafita e inclusões fluidas: uma fonte orgânica subordinada e outra fonte indefinida, que pode ser magmática, metamórfica ou mantélica (ou mistura de ambas). O enxofre de sulfetos apresenta assinatura magmática, tendo derivado diretamente de magmas ou por dissolução de sulfetos magmáticos. Isótopos de oxigênio e hidrogênio de minerais silicatados e inclusões fluidas combinados atestam fontes metamórficas para os fluidos. Portanto, reações de desidratação e descarbonização produzidas durante o metamorfismo das seqüências vulcanossedimentares paleoproterozóicas devem ter produzido os fluidos investigados. O ouro foi transportado por um complexo do tipo Au(HS)<sub>2</sub><sup>-</sup> e precipitou devido à separação de fases e reações dos fluidos com as rochas encaixantes. Os dados geológicos e genéticos encaixam-se no modelo de depósitos auríferos orogênicos encontrados em cinturões metamórficos de todas as idades.

Os resultados globais deste estudo trazem implicações para o entendimento das orogenias paleo- e neoproterozóicas que erigiram a Plataforma Sul-Americana e para a formação e desagregação de supercontinentes como Atlantica, Rodinia e Gondwana Ocidental. O quadro delineado encontra boa correlação, principalmente no que concerne ao Paleoproterozóico, com o que é descrito para parte da porção sudeste do Escudo das Guianas e para a porção sul do Cráton do Oeste da África. O quadro Neoproterozóico é ainda incipientemente compreendido para que se façam maiores correlações.

## ABSTRACT

In the Gurupi region, located at the border between the Pará and Maranhão states in northern Brazil, igneous and metamorphic rocks crop out as part of the Parnaíba Structural Province. Early geochronological studies, based on the Rb-Sr and K-Ar methods have shown two geochronological domains. The rocks that crop out towards the Atlantic margin showed a Paleoproterozoic signature, around 2000 Ma, whereas the rocks that crop out towards the inner portions of the continent showed a Neoproterozoic signature, especially between 800 and 500 Ma. These domains have been then defined as the São Luís Craton and Gurupi Belt, respectively. Several lithostratigraphic propositions have been developed throughout more than two decades. However, these propositions always lack robust geochronological support. Geotectonic models discussed a one- or two-phase evolution for the Gurupi Belt, also lacking robust geochronological and isotopic data to consubstantiate the interpretations. Furthermore, among the several gold deposits that occur in both the cratonic and belt areas, only a few have geological and genetic information. These subjects are addressed in more or less depth by this thesis.

New propositions for the regional lithostratigraphy and geological evolution have been achieved in this work by reevaluating the available geological, geochemical, geochronological and isotopic dataset, as well as by adding new geochronological data on zircon (Pb-evaporation, U-Pb ID-TIMS, and LAM-ICP-MS) for most of the igneous and orthometamorphic rocks in the region. Whole rock Nd isotope data have also been obtained, allowing the discussion of crustal accretion and reworking. The results show a rather complex geological evolution with intensive and extensive crustal growth between 2.24-2.15 Ga and crustal reworking, involving melting, migmatization, metamorphism, and deformation around 2.10 Ga. The following results have been obtained for the São Luís Craton: Aurizona Group, metavolcano-sedimentary sequence, maximum age of 2241 Ma (juvenile) that possibly evolved until c.a. 2200 Ma; Tromai Intrusive Suite, calc-alkaline, metaluminous tonalites of oceanic island arc, 2168 Ma (juvenile); Areal Granite, calc-alkaline, weakly peraluminous, 2150 Ma (mixing of juvenile and arc materials). In the Gurupi Belt, the following results have been obtained: Igarapé Grande Metatonalite, small and localized granoblastic tonalite, 2594 Ma; Itapeva Complex, weakly migmatized tonalitic orthogneiss, 2167 Ma (mostly juvenile); Chega Tudo Formation, metavolcano-sedimentary sequence (back-arc basin?), 2150-2160 Ma; Maria Suprema Granite, syntectonic, peraluminous muscovite-bearing granite, 2100 Ma (similar to other peraluminous granitoids in the Gurupi Belt). The Gurupi Group is tentatively placed in the Paleoproterozoic (>2160 Ma), but this must still be proved. The above data are interpreted on a plate tectonics basis, as follows. An oceanic basin is open at ca. 2260 Ma and is followed by the onset of subduction, formation of island arcs and voluminous calc-alkaline magmatism in oceanic settings, and concomitant reworking of the arcs between 2170-2150 Ma. This set of oceanic terranes has been accreted (soft-collision) onto an Archean continental margin to southwest (Archean part of the Amazonian Craton or a present day concealed cratonic nuclei). The collision provoked the metamorphism, deformation, and partial melting of the newly formed Paleoproterozoic crust and of part of the Archean bloc, or their erosive detritus, migmatization, and emplacement of peraluminous granitoids at 2100-2080 Ma.

