REVISTA DA ACADEMIA DE CIÊNCIAS DO PIAUÍ

ZIRCÃO, O GUARDIÃO DO TEMPO: DATAÇÃO U-PB APLICADA À PROVENIÊNCIA SEDIMENTAR - REVISÃO METODOLÓGICA E UTILIDADE NO PROJETO BIOCRONORTE

Nicole Lopes Padilha[1], Gabriel Bertolini[2], Juliana Charão Marques[3], Ana Maria Góes[4], Afonso César Rodrigues Nogueira[5], Renato Sol Paiva de Medeiros[6], Luiz Saturnino de Andrade[7], Argel de Assis Nunes Sodré[8], Denise Moreira Canarim[9], Paulo A. Souza[10], Ana Karina Scomazzon[11], Edvaldo José Oliveira[12], João Miguel Maraschin Santos[13]

[1]Universidade Federal do Rio Grande do Sul; nicolelopespadilha@gmail.com; ORCID: 0000-0003-1952-4122
[2]Universidade Federal do Rio Grande do Sul; gabertol@gmail.com; ORCID: 0000-0002-3873-6190
[3]Universidade Federal do Rio Grande do Sul; juliana.marques@ufrgs.br; ORCID: 0000-0003-0143-6925
[4]Universidade de São Paulo; amgoes@usp.br; ORCID: 0000-0001-8575-1935
[5]Universidade Federal do Pará; anogueira@ufpa.br; ORCID: 0000-0002-5225-9255
[6]Universidade Federal do Pará; renato.solgeo@gmail.com; ORCID: 0000-0002-1202-0143
[7]Universidade Federal do Pará; geoandrade.sl@gmail.com; ORCID: 0000-0001-7168-8787
[8]Universidade Federal do Pará; argel.sodre@ig.ufpa.br; ORCID: 0000-0002-5190-9623
[9]Universidade Federal do Rio Grande do Sul; denise.canarim@ufrgs.br; ORCID: 0000-0001-5212-6834
[10]Universidade Federal do Rio Grande do Sul; paulo.alves.souza@ufrgs.br; ORCID: 0000-0001-9844-1530
[11]Universidade Federal do Rio Grande do Sul; akscomazzon@ufrgs.br; ORCID: 0000-0002-2189-2664
[12]Universidade Federal do Rio Grande do Sul; contato.oedvaldo@gmail.com; ORCID: 0000-0003-3730-8511
[13]Universidade Federal do Rio Grande do Sul; marascajoao@gmail.com; ORCID: 0000-0003-2128-7373

RESUMO: O método de datação geocronológica U-Pb em zircão detrítico é uma técnica para reconstrução de ambientes sedimentares do passado. Datações utilizando o método LA-ICP-MS em zircão são amplamente utilizadas em estudos de proveniência sedimentar devido à sua utilização como traçador de áreas-fontes e misturas entre sistemas sedimentares. Neste artigo, revisamos o mineral zircão e seu potencial como geocronômetro, a preparação e análise de zircão com o método U-Pb e as técnicas de estatística e de visualização de dados geocronológicos. Além disso, trazemos exemplo esquemático da aplicação das assinaturas geocronológicas em zircão detrítico em ambientes sedimentares atuais, no registro geológico, e na Bacia do Parnaíba. No contexto do Projeto Biocronorte, estudos de proveniência que envolvem datações U-Pb em zircão detrítico, darão suporte a reconstruções paleogeográficas e correlações com áreas vizinhas. Este tipo de informação é chave para o entendimento dos processos geológicos que afetam a superfície da Terra ao longo de milhões de anos.

Palavras-chave: Bacia do Parnaíba. Geocronologia U-Pb. Proveniência sedimentar. Zircão detrítico.

ABSTRACT: U-Pb geochronology in detrital zircon is a technique applied for ancient sedimentary systems reconstructions. U-Pb dating using the LA-ICP-MS method in zircon is widely applied in sedimentary provenance studies due to its abilitie to track source areas and detritus mixtures within sedimentary environments. In this article, we revise the mineral zircon and its potentiality as geochronometer, the sample preparation and the analysis via U-Pb geochronology, as well as the statistical and visualization techniques to deal with gecronology data. Furthermore, we exemplified the application of detrital zircon geochronology signatures in modern environments and in the sedimentary register, and finally, in the context of Parnaíba Basin. In the context of the Biocronorte Project, provenance studies involving U-Pb detrital zircon dating will support paleogeographic reconstructions and correlations with neighboring areas. This type of information is key on the understanding of the geological processes that affect the earth's surface over millions of years.

