17º SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA
GEOTECNOLOGIAS E SUSTENTABILIDADE:
A GEOLOGIA NA AMAZÔNIA ATUAL
23 a 25 de outubro de 2023 – Santarém-Pará
SBG-NO – DEGEO/UFOPA – CPRM/Pará

MÉTODOS ISOTÓPICOS APLICADOS A ESTUDOS DE EVOLUÇÃO CRUSTAL NA AMAZÔNIA ORIENTAL

João Marinho Milhomem Neto[1]

[1] Laboratório de Geologia Isotópica da Universidade Federal do Pará – Pará-Iso (milhomem@ufpa.br)

RESUMO

Este trabalho apresenta uma síntese sobre a contribuição do Laboratório de Geologia Isotópica da UFPA (Pará-Iso) no desenvolvimento de estudos voltados para a evolução crustal de algumas áreas chave da Amazônia Oriental, com a implantação e aplicação de métodos isotópicos utilizando-se de técnicas modernas de análises *in situ* em minerais acessórios. Na última década, buscando sempre a atualização instrumental e inovação científica, os integrantes do Pará-Iso voltaram suas pesquisas em grande parte para a implementação dos métodos isotópicos U-Pb e Lu-Hf em zircão, principalmente, mas também U-Pb em monazita e titanita, com análises pontuais na escala micrométrica por meio da espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado e sistema de ablação a laser (LA-ICP-MS). Os primeiros exemplos de aplicação geológica da metodologia integrada U-Pb e Lu-Hf em zircão por LA-ICP-MS foram desenvolvidos em amostras provenientes da região sudeste do Escudo das Guianas no Brasil (Bloco arqueano Amapá) e na sua fronteira com a Guiana Francesa (Paleoproterozoico), sendo apresentados em 2015. Na sequência (2017-2020), vários outros trabalhos importantes foram realizados nessa mesma região (Bloco arqueano Amapá e domínios riacianos Lourenço e Carecuru) e em outras áreas do leste do Cráton Amazônico, como no nordeste do Escudo Brasil Central (2019 a 2023; Província Carajás e Domínio Bacajá) e no embasamento arqueano e paleoproterozoico do Cinturão Araguaia (2017-2023). Os métodos U-Pb em monazita e titanita por LA-ICP-MS foram implantados mais recentemente (2022-2023) e já tem trazido avanços significativos para o entendimento de eventos metamórficos e magmáticos registrados nessas mesmas áreas.

Palavras-chave: U-Pb, Lu-Hf, minerais acessórios, LA-ICP-MS, Cráton Amazônico

1. INTRODUÇÃO

O Laboratório de Geologia Isotópica da UFPA (Pará-Iso) entrou em funcionamento em 1983 com a instalação de um espectrômetro de massa de ionização termal (TIMS), modelo *VG-54E*, adquirido em 1981. Durante as suas primeiras três décadas de funcionamento, os pesquisadores do Pará-Iso se dedicaram na implementação dos principais métodos isotópicos empregados em laboratórios e centros de pesquisa mundo afora e passíveis de serem aplicados com a utilização dos espectrômetros tipo TIMS. Assim, foram desenvolvidos os métodos Rb-Sr, Pb-Pb e Sm-Nd em minerais e rochas total, além dos métodos U-Pb em zircão (titanita, apatita e rutilo) por diluição isotópica e de evaporação de Pb em zircão por TIMS. Tendo sempre o Cráton Amazônico e terrenos adjacentes como alvos de aplicação e estudo, especialmente aqueles voltados para o entendimento sobre a formação e evolução da crosta continental. Na última década, com a aquisição e instalação de dois espectrômetros de massa com fonte plasma e sistema de ablação a laser (LA-ICP-MS), o

laboratório iniciou uma nova fronteira nas análises isotópicas, com a possibilidade de realizar análises pontuais (*in situ*) em minerais, dentre vários outros campos e áreas de atuação possíveis. Assim, os métodos isotópicos U-Pb e Lu-Hf em zircão (Milhomem Neto et al., 2017a,b) e U-Pb em monazita (Ferreira, 2022) e titanita (Pinto, 2023) foram colocados em rotina no Pará-Iso. Neste trabalho será apresentado um resumo dos primeiros exemplos de aplicação geológica dos métodos isotópicos supracitados e suas principais implicações para a evolução crustal na Amazônia Oriental.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

