



GEOCRONOLOGIA U-Pb DAS ROCHAS HOSPEDEIRAS DO DEPÓSITO Cu-Au SANTA LÚCIA, DOMÍNIO CARAJÁS, PARÁ

Salgado, P. V. ¹; Moreto, C. P. N. ¹; Hunger, R. B. ¹

¹ Instituto de Geociências UNICAMP

Resumo

O Domínio Carajás, no sudeste do Cráton Amazônico, concentra uma ampla variedade de depósitos cobre-ouro formados no Neoarqueano (ca. 2,7 Ga e 2,57 Ga) e Paleoproterozóico (ca. 1,88 Ga), atualmente divididos em sistemas óxido de ferro cobre-ouro (IOCG) e Cu-polimetálicos. O depósito Cu-Au Santa Lúcia é um membro dos sistemas Cu-polimetálicos localizado na porção sudeste do Domínio Carajás, sendo hospedado por uma rocha subvulcânica de composição riolítica, por sua vez truncada por intrusões pegmatíticas mais jovens. Dados geocronológicos recentes obtidos através de análises U-Pb em cristais de monazita da zona mineralizada do depósito Santa Lúcia demonstram que sua gênese ocorreu no Neoarqueano em 2684 ± 51 Ma. Tal fato sugere que a formação de sistemas Cu-Au sem conteúdo expressivo de óxidos de ferro no Domínio Carajás (e.g., Breves, Estrela), até então atribuída exclusivamente a circulação regional de fluidos produzidos durante o evento de magmatismo granítico Paleoproterozóico (ca. 1.88 Ga) tipo-A registrado nesse domínio, também deve ser estendida para o Neoarqueano. Nesse contexto, e com base em relações de campo e no sequenciamento temporal dos estágios de alteração hidrotermal do depósito Santa Lúcia, é de se esperar que o corpo pegmatítico caracterizado em sua área possua idade Neoarqueana. Contudo, a ausência de dados geocronológicos desse litotipo, assim como da rocha subvulcânica, impede a melhor contextualização e compreensão de suas origens dentro do contexto evolutivo do depósito. Neste sentido, o objetivo inicial do projeto de iniciação científica aqui apresentado era, através de análises geocronológicas pelo método U-Pb de cristais de zircão em LA-ICP-MS, definir a idade de cristalização das rochas hospedeiras do depósito Santa Lúcia. No entanto, devido à suspensão das atividades presenciais na UNICAMP em função da pandemia do novo coronavírus (Resolução GR 24/2020, de 16/03/2020), o preparo das amostras selecionadas para geocronologia, bem como as etapas analíticas consequentes, não pôde ser concluído. Assim, o presente trabalho apresenta os resultados parciais obtidos até o momento de interrupção da pesquisa laboratorial, além de fornecer uma discussão teórica acerca de pontos relevantes associados a técnica de datação U-Pb em zircão (e.g., fundamentação teórica, desafios interpretativos etc.), como complementação do projeto.

Palavras-chave: Domínio Carajás, Depósitos Cuproauríferos, Santa Lúcia, Geocronologia U-Pb.

1. Introdução e Síntese da Geologia Regional

A Província Carajás representa um dos mais bem preservados núcleos cratônicos do mundo. Dentre os domínios que a compõem, o Domínio Carajás hospeda a maior concentração conhecida de depósitos cobre-ouro, atualmente agrupados em sistemas óxido de ferro cobre-ouro (IOCG) e Cu-polimetálicos (Tallarico *et al.*, 2004; Xavier *et al.*, 2012). Os dados geocronológicos atualmente disponíveis indicam que os depósitos IOCG (e.g. Igarapé-Bahia/Alemão, Sossego, Salobo; Tallarico *et al.*, 2005; Monteiro *et al.*, 2008; Melo *et al.*, 2016) foram formados durante múltiplos eventos hidrotermais mineralizantes no Neoarqueano (2,7 Bae 2,57 Ga) e Paleoproterozóico (ca. 1,90-1,87 Ga; Moreto *et al.*, 2015b). Em contrapartida, a formação dos sistemas Cu-polimetálicos (e.g. Breves, Estrela; Tallarico *et al.*, 2004; Volp, 2005) têm sido particularmente relacionada à circulação regional de fluidos produzidos durante o evento de magmatismo granítico Paleoproterozóico (ca. 1.88 Ba) tipo-A registrado nesse domínio (Tallarico *et al.*, 2004; Xavier *et al.*, 2012).

O Domínio Carajás compreende rochas do embasamento Mesoarqueanas (ca. 3,0-2,83 Ga) que incluem gnaisses de composição tonalítica-trondhjemitica e migmatitos do Complexo Xingu, além de granulitos máficos (i.e., Ortogranulito Chicrim-Cateté) e granitóides diversos (e.g., Granito Canaã dos Carajás, Tonalito Bacaba etc.; Moreto *et al.* 2011, 2015a,b; Feio *et al.* 2013). Sobrepostas ao embasamento encontram-se as seqüências metavulcano-sedimentares (*greenstone belts*) Neoarqueanas do Supergrupo Itacaiúnas (DOCEGEO, 1988) e do Grupo Rio Novo (Hirata *et al.*, 1982) que, por sua vez, são recobertas por uma cobertura siliciclástica arqueana não metamorfizada associada a Formação Águas Claras (Nogueira *et al.*, 1995).

São definidos três eventos principais de magmatismo granítico no Domínio Carajás, em 2,76 – 2,73 Ga (e.g., granitos Estrela e Planalto; Feio *et al.*, 2013), 2,57 Ga (e.g. granitos Old Salobo, Itacaiúnas e GT-46; Machado *et al.*, 1991; Souza *et al.*, 1996; Toledo *et al.*, 2019) e em 1,88 Ga (e.g., granitos Central de Carajás, Pojuca e Breves; Machado *et al.* 1991; Tallarico *et al.*, 2004). A estruturação geral do Domínio Carajás é demarcada por três principais sistemas de cisalhamento WNW-ESE: Carajás e Cinzento, ao norte, e Canaã ao sul. Tais estruturas são produto de um encurtamento regional de direção NNE-SSW, também responsável pelo desenvolvimento de foliações com trend E-W, amplamente reconhecidas nesse domínio (Pinheiro *et al.*, 2013).

Nesse contexto, o depósito Cu-Au Santa Lúcia representa um membro dos sistemas Cu-polimetálicos localizado na porção sudeste do Domínio Carajás, próximo a região da Serra do Rabo. De acordo com (Hunger *et al.*, *in review*), o depósito é hospedado por uma rocha subvulcânica de composição riolítica, associada ao Grupo Grão Pará, que por sua vez é truncada por um corpo pegmatítico mais jovem.

A presença de intrusões pegmatíticas na área do depósito Santa Lúcia deixa clara a contribuição de fluidos magmáticos para a evolução de seu sistema hidrotermal. Nesse sentido, e considerando a idade de sua mineralização (2684 ± 51 Ma, U-Pb em monazita; Hunger *et al.*, *in review*) sugere-se que sistemas magmático-hidrotermais reduzidos possam ter sido formados durante o Neoarqueano, sendo contemporâneos aos sistemas IOCG de mesma idade. Contudo, embora a partir de relações de campo e do sequenciamento temporal dos estágios de alteração hidrotermal seja possível estabelecer o momento relativo de introdução do corpo pegmatítico, a ausência de dados geocronológicos desse litotipo impede a melhor contextualização e compreensão de sua origem dentro do contexto evolutivo do depósito.