Keywords: Detrital zircon. Parnaíba Basin. Sedimentary provenance. U-Pb geochronology.

Revista da Academia de Ciências do Piauí, Volume 3, Número 3, p.157 – 176 , Janeiro/Junho, 2022. **ISSN: 2675-9748.**

1 Introdução

As idades obtidas por análise geocronológica em cristais de zircão tem sido uma importante ferramenta para os estudos de proveniência sedimentar. O zircão é considerado o melhor mineral marcador de idades geocronológicas por meio do uso do sistema de decaimento radioativo U-Th-Pb. Esse mineral é formado na cristalização de rochas magmáticas - como granitos e riolitos - e em metamórficas – como, por exemplo, em gnaisses. Durante o processo de erosão, o zircão é liberado, transportado e incorporado nos sedimentos que serão transformados em rocha sedimentar detrítica, por isso é chamado de zircão detrítico. O uso de datações de zircões detríticos vem se tornando cada vez mais popular devido ao barateamento de técnicas de datação *in situ* utilizando ablação a laser acoplada a espectrômetro de massa com indução por plasma (LA-ICP-MS). Essa técnica de proveniência sedimentar deriva do campo de estudos da geocronologia – ampla área da Geologia que abrange a datação de rochas e minerais por meio de análises químicas de isótopos radiogênicos. O zircão tem duas características muito importantes para os estudos de proveniência: (i) resistência química e física aos processos superficiais, o que permite sua preservação nos ambientes sedimentares; (ii) e manutenção do registro do decaimento do sistema U-Th-Pb.

Este artigo busca, de maneira sintética, revisar: (i) conceitos e definições de proveniência sedimentar e datação de rochas; (ii) o mineral zircão, em especial, na sua forma detrítica; (iii) conceitos de geocronologia U-Pb em zircão - apresentando sistemática e métodos de datação, técnicas de prepação de amostra e imageamento, ferramental técnico utilizado, análise estatística para a obtenção de idade e de proveniência – (iv) aplicações práticas de estudo de proveniência com zircão detrítico em ambientes sedimentares atuais e do passado; (v) e revisão de estudos de proveniência com U-Pb em zircão na Bacia do Parnaíba.

Revista da Academia de Ciências do Piauí, Volume 3, Número 3, p.157 – 176 , Janeiro/Junho, 2022. **ISSN: 2675-9748.**

2 O que é proveniência sedimentar?

As rochas são arquivos naturais da história da Terra que registram sua evolução ao longo do tempo geológico. As rochas sedimentares são aquelas que têm sua formação acoplada aos processos superficiais do planeta; em geral, são retratos dos ambientes deposicionais sob controle do clima e tectônico. Elas registram, por exemplo, eventos climáticos extremos, a história tectônica de aglutinação e rompimento dos continentes, a evolução da vida e as extinções em massa. A sedimentologia destas rochas documenta informações sobre composição mineral, granulometria, seleção e forma dos grãos, que contam a história dos processos intempéricos e erosivos ocorridos na área-fonte. Além de quantificar as misturas e abrasão/arredondamento durante transporte e, por fim, seu impacto na deposição das rochas (GARZANTI, 2016). O ramo da proveniência sedimentar que se preocupa com a origem e modificações dos sedimentos por processos superficiais terrestres é denominado *source-to-sink* (BASU, 2017; WELTJE; EYNATTEN, 2004). Este conceito envolve a compreensão e quantificação dos processos atuantes ao longo do ciclo sedimentar, que é composto em geral por intemperismo e erosão, transporte, deposição e soterramento (ALLEN, 2017; MAZUNDER, 2017).