As análises isotópicas U-Pb e Lu-Hf *in situ* em zircão são realizadas no Pará-Iso utilizando-se um espectrômetro de massa multicoletor de alta resolução MC-ICP-MS da marca *Thermo Finnigan* modelo *Neptune*, equipado com nove coletores Faraday e seis contadores de íons, que podem ser combinados em diversas configurações. Uma microssonda a laser *Nd:YAG 213* nm modelo *LSX-213 G2* da marca *CETAC* é acoplada ao *Neptune*. As configurações, bem como os parâmetros instrumentais do laser e ICP-MS e todos os procedimentos analíticos são detalhados em Milhomem Neto et al. (2017a,b) e Milhomem Neto e Lafon (2019). Para o método U-Pb em monazita por LA-ICP-MS são utilizados os mesmos equipamentos e todos os procedimentos experimentais estão descritos em Ferreira (2022). As análises U-Pb em titanita são realizadas com um ICP-MS quadrupolo (Q-) modelo *iCAP-Q* da marca *Thermo Fischer Scientific*, equipado com a mesma sonda de ablação a laser descrita acima. A metodologia completa está detalhada em Pinto (2023).

3. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO EM ESTUDOS DE EVOLUÇÃO CRUSTAL

Os primeiros exemplos de aplicação geológica da metodologia integrada U-Pb e Lu-Hf em zircão por LA-ICP-MS foram desenvolvidos em amostras provenientes da região sudeste do Escudo das Guianas no Brasil (Bloco arqueano Amapá) e sua fronteira com a Guiana Francesa (Paleoproterozoico), tendo sido apresentados durante o 14º Simpósio de Geologia da Amazônia (Milhomem Neto et al. 2015). Na sequência, com a consolidação destes métodos no Pará-Iso e com a recente implantação das análises U-Pb em monazita e titanita por LA-ICP-MS, vários outros trabalhos tem sido realizados no leste do Cráton Amazônico (Sudeste do Escudo das Guianas e nordeste do Escudo Brasil Central) e no Cinturão Araguaia.

3.1. SUDESTE DO ESCUDO DAS GUIANAS

Os principais trabalhos desenvolvidos na região sudeste do Escudo das Guianas foram direcionados para o entendimento sobre a evolução crustal arqueana de rochas do embasamento do Bloco Amapá (Milhomem Neto e Lafon, 2019; Pinto et al., 2019) e sobre a influência dessa crosta arqueana na formação das rochas paleoproterozoicas (Riaciano) dos domínios Lourenço e Carecuru durante a orogenia Transamazônica (Milhomem Neto e Lafon, 2020; Vianna et al. 2020). Os dados isotópicos U-Pb e Lu-Hf em zircão obtidos foram fundamentais para a definição e/ou reavaliação da idade dos principais episódios magmáticos, para o estabelecimento dos períodos de extração mantélica e formação de crosta continental, bem como para constatar o predomínio dos processos de retrabalhamento crustal

identificados. Tais informações corroboraram para um melhor entendimento sobre o contexto geodinâmico de formação e fontes dos magmas. Além disso, os novos dados U-Pb em monazita (Ferreira, 2022, Milhomem Neto et al., 2022) e titanita (Pinto, 2023) obtidos para rochas metamórficas de alto grau da zona de transição entre o Bloco Amapá e o Domínio Lourenço (Migmatito do Complexo Tartarugal Grande) e do embasamento arqueano do Bloco Amapá (ortognaisses do Complexo Guianense), respectivamente, trouxeram idades robustas para o evento metamórfico do final do Riaciano e início do Orosiriano na região central do Amapá.

3.2. NORDESTE DO ESCUDO BRASIL CENTRAL

A Província Carajás e o Domínio Bacajá, no nordeste do Escudo Brasil Central, tem sido os principais terrenos em que a sistemática U-Pb e Lu-Hf em zircão vem sendo aplicada. Um dos primeiros trabalhos foi apresentado por Nogueira et al. (2019) que obtiveram os primeiros dados deste tipo para o magmatismo TTG precoce (Complexo Arco Verde) do sul do Domínio Rio Maria na região de Inajá. Os dados U-Pb obtidos definiram a idade de cristalização mesoarqueana (2,98 Ga) para esses granitoides e a assinatura de Hf demonstrou derivação mantélica (juvenil) a partir de fontes meso-paleoarqueanas (3,0 a 3,3 Ga). Já para o Domínio Carajás, Silva (2022) apresentou dados isotópicos Lu-Hf em zircão (obtidos no Pará-Iso) para granitoides mesoarqueanos da região de Ourilândia do Norte. Integrados a dados geológicos, geoquímicos e geocronológicos (U-Pb em zircão), permitiram uma redefinição da estratigrafia local e um aprofundamento sobre a natureza das fontes magmáticas. As assinaturas isotópicas de Hf indicaram extração de crosta a partir do manto no Paleoarqueano. O Domínio Bacajá compreende terrenos mesoarqueanos e siderianos retrabalhados durante o ciclo transamazônico. Para a sua porção nordeste, Magalhães et al. (2023) apresentaram os primeiros dados combinados U-Pb e Lu-Hf em zircão obtidos para um ortognaisse arqueano (Complexo Aruanã) e granitoides riacianos (Complexo Bacajaí, Suíte Intrusiva Arapari e Suíte Intrusiva Jorge João). Os dados permitiram definir os episódios magmáticos (Neoarqueano e Riacianos) e as assinaturas isotópicas de Hf, que indicaram predomínio dos processos de retrabalhamento crustal de fontes mesoarqueanas para o ortognaisse e derivação mantélica com assimilação de crosta arqueana (mistura) para a gênese dos granitoides riacianos.