The region has been the locus of a second event in the Neoproterozoic. A continental rift developed in the bloc that was assembled in the Paleoproterozoic, as attested by the intrusion of a nepheline syenite (Boca Nova) at 732 Ma. Sedimentary rocks that filled this rift (Marajupema Formation) have detrital zircon crystals that show the youngest ages around 1100 Ma. The rift evolved probably to an oceanic basin, as suggested by the widespread occurrence of detrital zircons with ages around 550 Ma in small sedimentary basins that have been filled with immature

sediments. The precise time of orogenesis climax that followed basin closure, with mass transport from SSW to NNE and accompanying metamorphism, is not yet constrained. Equivocal geochronological information point to 650-520 Ma (zircon of the nepheline syenite, Rb-Sr and K-Ar ages in minerals).

The metallogeny of selected gold deposits occurring in both the São Luís Craton and the Gurupi Belt is addressed using varied information, such as geology, chlorite chemistry, fluid inclusion geochemistry, and stable (O, H, C, S) and radiogenic (Pb) isotopes. Structural and textural relationships, and Pb isotope data indicate a post metamorphic peak and late- to post-tectonic timing for the gold mineralization with respect to the Paleoproterozoic events (post 2080 Ma). At a regional scale, the deposits show a similar signature characterized by formation temperatures between 280° and 380°C; pressures of 2-3 kbars; low-salinity (5 mass % NaCl equiv), reduced and moderately dense aqueous-carbonic ( $\text{CO}_2$  <20 mol%, traces of  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2$ ), showing strong evidence for phase separation. Stable isotope studies suggest distinct sources for fluids and solutes. The carbonate, graphite, and fluid inclusion carbon comes from two sources: a depleted organic source, and an unknown source that may be magmatic, metamorphic or mantle-derived (or both). Sulfide sulfur derived directly from magmas or from the dissolution of magmatic sulfides. Combined oxygen and hydrogen isotopes attest a metamorphic source for the fluids. Therefore, dehydration and decarbonization reactions during the metamorphism of the Paleoproterozoic metavolcano-sedimentary sequences appear to have produced the mineralizing fluids. Gold was transported as a reduced sulfur complex, such as the  $\text{Au}(\text{HS})_2^-$  and precipitated in response to the breakdown of this complex due to phase separation and fluid-rock interactions. The geological and genetic constraints are consistent with the orogenic gold model, found in metamorphic belts of all ages.

As a whole the results of this study have implications for the understanding of the Paleoproterozoic and Neoproterozoic orogenies that built up the South American Platform and for the assembly and break-up of the Atlantica, Rodinia, and West-Gondwana supercontinents. The geological scenario outlined here for the Paleoproterozoic shows good correlations with those found especially in the southeastern Guyana Shield and in the southern portion of the West-African Craton. For the Neoproterozoic, the available information is still insufficient to draw major correlations.