A proposta original do projeto de iniciação científica visava, portanto, definir a idade de cristalização das rochas hospedeiras do depósito Santa Lúcia, buscando estabelecer a relação temporal entre sua formação e a gênese da mineralização, dentro do contexto evolutivo de seu sistema hidrotermal. Contudo, devido aos desdobramentos da pandemia do SARS-CoV-2 e, conforme a suspensão das atividades presenciais na UNICAMP (Resolução GR 24/2020, de 16/03/2020, Gabinete do Reitor), o acesso ao Instituto de Geociências e aos laboratórios necessários para execução do projeto foi vetado. Tal fato afetou diretamente o desenvolvimento da segunda etapa do projeto, que não pôde ser concluído conforme o cronograma inicial proposto.

Em virtude da não obtenção dos dados geocronológicos necessários para formular uma discussão apropriada para a pesquisa, o presente projeto apresenta somente os resultados parciais obtidos até sua paralização, além de fornecer uma discussão teórica acerca do método de datação U-Pb, suas aplicações e desafios para a datação de rochas associadas a sistemas minerais.

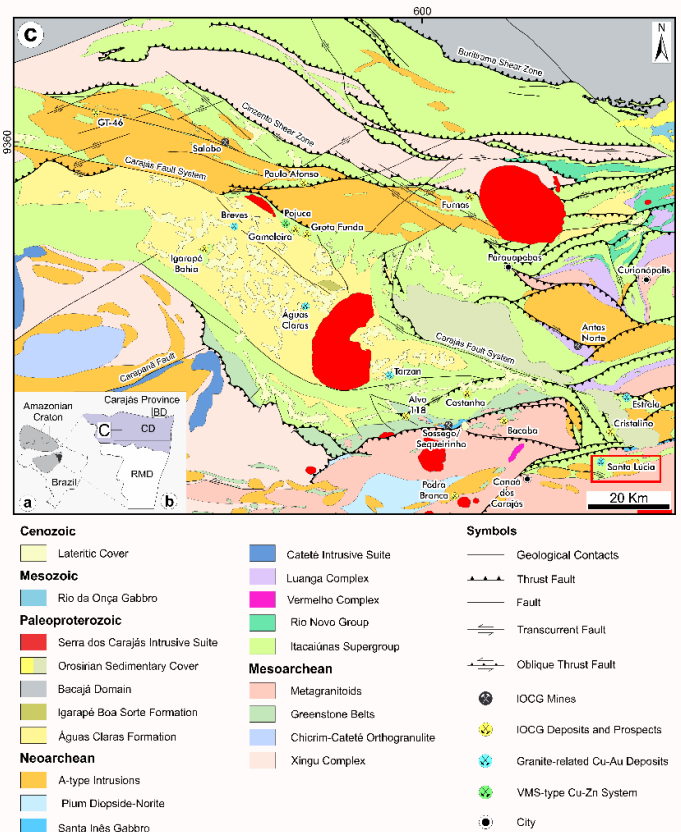


Figura 1: Mapa geológico simplificado da porção setentrional da Província Mineral de Carajás, indicando a localização dos principais depósitos minerais do Domínio Carajás, com destaque para o depósito Santa Lúcia (retângulo vermelho) (modificado de Costa *et al.*, 2016).



2. Metodologia

2.1 Revisão Bibliográfica

O estudo contou com uma revisão bibliográfica, realizada desde o início deste projeto de pesquisa, que enfatizou publicações acerca da metalogênese e geocronologia de sistemas Cu-Au do Domínio Carajás, como o depósito Santa Lúcia, bem como relacionadas ao método de datação U-Pb em zircão.

2.2 Estudos Petrográficos

A partir de amostras de testemunho de sondagem dos litotipos reconhecidos no depósito Santa Lúcia, foram confeccionadas quatro lâminas delgadas-polidas para estudos petrográficos em microscópio óptico convencional, sendo duas da rocha subvulcânica e duas do pegmatito.

2.3 Preparação de amostras para as análises U-Pb em zircão

Para a etapa de geocronologia U-Pb foram selecionadas amostras de dois testemunhos (PPC-SLUC-FD035 e PPC-SLUC-FD014) em quatro intervalos de profundidade distintos, contemplando dois intervalos para a rocha subvulcânica e dois para o pegmatito. As amostras selecionadas foram britadas e moídas a fim de atingir a granulometria adequada para a execução das análises geocronológicas. Posteriormente, foi realizado o bateamento manual das amostras já moídas e, a partir do concentrado final de bateia, os minerais magnéticos (e.g., magnetita) foram removidos com o auxílio de ímãs de Nd. Por fim, o concentrado foi levado a lupa binocular, para separação manual dos cristais de zircão. Devido a interrupção da pesquisa, as etapas subsequentes das análises geocronológicas, que devem incluir a confecção de mounts, o imageamento dos cristais de zircão selecionados por catodoluminescência e, por fim, a datação pelo método U-Pb em LA-ICP-MS (Laser Ablation – Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry), não puderam ser concluídas. Todas as etapas finalizadas foram efetuadas no Laboratório de Preparação de Amostras do IG-UNICAMP.

3. Fundamentação teórica

3.1 Geocronologia U-Pb em LA-ICP-MS

A técnica de LA-ICP-MS é amplamente utilizada na geocronologia devido a sua alta resolução e baixos limites de detecção, que permitem a quantificação da concentração elementar em partes por milhão (ppm) e a obtenção de idades isotópicas precisas e acuradas (Walder *et al.*, 1993; Dickin, 2005; Kosler, 2007; Allègre, 2008; Thomas, 2013). Além disso, necessita de pouca energia e, se comparada a outras técnicas, possui um baixo custo (Houk, 1986; Machado & Simonetti, 2001; Thomas, 2013).

De modo geral, o processo de obtenção de razões isotópicas e idades por LA-ICP-MS se dá através do sistema de ablação, no qual um laser (*light amplification by stimulated emission of radiation*) composto por fótons de alta intensidade, normalmente na faixa do espectro ultravioleta, interage com uma amostra sólida (e.g., cristal de zircão) e promove sua ablação dentro de uma pequena câmara à pressão atmosférica (Kosler, 2007). Este sistema possui quatro partes: i) o laser, que gera um feixe unidirecional de prótons de alta energia; ii) sistema de entrega do feixe de laser, capaz de modificar a energia, formato e diâmetro do feixe, dirigindo-o para a superfície de amostragem; iii) câmara de ablação, onde o feixe interage com a amostra sólida e produz um aerossol de partículas; e; iv) um sistema de transporte para a transferência do aerossol para o ICP (Dickin, 2005; Kosler, 2007; Thomas, 2013). Após a produção do aerossol, um fluxo de gás de baixa densidade e alta condutividade térmica e potencial de ionização (e.g., He) transporta o aerossol ao ICP (Figura 2) (Kosler, 2007).

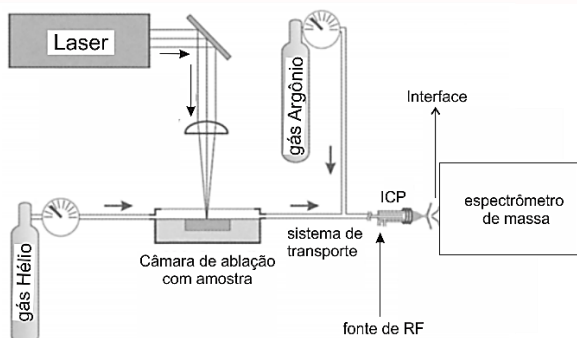


Figura 2: Esquema ilustrativo da configuração geral do sistema de LA-ICP-MS (Modificado de Kosler, 2007).