3.3. CINTURÃO ARAGUAIA

O embasamento arqueano e paleoproterozoico do Cinturão Araguaia tem sido estudado e reavaliado à luz dos novos dados isotópicos U-Pb e Lu-Hf em zircão por LA-ICP-MS. Os ortognaisses das estruturas dômicas de Lontra, Cocalândia, Colméia e Cantão foram selecionados por Dias et al. (2017) para a datação U-Pb em zircão junto com a termocronologia por traço de fissão em zircão para identificar denudação e processos de aquecimento e resfriamento. Três episódios magmáticos mesoarqueanos (2,83, 2,87 e 2,90 Ga) e um paleoproterozoico (1,84 Ga) foram bem definidos, ratificando os estudos prévios por outras metodologias. Assis et al. (2021), objetivando estabelecer uma correlação entre essas rochas do embasamento do Cinturão Araguaia com aquelas da porção sudeste do Cráton Amazônico, empreenderam análises integradas U-Pb e Lu-Hf em zircão de sete amostras de ortognaisses e granitoides das porções norte e sul do Cinturão Araguaia. As assinaturas de Hf

mostraram uma clara distinção entre as rochas do embasamento norte e sul do Cinturão, indicando derivação a partir de fontes com idades distintas. Além disso, apontam para uma similaridade com as assinaturas das rochas da Província Carajás, tanto em idades de cristalização quanto em assinatura isotópica de Hf. Portanto, as rochas do embasamento que afloram no segmento norte do Cinturão Araguaia podem representar porções do Cráton Amazônico adjacente. Gorayeb et al. (2023) realizaram um estudo sobre a evolução riaciana de rochas metamórficas de alto grau do Complexo Granulítico de Porto Nacional-TO, com base em dados geocronológicos U-Pb-Hf em zircão e U-Pb em monazita. Os autores definiram as idades dos protólitos de ortogranulitos a partir da análises de núcleos de zircão (2,16 Ga), enquanto a borda forneceu a idade do metamorfismo (2,09 Ga). Idades obtidas em monazitas provenientes de paragnaisses aluminosos da mesma unidade indicaram metamorfismo entre 2,09 e 2,10 Ga, concordante com as idades obtidas em zircão para o evento de metamorfismo. As assinaturas isotópicas de Hf obtidas a partir de uma amostra de enderbito mostraram um amplo intervalo de idades-modelo e valores de épsilon Hf, denunciando processos de mistura entre fontes mantélicas e crustais.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os métodos isótopicos pontuais em rotina hoje no Pará-Iso e suas aplicações tem trazido grandes avanços para o entendimento dos processos de evolução crustal dos diferentes terrenos da Amazônia Oriental, como apresentados aqui brevemente. Apesar dos vários exemplos mostrados e considerando-se a vastidão do desconhecido território Amazônico, é ainda latente a carência de estudos detalhados com a abordagem voltada para a obtenção desse tipo dados. Assim, como o único laboratório de Geologia Isotópica em funcionamento na região norte do Brasil, o Pará-Iso tem contribuído ao longo dos seus 40 anos de existência com a comunidade geocientífica disponibilizando todos esses métodos isotópicos.

Este trabalho é uma contribuição do Programa de Apoio a Núcleos de Excelência - PRONEX/FAPESPA/CNPq 062/2020, intitulado “Geoquímica Isotópica Aplicada a Estudos Ambientais, Paleoambientais, Metalogenia e Evolução Crustal.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Assis, C.R.F., Moura, C.A.V., Milhomem Neto, J.M., Gorayeb, P.S.S., Dias, A.N.C., 2021. Zircon U-Pb geochronology and Lu-Hf isotope systematics of the Araguaia Belt basement rocks: evidence of links with the southeastern Amazonian Craton, Brazil. Precambrian Research 356, 106090.

Dias, A.N.C., Moura, C.A.V., Milhomem Neto, J.M., Chemale Jr., F., Girelli, T.J., Masuyama, K.M., 2017. Geochronology and thermochronology of the gneisses of the Brasiliano/Pan-African Araguaia Belt: Records of exhumation of West Gondwana and Pangea break up. Journal of South American Earth Sciences 80, 174–191.