3 O que é a datação das rochas?

O tempo do planeta Terra, chamado de tempo geológico, é contado a partir de uma escala de bilhões de anos. Por conta disto, ele também é chamado por alguns autores de tempo profundo. Comparado à escala da vida humana, é difícil imaginar a magnitude do tempo geológico e tudo que ocorreu na Terra desde sua formação: todas as montanhas que foram soerguidas e erodidas; todos os vulcões que entraram em erupção e adormeceram; todos os animais e plantas que já surgiram e se extinguiram. É para descobrir e escrever esta história que os geólogos e paleontólogos estudam as rochas e os fósseis, que são capazes de registrar a evolução das paisagens da Terra ao longo do seu tempo profundo. A área de estudo que se responsabiliza pelas investigações acerca do tempo geológico é a Geocronologia. Para determinar as idades das rochas, são utilizadas técnicas sofisticadas de datação, seja de forma relativa (p. ex.: bioestratigrafia) ou absoluta (p. ex.: minerais radiogênicos). Dentre esta última, uma delas é o método U-Pb, no qual se analisam os decaimentos dos isótopos de urânio (U) e tório (Th) em chumbo (Pb) que ocorrem, por

Revista da Academia de Ciências do Piauí, Volume 3, Número 3, p.157 – 176 , Janeiro/Junho, 2022. **ISSN: 2675-9748.**

exemplo, no zircão, um mineral muito importante para a Geocronologia (REINERS et al., 2017).

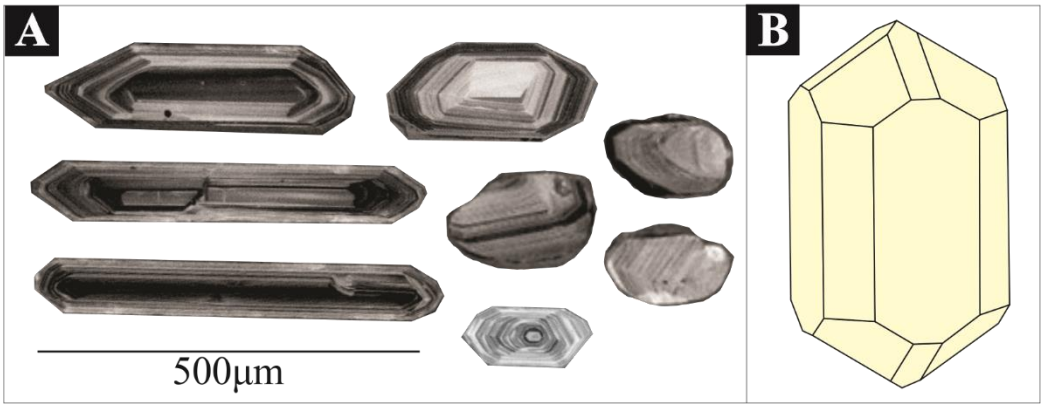
4 Zircão, o guardião do tempo

Como destacado na revisão de Harley e Kelly (2007), o zircão pode ser considerado o mais importante geocronômetro. O zircão, representado pela composição química $ZrSiO_4$, é um mineral muito utilizado para diversos estudos em Geologia, pois é um mineral acessório comum na crosta terrestre, onde é encontrado em rochas sedimentares, ígneas ou metamórficas (Figura 1A). Durante a cristalização do mineral, os elementos que o compõem são ordenados conforme um arranjo cristalino que formam sua estrutura. No zircão, este arranjo é chamado de bipiramidal ditetragonal (Figura 1B). Esta estrutura cristalina do zircão o caracteriza como resistato, isto é, um mineral com capacidade de, eventualmente, resistir ao intemperismo, às mudanças diagenéticas e aos processos de transporte de sedimentos; e de registrar em sua morfologia feições de cristalização e recristalização (CORFU, 2003; RUBATTO et al., 2018). Por conta disto, o zircão é um mineral muito utilizado tanto em investigações geoquímicas, como em estudos geocronológicos e sobre a evolução da crosta terrestre e do manto (FINCH; HANCHAR, 2003). Os zircões podem apresentar uma complexidade enorme de morfologias e texturas, como mostrado no trabalho de Corfu (2003), dentre outros. Para escolher os zircões a serem analisados em cada estudo, são utilizados diferentes critérios científicos de acordo com os objetivos específicos (RUBATTO et al., 2018; VERMEESCH, 2004; VERMEESCH, 2021;).