No ICP, o aerossol é levado à tocha de plasma horizontal para a formação de um plasma de íons positivamente carregados, através do aumento da temperatura a

partir da transmissão de radiofrequências (RF), que por sua vez induzem correntes adicionais em um fluxo de gás argônio ionizado (Houk, 1986; Dickin, 2005; Thomas, 2013). A temperatura extrema do plasma e o uso de analisadores de quatro polos, ou mais, na rocha, permite a separação dos íons produzidos a partir de suas massas atômicas, de forma a assegurar a monoatomicidade do feixe de íons (condição ideal para análise quantitativa no espectrômetro de massa; Dickin, 2005; Thomas, 2013). Em seguida, esses íons são direcionados ao espectrômetro através de uma bomba de vácuo mecânica que contém uma série de lentes eletrostáticas, chamada de ótica de íons (*ion optics*), na região de interface entre o ICP e o espectrômetro de massa (Houk, 1986; Thomas, 2013). Posteriormente, o feixe de íons desloca-se no interior do espectrômetro de massa, onde íons de uma massa e carga particular passam pelo detector de íons (Thomas, 2013). Nesta etapa final, o detector converte os íons em elétrons e produz um sinal elétrico, que é então processado e novamente convertido, dessa vez em concentração de analito (feixe de íons), por um sistema de tratamento de dados que utiliza padrões de calibração de ICP-MS (Thomas, 2013).

Esta técnica apresenta resultados quantitativos de alta qualidade e confiabilidade (Houk, 1986; Walder *et al.*, 1993; Dickin, 2005; Kosler, 2007; Thomas, 2013), embora requeira a padronização externa e a aplicação de correções matemáticas para o fracionamento elementar do Pb e U e para possíveis erros de discriminação de massas isotópicas. Além disso, necessita de um número considerável de amostras para garantir uma maior confiabilidade dos dados (Kosler, 2007), e procedimentos exigentes de manutenção e limpeza dos equipamentos (Machado & Simonetti, 2001).

O zircão ($ZrSiO_4$) é o principal mineral utilizado em técnicas de datação do sistema U-Pb (Corfu *et al.*, 2003; Dickin, 2005), como o LA-ICP-MS. Sua estrutura cristalina permite a substituição do zircônio pelo urânio, aceitando, em contrapartida, quantidades pouco significativas de chumbo ao longo do seu processo de cristalização (Machado & Simonetti, 2001). Tal fato viabiliza a quantificação das perdas ou ganhos desses elementos no cristal e, conseqüentemente, sua utilização como geotermômetro (Corfu *et al.*, 2003). Adicionalmente, embora o zircão seja extremamente resistente a processos magmáticos, metamórficos e à erosão (Corfu *et al.*, 2003; Allègre, 2008), é necessário observar as características físicas do cristal, inclusões e fraturas (Machado & Simonetti, 2001; Fornelli *et al.*, 2015) para definir o *spot* ideal da análise e, assim, obter um grau de confiabilidade maior dos dados.

A obtenção dos dados geocronológicos em zircão se baseia no decaimento dos isótopos de U^{238} e U^{235} para Pb^{206} e Pb^{207} , respectivamente. Portanto, a partir das razões isotópicas Pb^{206}/U^{238} e Pb^{207}/U^{235} é possível estabelecer a idade do cristal analisado em LA-ICP-MS (Machado & Simonetti, 2001; Dickin, 2005) através da confecção de uma isócrona conhecida como Diagrama da Concórdia (Figura 3). Definida por Wetherill (1956), a concórdia representa um procedimento gráfico para o cálculo rápido de idades do decaimento isotópico U-Pb, resultantes de múltiplos episódios de fracionamento destes elementos. Segundo o autor, quando as razões Pb^{206}/U^{238} e Pb^{207}/U^{235} apresentam o mesmo valor, as idades correspondentes são concordantes e definem a linha de concórdia. Neste caso, as amostras de zircão representariam sistemas fechados, sem perda ou ganho de U ou Pb em sua estrutura desde o momento da cristalização. As idades discordantes, por sua vez, definem a reta da discórdia, que reflete a perda de Pb (Wetherill, 1956). A reta da discórdia intercepta a curva da concórdia e define dois interceptos, superior e inferior. O intercepto superior (T0) representa a idade de formação do conjunto de cristais amostrado, enquanto o intercepto inferior (T1) corresponde a idade de um evento marcado pela perda de Pb. Esta última deve ser avaliada com muita cautela, em relação ao seu significado e representatividade geocronológica (Wetherill, 1956; Dickin, 2005; Allègre, 2008).

Para que as idades calculadas a partir das razões sejam iguais, é necessário que: i) as concentrações de U e Pb, e elementos intermediários, se mantenham constantes durante a cristalização do zircão; ii) sejam feitas correções apropriadas para a concentração inicial dos isótopos de chumbo; iii) haja uma correta utilização das constantes de decaimento, bem como das análises químicas; e; iv) sejam efetuados procedimentos adequados de manutenção e limpeza do equipamento analítico (Wetherill, 1956; Machado & Simonetti, 2001). Caso alguma dessas condições não seja atendida, as idades serão discordantes ou “acidentalmente” concordantes (Wetherill, 1956), representando assim a abertura do sistema isotópico U-Pb e, conseqüentemente, modificações nas concentrações de U e Pb no cristal.

O procedimento de obtenção e interpretação dos dados geocronológicos envolve ainda a avaliação dos erros estatísticos obtidos através do LA-ICP-MS para confecção da concórdia. Dentre eles, destacam-se o *Mean Square Weighted Deviation* (MSWD) e o rho (ρ). O MSWD é utilizado para obter o melhor ajuste para o cálculo de regressão linear que gera a concórdia, sendo calculado através dos desvios padrões gerados a partir dos resultados individuais das razões Pb^{206}/U^{238} e Pb^{207}/U^{235} para cada cristal de zircão (Wendt & Carl, 1991). Quando os desvios padrões estão dentro do erro analítico, o MSWD deve apresentar um valor próximo ou menor que 1, que representa a ausência de dispersão adicional causada pela análise de amostras não homogêneas ou de comportamentos imprevisíveis do equipamento analítico (Wendt & Carl, 1991; Linacre, 2002; Black *et al.*, 2003). Através do MSWD, constroem-se as



elipses de erro que indicam a incerteza das coordenadas dos eixos na concórdia e permitem, assim, sua melhor visualização gráfica (NSPS, 2016).

O segundo erro estatístico é o coeficiente de correlação (ρ) entre duas razões isotópicas, calculado a partir do quociente da covariância e do produto dos desvios padrões (Schmitz & Schoene, 2007). O ρ garante a reprodutibilidade dos dados e é utilizado para definir os limites de confiabilidade dos dados.