Ferreira, D.P.A. 2022. Implantação da metodologia U-Pb em monazita por LA-ICP-MS no Laboratório de Geologia Isotópica da UFPA (Pará-Iso): aplicação em rochas de alto grau metamórfico da região central do Amapá, Sudeste do Escudo das Guianas (Master’s Thesis). Federal University of Pará-Brazil, 121 p (in Portuguese).

Gorayeb, P.S.S., Galarza, M.A., Menezes, E.O. 2023. Rhyacian evolution of high-grade metamorphic rocks of the Porto Nacional granulite complex, based on geochronological data U–Pb-Hf in zircon and U–Pb in monazite. Journal of South American Earth Sciences 121, 104093.

Magalhães, L.B., Macambira, M.J.B., Macambira, E.M.B. Ricci, P.S.F. 2023. Crustal growth in the northeast portion of the Rhyacian Bacajá domain, SE Amazonian craton, based on U-Pb, Lu-Hf, and Sm-Nd data. Brazilian Journal of Geology 53(2), 20220068.

Milhomem Neto, J.M., Lafon, J.M., Galarza, M.A., 2015. Lu-Hf em zircão por LA-MC-ICP-MS no laboratório PARÁ-ISO/UFPA: metodologia e exemplo de aplicação. In: 14º Simpósio de Geologia da Amazônia. Marabá. Anais.

Milhomem Neto J.M., Lafon J.M., Galarza M.A. 2017a. Lu-Hf em zircão por LA-MC-ICP-MS no laboratório Pará-Iso (UFPA): metodologia e primeiro exemplo de aplicação na porção sudeste do Escudo das Guianas, estado do Amapá. Contribuições à Geologia da Amazônia 10, 195-208.

Milhomem Neto J.M., Lafon J.M., Galarza M.A., Moura C.A.V. 2017b. U-Pb em zircão por LA-MC-ICP-MS no laboratório Pará-Iso (UFPA): metodologia e aplicação na porção sudeste do Escudo das Guianas. Contribuições à Geologia da Amazônia 10, 333-346.

Milhomem Neto J.M., Lafon J.M. 2019. Zircon U-Pb and Lu-Hf isotope constraints on Archean crustal evolution in Southeastern Guyana Shield. Geoscience Frontiers, 10: 1477-1506.

Milhomem Neto J.M., Lafon J.M. 2020. Crustal growth and reworking of Archean crust within the Rhyacian domains of the southeastern Guiana Shield, Brazil: Evidence from zircon U-Pb-Hf and whole-rock Sm-Nd geochronology. Journal of South American Earth Sciences, 103: 102740.

Milhomem Neto, J.M., Lafon, J.M., Ferreira, D.P.A., Miranda, S.S., Dantas, E.L. 2022. High-grade metamorphism in the central region of Amapá, Northern Brazil: age constraints from in situ U-Pb dating of monazite and zircon. In: XII Interguiana Geological Conference, Georgetown, Guyana. The Tectonics & Resource Potential of NE South America.

Nogueira, B.K.C., Lafon, J.M., Milhomem Neto, J.M. 2019. Geocronologia U-Pb e Lu-Hf do granitoide mesoarqueano Arco Verde, região de Inajá, sul do Pará: implicações para a evolução crustal do Domínio Rio Maria, Província Carajás. In: 16º Simpósio de Geologia da Amazônia, Manaus-AM. Geociências e Geopolítica na Amazônia. Belém-PA: SBG-NO.

Pinto, J.A.E; Milhomem Neto, J. M.; Lafon, J.M. 2019. Dados Isotópicos U-Pb e Lu-Hf em zircão de leucomonzogranito da porção leste do Bloco Amapá – AP: implicações para a evolução crustal arqueana. In: 16º Simpósio de Geologia da Amazônia, Manaus-AM. Geociências e Geopolítica na Amazônia. Belém-PA: SBG-NO.

Pinto, J.A.E. 2023. U–Pb em titanita por LA-ICP-MS no Laboratório Pará-Iso (UFPA): metodologia e aplicação em rochas do sudeste do Escudo das Guianas e Província Borborema (Master's Thesis). Federal University of Pará-Brazil, 107 p (in Portuguese).

Silva, L.R. 2022. Petrogênese e história tectônica dos granitoides mesoarqueanos de Ourilândia do Norte (PA) – Província Carajás (Ph.D. Dissertation). Federal University of Pará, 302 p.

Vianna S. Q., Lafon J. M., Milhomem Neto J. M., Silva D. P. B., Barros C. E. M. 2020. U-Pb geochronology, Nd-Hf isotopes, and geochemistry of Rhyacian granitoids from the Paleoproterozoic Lourenço domain (Brazil), southeastern Guiana Shield. Journal of South American Earth Sciences, 104: 102937.