Especificamente o zircão detrítico, que é encontrado nas rochas sedimentares e metassedimentares, é utilizado em análises geocronológicas por meio de datação U-Pb para estudos de proveniência, de evolução tectônica e estudos sedimentológicos (e.g. CAWOOD et al., 2012; GERDES; ZEH, 2006; GERHELS et al., 2011). Além disto, a datação de zircões detríticos pode contribuir também para fornecer a idade de máxima deposição de bacias sedimentares (DICKINSON; GEHRELS, 2009), estudo relevante para a correlação estratigráfica entre unidades das bacias.

Figura 1.A. Imagem de catodoluminescência de zircões de diferentes tipos de rochas; B. Estrutura cristalográfica do zircão, chamada de tetragonal.

Revista da Academia de Ciências do Piauí, Volume 3, Número 3, p.157 – 176 , Janeiro/Junho, 2022. **ISSN: 2675-9748.**



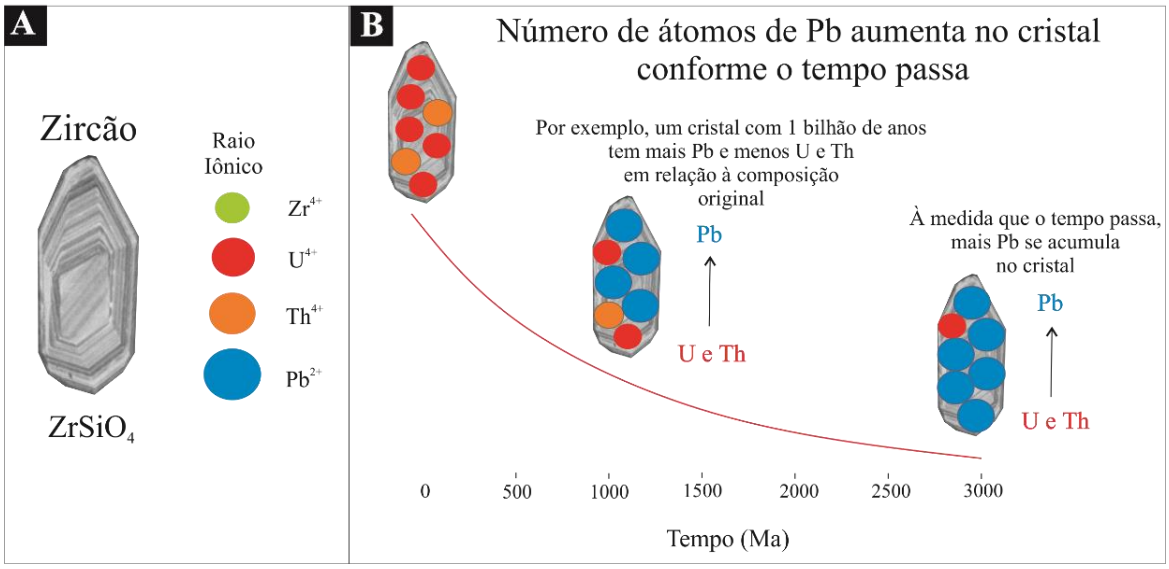
Fonte: Elaborado pelos autores.

Alguns elementos menores e traços podem ser incorporados à estrutura cristalina do zircão por meio da substituição química simples, que é controlada pelos raios iônicos dos cátions substitutos em comparação aos cátions Zr^{+4} e Si^{+4} (HARLEY; KELLY, 2007). Neste caso, U^{+4} (1,05 Å) e Th^{+4} (1,10 Å) podem substituir Zr^{+4} (0,87 Å), mas Pb^{+2} (1,32 Å) dificilmente será incorporado na estrutura do zircão durante o processo de cristalização do mineral por conta de seu raio iônico maior. Sendo assim, o zircão pode incorporar altos teores de urânio (U) e tório (Th) durante sua formação e crescimento, mas não chumbo (Pb) (Figura 2A).