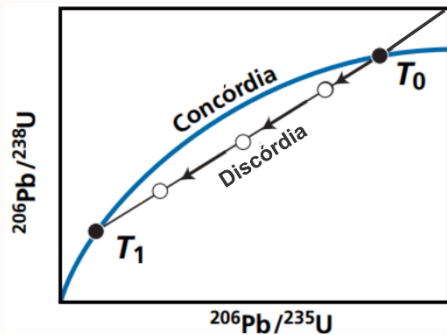


Figura 3: Diagrama da Concórdia ilustrativo para o sistema U-Pb no modelo de Wheterill. As setas na discórdia indicam a perda de Pb a partir da idade de cristalização dos cristais representada pelo intercepto superior (T0) (Modificado de Allègre, 2008).

3.2 Desafios da análise U-Pb em zircão de rochas graníticas associadas a sistemas hidrotermais: exemplos na Província Carajás

A análise geocronológica de cristais de zircão através do sistema U-Pb deve considerar as características químicas e físicas do mineral para uma avaliação eficiente. Diversos autores ressaltam que a morfologia externa e as texturas internas do cristal são extremamente variáveis e podem refletir os eventos relevantes da cristalização, ou recristalização, magmática, metamórfica, hidrotermal ou erosiva (e.g. Machado & Simonetti, 2001; Corfu *et al.*, 2003; Allègre, 2008; Fornelli *et al.*, 2015). Portanto, é necessário aliar as características intrínsecas dos cristais de zircão (composição química, morfologia, texturas, fraturas e inclusões) aos contextos geológicos de sua formação e/ou associados a eventos posteriores de alteração/recristalização.

Os cristais de zircão de rochas ígneas costumam conter uma textura oscilatória de crescimento bem preservada, evidenciando os processos e intensidade de diferenciação dos corpos ígneos, bem como a variação nos conteúdos de Si e Zr na estrutura do mineral, bem como de elementos traços, como o U, P, Th, Y, ETRs, entre outros (Benisek & Finger, 1993). Fornelli *et al.* (2015), destaca três texturas de zonamento muito comuns: i) zonamento oscilatório magmático (Figura 4A), que ocorre através da cristalização de um novo cristal de zircão em volta do cristal primário; ii) zonamento magmático ao redor de núcleos de xenocristais de zircão idiomórficos, oriundos da incorporação da rocha encaixante no magma, ou como fase residual da fusão do material fonte (Figura 4B) e; iii) texturas secundárias (Figura 4C) produzidas através de perturbações no zonamento oscilatório magmático, devido a alterações pós magmáticas relacionadas a adição de fluidos magmáticos aquosos no sistema ou eventos metamórficos de médio a alto grau (Corfu *et al.*, 2003; Fornelli *et al.*, 2015).

Corfu *et al.* (2003) e outros autores (e.g., Pupin, 1980; Benisek & Finger, 1993) destacam a morfologia dos cristais de zircão como um importante fator para a geocronologia, uma vez que reflete sua composição, bem como a velocidade e temperatura de cristalização do mineral no magma. O sistema tetragonal do zircão permite o crescimento do cristal em formas prismáticas ($\{100\}$ vs. $\{110\}$) ou piramidais ($\{211\}$ vs. $\{101\}$), nas quais seus eixos possuem elevada influência da composição química. Rochas ígneas máficas, por exemplo, tendem a apresentar um maior desenvolvimento dos eixos cristalográficos $\{100\}$ e $\{101\}$, enquanto granitos hidratados e pegmatitos tendem a ter os eixos $\{110\}$ e $\{101\}$ mais proeminentes (Pupin, 1980). Formas mais aciculares, por outro lado, são características de rochas de rápida cristalização, porfiríticas, intrusões subvulcânicas, entre outros (Corfu *et al.*, 2003).

O tamanho, quantidade e qualidade dos cristais também são variáveis sujeitas às mudanças composicionais e a velocidade de cristalização (Machado & Simonetti, 2001; Corfu *et al.*, 2003). A presença de elementos radioativos na estrutura cristalina do zircão acumula e libera partículas α que impactam a morfologia através do decaimento radioativo, causando a metamictização parcial ou total do cristal (Nasdala *et al.*, 1998; Zhang *et al.*, 2000; Balan *et al.*, 2001; Corfu *et al.*, 2003; e Fornelli, *et al.*, 2015). A estrutura morfológica do cristal costuma ser conservada, porém sua porção atingida pela radiação interna possui menor conteúdo composicional de Pb. Tal fato confere uma menor cristalinidade e um aumento do volume interno do cristal, favorecendo, assim, o desenvolvimento de fraturas (Nasdala *et al.*, 1998; Corfu *et al.*, 2003; Fornelli *et al.*, 2015). Além disso, segundo Zhang *et al.* (2000) e Balan *et al.* (2001), é possível observar mudanças sistemáticas em suas propriedades físicas, como dureza, resistência ao fraturamento, densidade, capacidade de absorção de espécies aquosas, índice de refração e birrefringência, potencial de incorporação de elementos traço, entre outros. Dessa forma, cristais metamictizados também podem apresentar

inúmeras inclusões oriundas do preenchimento de espaços criados pela metamictização através da interação com fluidos, em geral, hidrotermais ou metamórficos (Zhang *et al.*, 2000; Corfu *et al.*, 2003; Fornelli *et al.*, 2015).

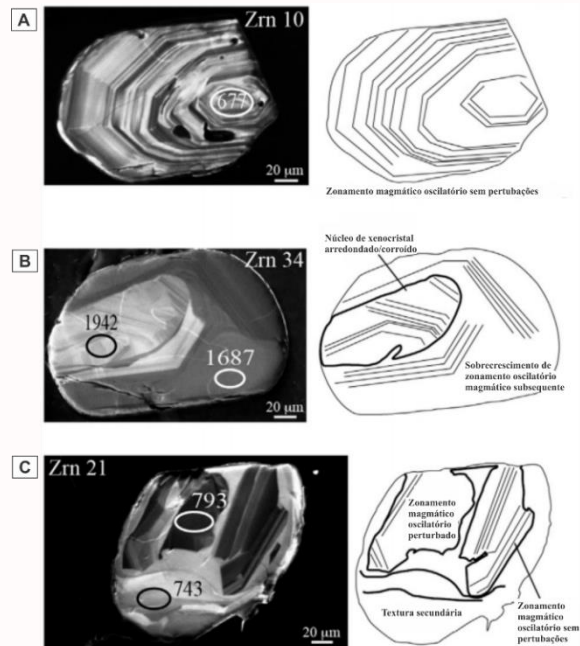


Figura 4: Imagens de microscópio eletrônico de varredura (MEV) equipadas com detector VPSE (Variable Pressure Secondary Electron), evidenciando exemplos de zonamento em cristais de zircão. A análise no centro dos cristais fornece a idade de cristalização, enquanto nas bordas observam-se idades mais novas correspondentes a novos eventos de cristalização (ou recristalização). O croqui a direita de cada imagem resalta os tipos de zonamento apresentado por cada cristal. (A) Zonamento oscilatório sem perturbações. (B) Zonamento magmático em cristal previamente corroído devido ao transporte e erosão; (C) Perturbações no zonamento oscilatório magmático e presença de texturas secundárias. (Modificado de Fornelli *et al.*, 2015).

Ainda que a metamictização seja um desafio para as análises geocronológicas, Nasdala, *et al.* (1998) afirmam que cristais de zircão incipientemente ou parcialmente afetados podem ser utilizados para a datação. Técnicas como o lixamento dos cristais de zircão em moinho pneumático (Krogh, 1982) e o descarte dessas porções pela quebra das bordas ou fracionamento dos cristais, tendem a minimizar este efeito (Silver & Deutsch, 1963; Corfu 1988; Aleinikoff *et al.*, 1990). Embora a aplicação dessas técnicas forneça resultados positivos, é de suma importância que haja cautela na seleção dos cristais, para maior controle e qualidade da obtenção de um intercepto superior confiável.