O chumbo (Pb) presente na estrutura do zircão se deve ao decaimento do urânio (U) e do tório (Th). Em função disto, a utilização do zircão na área da geocronologia é baseada nas seguintes séries de decaimento radioativo: $^{238}U \rightarrow {}^{206}Pb$; $^{235}U \rightarrow {}^{207}Pb$; e $^{232}Th \rightarrow {}^{208}Pb$ (Figura 2B). Cada uma destas três séries envolve várias etapas e isótopos intermediários de meia vida curta, mas todo o processo de decaimento pode ser matematicamente descrito por uma única equação de decaimento que relaciona o número de isótopos pais finais, o número de isótopos filhos radiogênicos finais e o tempo (HARLEY; KELLY, 2007).

Figura 2.A. Cristal de zircão e os raios iônicos dos elementos U e Th, que podem ser incorporados no lugar do Zr; e Pb, que não ocupa este lugar durante a cristalização; B. Por conta do decaimento radioativo ao longo do tempo, o zircão acumula mais Pb e menos U e Th em relação à composição original do cristal.

Revista da Academia de Ciências do Piauí, Volume 3, Número 3, p.157 – 176 , Janeiro/Junho, 2022. **ISSN: 2675-9748.**



Fonte: Elaborado pelos autores.

5 Geocronologia U-Pb

5.1 Geocronologia U-Pb: como funciona afinal?

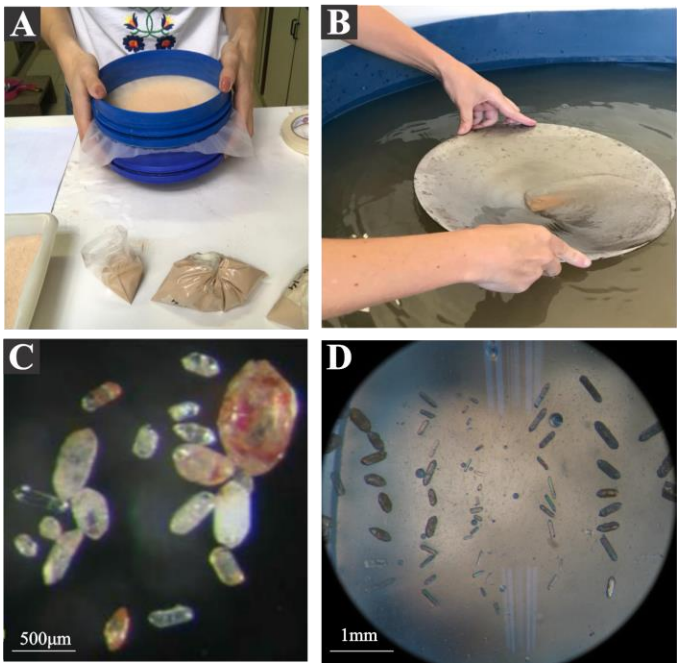
A datação pelo método U-Pb é uma técnica que pode ser aplicada a todos os minerais que contêm estes elementos químicos. No entanto, neste trabalho, destaca-se esta técnica aplicada para datação U-Pb em zircão detrítico especificamente. A partir disto, utilizam-se alguns requisitos para execução e utilidade do método. Primeiro, considera-se que o sistema isotópico esteve fechado durante a cristalização do mineral, isto é, sem perdas ou ganhos de isótopos; segundo, que o sistema se preservou assim ao longo da história do mineral; e terceiro, que a datação é fundamentada nas constantes de decaimento. Portanto, a idade do zircão detrítico, que é o foco deste trabalho, reflete a idade de sua fonte, auxiliando também na reconstrução paleogeográfica juntamente com outros estudos, como os estratigráficos e os paleontológicos.

5.2 Preparação e imageamento dos zircões

A datação de zircão por meio do método U-Pb é realizada, inicialmente, com a preparação das amostras, que consiste na aquisição dos concentrados de zircão a partir de procedimento padrão de separação mineral. Em geral, este procedimento resume-se na seguinte sequência de preparação das amostras (Figura 3): i) desagregação inicial; ii) moagem, se necessário; iii) peneiramento; iv) bateamento; v) separação da fração não-

magnética; e vi) separação por líquidos densos. A partir disto, é feita a fabricação das seções com os zircões (*mounts*), etapa em que os cristais são montados em resina epóxi, polidos com lixa e pasta diamantada e, então, lavados para evitar contaminação de chumbo.

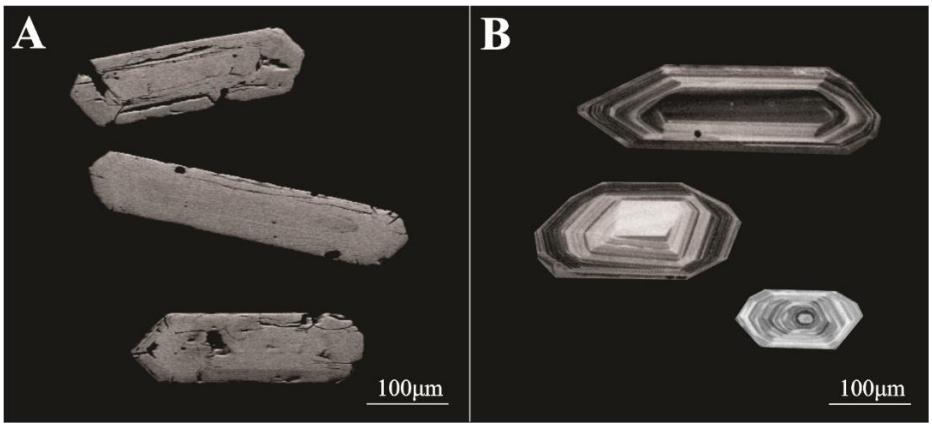
Figura 3. Resumo do procedimento geral de preparação das amostras: A. Peneiramento da amostra; B. Bateamento da amostra; C. Concentrado de zircões; D. *Mount* pronta.



Fonte: Elaborado pelos autores.

A última etapa de preparação de amostra consiste no imageamento dos zircões para orientar o posicionamento das análises no mineral e contribuir na interpretação dos dados. Para isto, existem dois tipos de imagens que apresentam boa resolução de texturas internas dos zircões: elétrons retroespalhados (backscatter electron - BSE) e a de catodoluminescência (CL). O primeiro tipo de imagem é obtido por meio de um microscópio eletrônico de varredura (MEV). A imagem de BSE normalmente evidencia zonações químicas do mineral e zonas livres de fraturas ou inclusões (Figura 4A). Já a imagem de CL é adquirida por meio de espectroscópio de catodoluminescência acoplado ao MEV. As imagens CL revelam as áreas de crescimento e recristalização do zircão, indicando também o melhor local *in situ* do mineral para a realização da análise (Figura 4B).

Figura 4. Dois tipos de imageamento dos zircões que orientam o posicionamento das análises no mineral: A Imagem de elétrons retroespalhados (BSE) destacando as fraturas nos zircões; B Imagem de catodoluminescência (CL) salientando as zonações dos grãos.



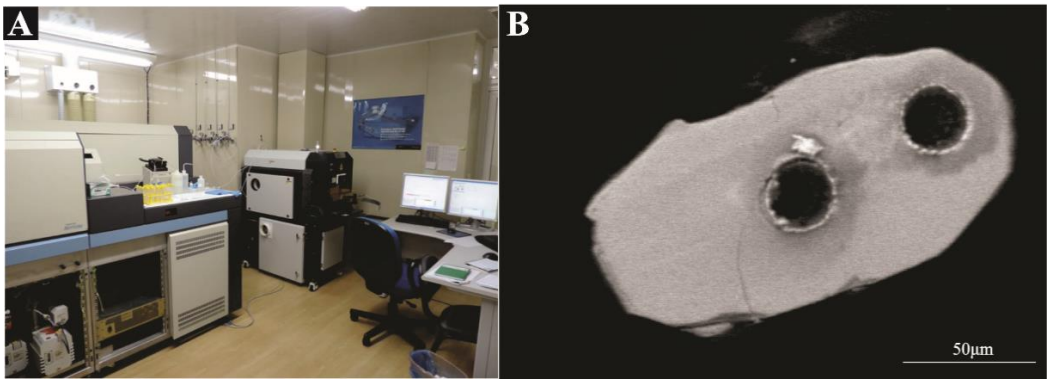
Fonte: Elaborado pelos autores.