Ao interpretar as idades obtidas para uma população de cristais que possui zircões metamictizados, deve-se sempre levar em consideração o contexto geológico da rocha datada e sua eventual interação com fluidos após a cristalização. Em províncias minerais como Carajás, por exemplo, a metamictização de zircões em rochas graníticas é um fenômeno comum, devido a sua intensa interação com fluidos de origem hidrotermal, metamórfica ou meteórica, através de zonas de cisalhamento (Sardinha *et al.*, 2006; Moreto *et al.*, 2011, 2015a,b; Feio *et al.*, 2013; Melo *et al.*, 2016). De acordo com Melo *et al.* (2016), as idades de ca. 2,5 Ga obtidas em zircões metamictizados das rochas hospedeiras (i.e., granito Old Salobo, 2547 \pm 5,3 Ma, MSWD = 0,26) e zona de minério (2535 \pm 8,4 Ma, MSWD = 1,7) do depósito IOCG Salobo, podem refletir o distúrbio ou até mesmo o completo *reset* do sistema isotópico U-Pb, devido a processos hidrotermais. Analogamente, a idade mais jovem obtida para o granito-gnaiss hospedeiro Igarapé Gelado (2701 \pm 30 Ma, MSWD = 7,0), demonstra um considerável distúrbio do sistema isotópico U-Pb, neste caso associado a significativa perda de Pb e ao processo de metamictização do zircão, este atribuído a intensa deformação e alteração hidrotermal em regime dúctil.

A perda de Pb associada ao processo de metamictização é também observada no depósito IOCG Bacaba, localizado no Cinturão Sul do Cobre de Carajás (Moreto *et al.*, 2011, 2015a). Segundo Moreto *et al.* (2011), cristais de zircão provenientes das rochas hospedeiras do depósito (i.e., Tonalito Bacaba, ca. 3,0 Ba; Granito Serra Dourada, ca. 2,86 Ba) apresentam intensa perda de Pb, por sua vez atribuída a processos de recristalização ou a danos estruturais causados pelo decaimento radioativo. De fato, a atividade hidrotermal de alta temperatura, aliada a deformação em regime dúctil, provocam alterações na morfologia externa e características texturais dos cristais de zircão dessas rochas (e.g., perturbações no zonamento oscilatório magmático, presença de inclusões e fraturamento intenso). Contudo, Moreto *et al.* (2011) reiteram que, embora a perda de Pb tenha sido significativa para o Granito Serra Dourada, por exemplo, não foi suficiente para resetar completamente o sistema isotópico U-Pb. Dessa forma, as idades obtidas em zircões metamictizados fornecem idades confiáveis e que refletem o momento de cristalização das rochas hospedeiras do depósito.



4. Resultados

4.1 Descrição petrográfica dos litotipos

O depósito Cu-Au Santa Lúcia está localizado na porção sudeste do Domínio Carajás, em uma região marcada pela terminação leste da Falha Carajás que possui *trend* E-W. Nesta região, afloram seqüências vulcanosedimentares associados ao embasamento do Domínio Carajás e ao grupo Grão Pará, além de diversas intrusões graníticas de idade Arqueana que incluem o Complexo Granítico Estrela, Planalto, Rancho Alegre e Serra do Rabo, além da suite intrusiva Plaqué (Hunger *et al.*, *in review*). De acordo com Hunger *et al.* (*in review*), dois litotipos são identificados na área do depósito: uma rocha subvulcânica de composição riolítica, associada ao Grupo Grão Pará e hospedeira da mineralização cupro-aurífera, e um corpo pegmatítico intrusivo.

4.1.1 Rocha Subvulcânica

O litotipo dominante no depósito Santa Lúcia é representado por uma rocha subvulcânica félsica. Em geral, a rocha é holocristalina, hipidiomórfica inequigranular e apresenta textura porfírica caracterizada por uma matriz fina de quartzo, feldspato potássico (microclínio), plagioclásio e biotita. Esta matriz envolve fenocristais subédricos de quartzo grosso (800 a 1500 µm), por vezes com bordas recrystalizadas (Figura 5A). Cristais de muscovita, turmalina e zircão são reconhecidos localmente e representam fases acessórias.

Os cristais de quartzo são subédricos a anédricos, finos a grossos (80 a 1500 µm), com forte extinção ondulante (Figura 5B). O contato entre os grãos é predominantemente suturado e marcado pela formação de quartzo policristalino. Os feldspatos (i.e. microclínio e plagioclásio) são subédricos finos (até 300 µm), tabulares e apresentam maclas bem definidas (Figura 5C). Enquanto os cristais de biotita são subédricos, lamelares e finos (até 700 µm), os de muscovita são subédricos, tabulares e podem atingir dimensões milimétricas. A foliação da rocha se torna mais evidente quando realçada pela orientação preferencial de cristais lamelares de biotita (Figura 5D), assim como pelo estiramento de cristais de quartzo.

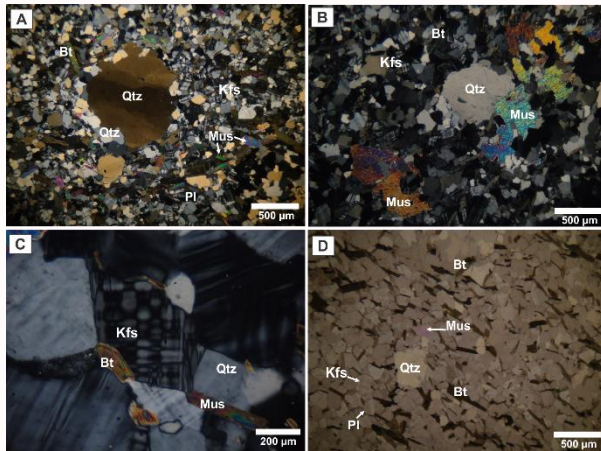


Figura 5: Fotomicrografias da rocha subvulcânica do depósito Cu-Au Santa Lúcia. (A) Textura porfírica da rocha evidenciada pela presença de um fenocristal de quartzo com extinção ondulante, por sua vez envolto por uma matriz mais fina de quartzo, feldspato potássico e muscovita. Note a presença de subgrãos nas bordas do fenocristal; (B) Cristais grossos de quartzo e muscovita em meio a matriz da rocha subvulcânica, com feldspato potássico e biotita; (C) Feldspato potássico (microclínio) com macla em tartarite; (D) Cristais de biotita orientados segundo a foliação da rocha. Abreviações: Qtz = quartzo, Kfs = feldspato potássico, Pl = plagioclásio, Bt = biotita, Mus = muscovita.

4.1.2 Pegmatito

O pegmatito é identificado como uma rocha rósea, holocristalina, hipidiomórfica inequigranular, composta por cristais finos a médios de quartzo, feldspato potássico (microclínio), turmalina, muscovita e plagioclásio (Figura 6A). Em geral, apresenta textura porfírica devido à presença de cristais grossos de turmalina e muscovita (até 5 mm e 400 µm, respectivamente), que são envolvidos por uma matriz de granulação fina a média (50 µm a 2 mm) composta por cristais de: i) quartzo anédrico a subédrico, de extinção ondulante e contatos suturados; ii) microclínio subédrico, com macla tartarite bem preservada e localmente mascarada por uma discreta sericitização, e; iii) cristais de plagioclásio subédricos, com maclas pouco expressivas e ocasionalmente onduladas (Figura 6B). Em geral, o contato entre os cristais da rocha é reto, evidenciando a formação em equilíbrio, embora também possa ocorrer de forma difusa (Figura 6C).