5.3 Equipamentos

Diversos tipos de equipamentos de espectrometria de massa podem ser utilizados para datação por U-Pb. Nos estudos de zircões detríticos, os mais populares são os espectrômetros de massa com plasma acoplado indutivamente combinado ao sistema de ablação a laser (LA-ICP-MS) (Figura 5A), devido a maior agilidade na obtenção de dados *in situ*. Este é um método eficaz de registrar as assinaturas isotópicas no zircão (HARLEY; KELLY, 2007; KOOIJMAN et al., 2012). Em estudos de zircão detrítico para análise de proveniência, nos quais se analisam diversos grãos de zircões, esta técnica representa a alternativa mais rápida e barata em relação a outras, ainda que apresente um pouco mais de incerteza quanto à precisão. A figura 5B ilustra o zircão após a realização da análise.

Figura 5.A. Equipamento LA-ICP-MS do Laboratório de Geologia Isotópica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul; B. Furos do laser no zircão onde foram realizadas as análises.

Revista da Academia de Ciências do Piauí, Volume 3, Número 3, p.157 – 176 , Janeiro/Junho, 2022. **ISSN: 2675-9748.**



Fonte: Elaborado pelos autores.

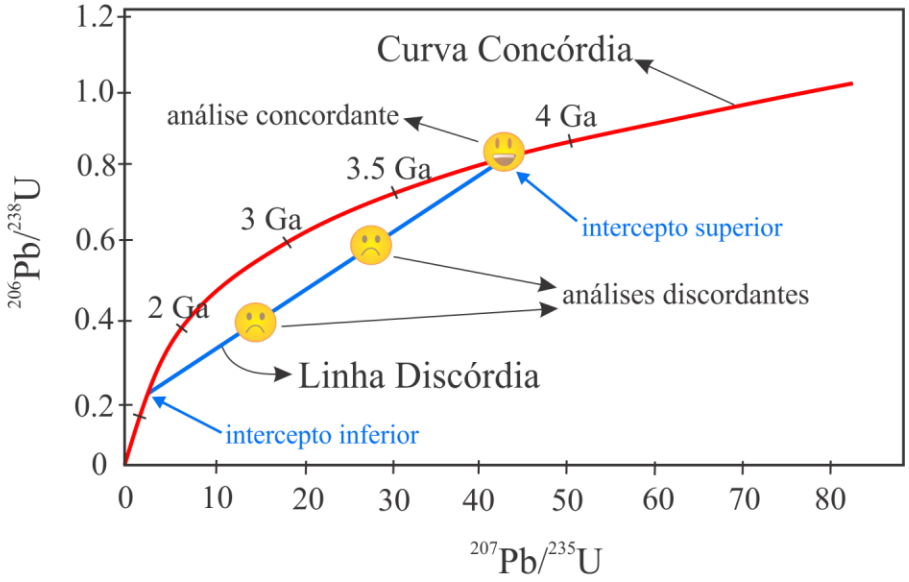
Para boa qualidade dos dados científicos resultantes das análises, é indispensável a calibração dos equipamentos e procedimentos operacionais validados cientificamente que orientem correções acerca de possíveis desvios dos equipamentos, polarização de massas ou fracionamento elementar (devido às diferenças de ionização). Neste último caso, é necessária a utilização de técnicas como a análise sistemática de um zircão padrão para a obtenção de um fator de correção. No entanto, estas técnicas variam conforme o procedimento estabelecido em cada laboratório.

5.4 Diagrama da Concórdia – Idade Absoluta

A base para a construção do diagrama concórdia são dois conjuntos de razões de isótopos pais e filhos (a razão $^{206}Pb/^{238}U$ e a razão $^{207}Pb/^{235}U$), que, neste caso, são analisados simultaneamente, em vez de ser realizada a análise de cada série de decaimento de ^{238}U e de ^{235}U separadamente (HARLEY; KELLY, 2007). A partir disto, o cruzamento destas duas razões dá origem a um local de compatibilidade no diagrama, isto é, um local em que as idades de ambas as razões são concordantes. Este local é representado pela curva concórdia. Quando as idades dos zircões se comportam de maneira concordante, o resultado da análise coincide com a curva concórdia e define a idade absoluta do ponto analisado. Quando o resultado da análise fica fora desta linha no diagrama, ela é chamada de discordante. Ambas situações são ilustradas na figura 6. Em alguns casos, o alinhamento de resultados de análises discordantes pode indicar, mesmo que de forma não tão acurada, o evento de cristalização e o evento que perturbou o sistema. Estes dados são obtidos, respectivamente, por meio do intercepto superior e inferior da curva discórdia com a curva concórdia. Nos estudos de proveniência sedimentar, a idade do grão precisa atingir um percentual estabelecido de 5 a 10% máximo de discordância para ser utilizado na análise estatística dos dados.