Os cristais de turmalina do pegmatito são prismáticos, subédricos a euédricos, repletos de fraturas preferencialmente preenchidas por muscovita e/ou sericita. Os cristais geralmente ocorrem como fragmentos angulosos isolados uns dos outros em meio a matriz da rocha (Figura 6D). A muscovita ocorre predominantemente em meio a matriz da rocha, formando cristais subédricos tabulares de até 400 µm, que

preenchem os espaços entre os grãos de quartzo e feldspato. Pode também ser observada no interior dos feldspatos formando inclusões de até 100 µm.

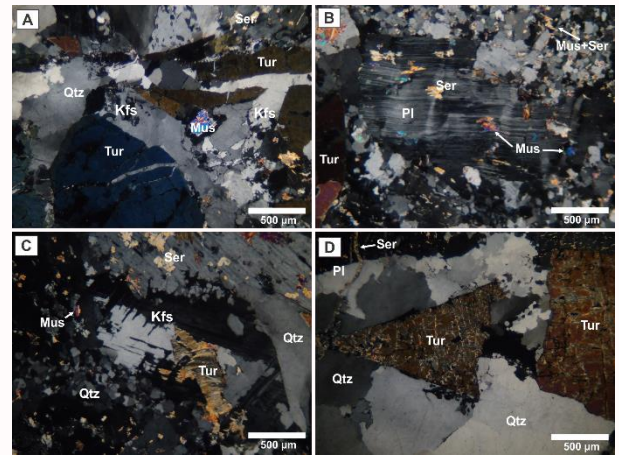


Figura 6: Fotomicrografias do corpo pegmatítico do depósito Cu-Au Santa Lúcia. (A) Textura porfírica, evidenciada por fenocristais de turmalina em meio a matriz composta majoritariamente por quartzo, feldspato e muscovita.; (B) Cristal de plagioclásio com maclas polysintéticas onduladas e inclusões de muscovita e sericita. (C) Contato difuso entre os cristais. Note a alteração com sericita em meio aos cristais de feldspato; (D) Cristais de turmalina angulares em associação com o quartzo. Abreviações: Qtz = quartzo, Kfs = feldspato potássico, Pl = plagioclásio, Tur = turmalina, Mus = muscovita, Ser = sericita.

5. Preparação de Amostras

O processo de preparação de amostras para a geocronologia teve início com a britagem das amostras. Nesta etapa (Figura 7A), foi realizado o encaixe de um saco plástico com identificação da amostra no britador, de modo que as mandíbulas do aparelho estivessem posicionadas adequadamente dentro do saco para coleta da amostra. Ao ligar o aparelho, é importante estar atento ao barulho das mandíbulas pois estas devem estar suficientemente próximas uma da outra para a britagem adequada da amostra, sendo necessário que haja um bom encaixe entre elas e as placas na parede do britador. Após a regulagem, as amostras de rocha foram despejadas aos poucos entre as mandíbulas para dar início ao processo de britagem. Ao final, retirou-se o saco plástico com a amostra britada, fechando-o com fita adesiva para evitar contaminação.

No passo seguinte, as amostras britadas foram levadas ao moedor (Figura 7B), cujo processo de preparação e regulagem é semelhante ao do britador. Com o moedor fechado e já regulado, todos os vincos do aparelho foram selados com fita adesiva, de modo a evitar que o pó da rocha escape por qualquer fresta. A amostra é então despejada através do bocal do aparelho e, ao final do processo de moagem, o saco plástico com a rocha moída é retirado com cuidado e lacrado com fita adesiva para armazenamento. Tanto para o processo de britagem como o de moagem, é necessária a atenção aos riscos de contaminação da amostra e do ambiente, sendo necessária a limpeza dos balcões nos quais amostras foram manuseadas, assim como dos equipamentos como um todo.



Figura 7: Etapas iniciais para a datação mineral. (A) britagem da amostra; (B) moagem e pulverização da amostra.

Em seguida, as amostras foram submetidas ao bateamento para concentração de minerais densos através da separação gravitacional dos cristais. Ao final do processo, além dos cristais de zircão, de densidade aproximada de 4,6 g/cm³, o concentrado resultante continha ainda inúmeros cristais densos de turmalina, apatita, pirita e monazita.

Com o concentrado das quatro amostras de rocha preparado, deu-se início à separação manual dos minerais magnéticos (e.g., magnetita) utilizando ímãs convencionais de neodímio. Mesmo após essa etapa, a grande quantidade de minerais densos e escuros presentes no concentrado, como a pirita e a turmalina, dificulta a seleção dos cristais de zircão (relativamente menores) convindo, assim, o uso do separador isodinâmico Frantz. Contudo, devido a manutenção do ar comprimido do Laboratório de Preparação de Amostras para Geocronologia do IG-UNICAMP, a utilização do separador Frantz não pôde ser realizada.



Todavia, concentrados finais foram levados à lupa binocular (**Figura 8A**) para seleção manual e seleção dos cristais de zircão mais apropriados para a confecção de *mounts* necessários para datação através do método U-Pb em LA-ICP-MS. Nos *mounts* os cristais devem estar alinhados, enfileirados e pouco espaçados para facilitar a análise isotópica dos cristais de zircão selecionados por LA-ICP-MS. Embora a etapa de confecção dos *mounts* não tenha sido concluída, devido a paralização da pesquisa, o resultado esperado é ilustrado pela **Figura 8B**, fornecida pelo doutorando do Instituto de Geociências, Igor Camargo Moreira.

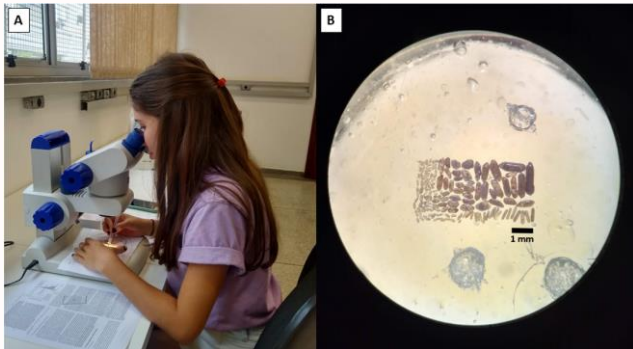


Figura 8: Etapa de seleção manual dos cristais de zircão em lupa binocular. (A) Aluna Poliana realizando a seleção no Laboratório de Preparação de Amostras do IG-UNICAMP; (B) Exemplo de *mount* finalizado. Note a presença de populações distintas de cristais de zircão, que diferem em tamanho, comprimento do eixo de alongação, cor e cristalinidade.

6. Discussões e Considerações Finais

- O LA-ICP-MS é considerado uma técnica eficiente para a geocronologia de cristais de zircão no sistema U-Pb. Sua alta confiabilidade deriva principalmente da composição e qualidade do equipamento (uso do laser, quatro polos de indução etc.), que proporciona melhor separação de massa de isótopos específicos, possibilitando a obtenção de idades isotópicas precisas e acuradas. A necessidade de, pouca energia e baixo custo, se comparada a outras técnicas, também favorece a análise de uma maior população amostral, conferindo maior confiabilidade.

- Além dos erros padrões considerados nos cálculos das razões isotópicas (i.e., MSDW e ρ), a observação e descrição cautelosa das características físicas dos cristais de zircão, como a morfologia, cristalinidade, hábito, presença de fraturas e inclusões, e zonamento, é imprescindível para facilitar a interpretação e avaliação da qualidade dos dados geocronológicos.

- A caracterização dos cristais de zircão é importante para guiar a avaliação da qualidade das idades obtidas. Estas também devem ser compreendidas de acordo com o contexto geológico.

- Cristais de zircão metamictizados são pouco indicados para a geocronologia, devido às alterações de suas propriedades químicas e físicas (i.e., dureza, resistência ao faturamento, densidade, capacidade de absorção de espécies aquosas, índice de refração, birrefringência, potencial de incorporação de elementos traço etc.). Tais alterações ocorrem principalmente devido a interação do zircão com fluidos magmáticos, metamórficos ou meteoríticos, como relatado em estudos de rochas hospedeiras de depósitos Cu-Au do Domínio Carajás (i.e., Salobo e Bacaba). Quando utilizados, estes cristais devem ser estudados com cautela e, portanto, deve-se avaliar o significado da perda de Pb na porção/fragmento metamictizado dos cristais de zircão.

- Deve-se seguir todos os passos de limpeza e organização do ambiente e equipamentos de trabalho na preparação de amostras, não só para evitar a contaminação ao máximo possível, como para preservar os aparelhos utilizados.

- As análises petrográficas do depósito Cu-Au Santa Lúcia permitiram descrever mineralogicamente seus litotipos principais. A rocha subvulcânica é caracterizada por uma matriz fina de quartzo, feldspato potássico, plagioclásio, e biotita, que envolve fenocristais de quartzo. A foliação é incipiente e marcada pelo alinhamento dos cristais de biotita da matriz. O corpo pegmatítico é isotrópico e composto majoritariamente por cristais grossos de quartzo, feldspato potássico, muscovita, turmalina e plagioclásio.

- Espera-se que, com o retorno das atividades presenciais na UNICAMP seja possível realizar as análises geocronológicas previstas para esse projeto de iniciação científica. A partir desses novos dados geocronológicos, será possível reconstruir a evolução temporal do depósito Santa Lúcia, apontando, assim, diferenças e similaridades em relação a outros depósitos Cu-Au do Domínio Carajás.

Agradecimentos

Agradeço ao Centro Nacional de Pesquisa (CNPq) e a Pró-Reitoria de Pesquisa da UNICAMP, pelo auxílio financeiro para a realização do projeto. Aos professores e alunos de pós-graduação responsáveis pelo Laboratório de Preparação de Amostras e Geocronologia do Instituto de Geociências – UNICAMP, pelo apoio e

instrução. Finalmente, agradeço os ensinamentos, orientação e dedicação da Prof^a. Dr^a Carolina Moreto, em conjunto com o Ms. Raphael Bianchi, ao longo de todo o projeto.

Referências

- Aleinkoff, J. N., Winegarden, D. L. and Walter, M. (1990). U-Pb ages of zircon rims: a new analytical method using the air-abrasion technique. *Chem. Geol. (Isot. Geosci. Sect.)* 80, 351–63.
- Allègre, C. J., 2008. *Isotope geology*. Cambridge University Press, p. 534.
- Araújo, O. J. B., Maia, R. G. N., Jorge-João, X. S., and Costa, J. B. S., 1988. A megaestruturação da folha Serra dos Carajás, in VII Congresso Latino Americano de Geologia: Belém, p. 324–333.
- Balan, E. et al. 2001. Metamictization and chemical durability of detrital zircon. *American Mineralogist* (86), p.1025–1033.
- Benisek, A., & Finger, F.; 1993. Factors controlling the development of prism faces in granite zircons: A microprobe study. *Contrib Mineral Petrol* (114), p. 441–451.
- Corfu, F. et al.; 2003. *Atlas of Zircon Textures*. Reviews in Mineralogy & Geochemistry - REV MINERAL GEOCHEM. 53, p. 469–500.
- Dickin, A., 2005. *Radiogenic Isotope Geology* (2nd ed.). Cambridge: Cambridge University Press.
- DOCEGEO, 1988. Revisão litostratigráfica da Província Mineral de Carajás - Litostratigrafia e principais depósitos minerais, in XXXV Congresso Brasileiro de Geologia: Belém, SBG, p. 11–54.
- Feio, G. R. L., Dall'Agnol, R., Dantas, E. L., Macambira, M. J. B., Santos, J. O. S., Althoff, F. J., and Soares, J. E. B., 2013. Archean granitoid magmatism in the Canaã dos Carajás area: Implications for crustal evolution of the Carajás province, Amazonian craton, Brazil: *Precambrian Research*, v. 227, p. 157–185.
- Fornelli, A. et al. 2015. First U-Pb detrital zircon ages from Numidian sandstones in Southern Apennines (Italy): Evidences of African provenance. *Sedimentary Geology*. 320, p. 19–29.
- Hirata, W. K., Rigon, J. C., Kadekaru, K., Cordeiro, A. C. C., and Meireles, E. A., 1982. Geologia regional da Província Mineral de Carajás, in I Simpósio de Geologia da Amazônia: Belém, SBG/NO, p. 100–110.
- Houk, R. 1986. Mass Spectrometry of Inductively Coupled Plasmas. *Analytical Chemistry* (58), p. 97–105.
- Hunger, R. B., Melo, G. H. C. De, Xavier, R. P., Moreto, C. P. N., and Rodríguez, C. T., 2019 (in review). The Neoproterozoic (2.68 Ga) Santa Lúcia Cu-Au-(Mo-W-Bi-Sn) deposit, Carajás Domain (Pará State): Hydrothermal alteration and U-Pb geochronology, in IV Simpósio Brasileiro de Metalogenia: Gramado, p. 157–158.
- Kosler, J., 2007. Laser ablation ICP-MS - a new dating tool in Earth Science. *Proceedings of the Geologists' Association*, 118, p. 19–24.
- Krogh, T.E. 1982. Improved accuracy of U-Pb zircon ages by the creation of more concordant systems using an air abrasion technique. *Geochim Cosmochim Acta* (46), p. 637–649.
- Linacre, J.M., 2002. "What do Infit and Outfit, Mean-square and Standardized mean?". *Rasch Measurement Transactions*. 16 (2):878
- Machado, N., Lindenmayer, Z., Krogh, T. E., and Lindenmayer, D., 1991. U-Pb geochronology of Archean magmatism and basement reactivation in the Carajás area, Amazon shield, Brazil: *Precambrian Research*, v. 49, p. 329–354.
- Machado, N. & Simonetti, A.; 2001. CHAPTER 9. U-Pb DATING AND HF ISOTOPIC COMPOSITION OF ZIRCON BY LASER ABLATION-MC-ICP-MS. *Laser-Ablation-ICPMS in the Earth Sciences: Principles and Applications*. 29.
- Melo, G. H. C., Monteiro, L. V. S., Xavier, R. P., Moreto, C. P. N., Santiago, E. S. B., Dufrane, S. A., Aires, B., and Santos, A. F. F., 2016. Temporal evolution of the giant Salobo IOCG deposit, Carajás Province (Brazil): Constraints from paragenesis of hydrothermal alteration and U-Pb geochronology: *Mineralium Deposita*, v. 52, p. 709–732.
- Monteiro, L. V. S., Xavier, R. P., Carvalho, E. R., Hitzman, M. W., Johnson, C. A., Souza Filho, C. R., and Torresi, I., 2008. Spatial and temporal zoning of hydrothermal alteration and mineralization in the Sossogo iron oxide-copper-gold deposit, Carajás Mineral Province, Brazil: paragenesis and stable isotope constraints: *Mineralium Deposita*, v. 43, p. 129–159.
- Moreto, C. P. N., Monteiro, L. V. S., Xavier, R. P., Amaral, W. S., dos Santos, T. J. S., Juliani, C., and de Filho, C. R. S., 2011. Mesoproterozoic (3.0 and 2.86 Ga) host rocks of the iron oxide-Cu-Au Bacaba deposit, Carajás Mineral Province: U-Pb geochronology and metallogenetic implications: *Mineralium Deposita*, v. 46, p. 789–811.
- Moreto, C. P. N., Monteiro, L. V. S., Xavier, R. P., Creaser, R. A., Dufrane, S. A., Melo, G. H. C., Silva, M. A. D., Tassinari, C. C. G., and Sato, K., 2015a. Timing of multiple hydrothermal events in the iron oxide-copper-gold deposits of the Southern Copper Belt, Carajás Province, Brazil: *Mineralium Deposita*, v. 50, p. 517–546.
- Moreto, C. P. N., Monteiro, L. V. S., Xavier, R. P., Creaser, R. A., Dufrane, S. A., Tassinari, C. C. G., Sato, K., Kemp, A. I. S., and Amaral, W. S., 2015b. Neoproterozoic and paleoproterozoic iron oxide-copper-gold events at the Sossogo deposit, Carajás Province, Brazil: Re-Os and U-Pb geochronological evidence: *Economic Geology*, v. 110, p. 809–835.
- Nasdala, L. et al. 1988. Metamictization and U-Pb isotopic discordance in single zircons: a combined Raman microprobe and SHRIMP ion probe study. *Mineralogy and Petrology* (62), p. 1–27.
- NSPS - National Society of Professional Surveyors, 2016. *Minimum Standard Detail Requirements for ALTA/NSPS Land Title Surveys*
- Nogueira, A. C. R., Truckenbrodt, W., and Pinheiro, R. V. L., 1995. Formação Águas Claras, Pré-Cambriano da Serra dos Carajás: Redescoberta e redefinição litostratigráfica: *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi - Série Ciências da Terra*, v. 7, p. 177–277.
- Pinheiro, R. V. L., Kadekaru, K., Soares, A. V., Freitas, C., Ferreira, S. N., and Matos, F. M. V., 2013. Carajás, Brazil - a short tectonic review, in XIII Simpósio de Geologia da Amazônia: Belém, SBG, p. 1086–1089.
- Pupin J. P.; 1980. Zircon and granite petrology. *Contrib Mineral Petrol* (73), p. 207–220
- Sardinha, A. S., Barros, C. E. M., and Krymsky, R., 2006. Geology, geochemistry, and U-Pb geochronology of the Archean (2.74 Ga) Serra do Rabo granite stocks, Carajás Metallogenetic Province, northern Brazil: *Journal of South American Earth Sciences*, v. 20, p. 327–339.
- Silver, L. T. and Deutsch, S. (1963). Uranium-lead isotopic variations in zircons: a case study. *J. Geol.* 71, 721–58.
- Schmitz, M. D., and Schoene, B., 2007. Derivation of isotope ratios, errors, and error correlations for U-Pb geochronology using 205Pb-235U-(235U)-spiked isotope dilution thermal ionization mass spectrometric data. *Geochim. Geophys. Geosyst.*, 8, p.20.
- Souza, S. R. B., Macambira, M. J. B., and Sheller, T., 1996. Novos dados geocronológicos para os granitos deformados do Rio Itacaiúna (Serra dos Carajás, PA): implicações estratigráficas, in V Simpósio de Geologia da Amazônia: Belém, SBG, p. 380–383.
- Tallarico, F. H. B., Figueiredo, B. R., Groves, D. I., Kositcin, N., McNaughton, N. J., Fletcher, I. R., and Rego, J. L., 2005. Geology and SHRIMP U-Pb geochronology of the Igarapé Bahia deposit, Carajás copper-gold belt, Brazil: An Archean (2.57 Ga) example of Iron-Oxide Cu-Au-(U-REE) mineralization: *Economic Geology*, v. 100, p. 7–28.
- Tallarico, F. H. B., McNaughton, N. J., Groves, D. I., Fletcher, I. R., Figueiredo, B. R., Carvalho, J. B., Rego, J. L., and Nunes, A. R., 2004. Geological and SHRIMP II U-Pb constraints on the age and origin of the Breves Cu-Au-(W-Bi-Sn) deposit, Carajás, Brazil: *Mineralium Deposita*, v. 39, p. 68–86.
- Thomas, R. 2013. *Practical Guide to ICP-MS – A Tutorial for Beginners*. CRC Press
- Toledo, P. I. de F., Moreto, C. P. N., Xavier, R. P., Gao, J., Matos, J. H. da S. N. de, and Melo, G. H. C., 2019. Multistage Evolution of the Neoproterozoic (ca. 2.7 Ga) Igarapé Cinzento (GT-46) Iron Oxide Copper-Gold Deposit, Cinzento Shear Zone, Carajás Province, Brazil: *Economic Geology*, v. 114, p. 1–34.
- Vasquez, M. L., Rosa-Costa, L. T., Silva, C. M. G., Klein, E. L., Ricci, P. S. F., Barbosa, J. P. O., Lopes, E. C. S., Macambira, E. M. B., Chaves, C. L., Carvalho, J. M. A., Oliveira, J. G. F., Anjos, G. C., Silva, H. R., and João, X. S. J., 2008. Geologia e Recursos Minerais do Estado do Pará: Sistema de Informações Geográficas - SIG: texto explicativo dos mapas Geológico e Tectônico e de Recursos Minerais do Estado do Pará. Escala 1:1.000.000 (M. L. Vasquez & L. T. Rosa-Costa, Eds.): Belém, CPRM, 328 p.
- Volp, K. M. M., 2005. The Estrela copper deposit, Carajás, Brazil: Geology and implications of a Proterozoic copper stockwork: *Mineral Deposit Research: Meeting the Global Challenge - Proceedings of the Eighth Biennial SGA Meeting*, p. 1085–1088.
- Xavier, R. P., Monteiro, L. V. S., Moreto, C. P. N., Pestilho, A. L. S., Melo, G. H. C., Silva, M. A. D., Aires, B., Ribeiro, C., and Silva, F. H. F., 2012. The iron oxide copper-gold systems of the Carajás mineral province: *Economic Geology*, v. 16, p. 433–454.
- Zhang, M. et al. 2000. Metamictization of zircon: Raman spectroscopy study. *Journal of Physics Condensed Matter* (12) p. 1915–1925.
- Walder, A. J., Abell, I. D., Freedman, P. A. and Platzner, I. 1993a. Lead isotopic ratio measurement of NIST 610 glass by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* - Volume 48, Issue 3, p. 397–402.