Revista da Academia de Ciências do Piauí, Volume 3, Número 3, p.157 – 176 , Janeiro/Junho, 2022. **ISSN: 2675-9748.**

Figura 6. Diagrama da curva concórdia e da linha discórdia. Os resultados das análises que coincidem com a curva concórdia são chamados de concordantes e representam individualmente a idade de cada zircão analisado. O alinhamento de análises discordantes pode formar uma linha (em azul na figura) por meio do intercepto superior e inferior da curva discórdia com a curva concórdia.



Fonte: Modificado de WETHERILL, 1956

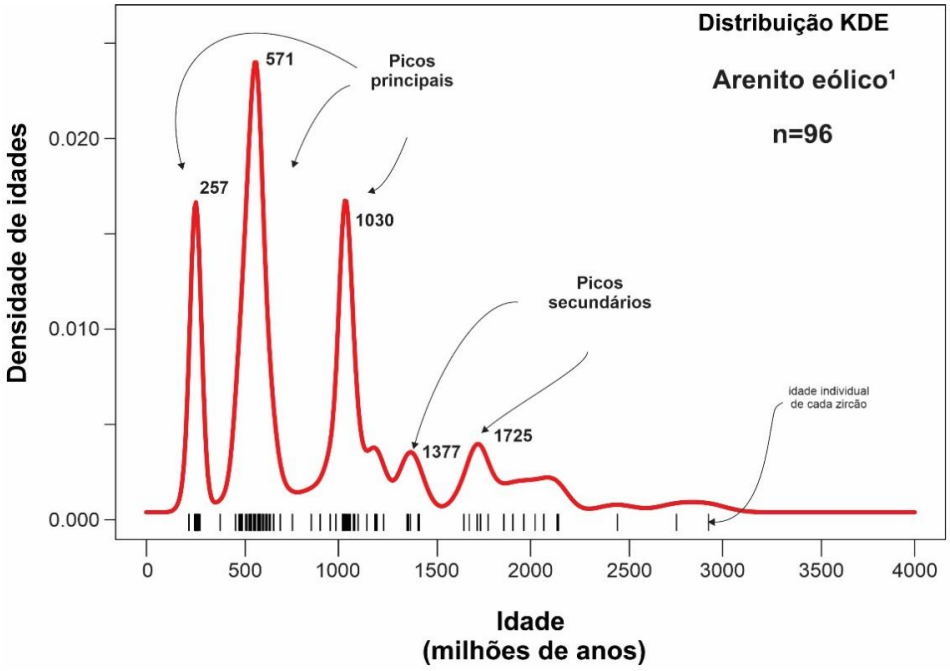
5.5 Análise estatística de dados geocronológicos para proveniência

O gráfico KDE (Figura 7) é o mais utilizado para visualização de datações em zircão detritico para provêniencia sedimentar (VERMEESCH, 2019; VERMEESCH, 2012). KDE é um acrônimo para *Kernel Density Estimator*, uma técnica estatística que limita o *oversmooth* (suavização excessiva) dos picos a fim de garantir idades de cunho geólogico e não artefatos estatísticos. Este gráfico apresenta a linha do tempo no eixo X e a proporção de grãos no eixo Y. Em essência, este gráfico ilustra a proporção de grãos em determinados períodos de tempo que representam a idade que os zircões foram originalmente formados, seja por eventos ígneos ou metamórficos. A idade dos picos encontrados no KDE podem ser correlacionados com eventos tectônicos ou com unidades geológicas conhecidas para remontar a evolução geológica da unidade de interesse.

Para proveniência sedimentar, são datados entre 80 e 120 grãos, idealmente 117 de acordo com Vermeesch (2004). São selecionados grãos de zircão cuja discordância não

seja maior que 10%. A razão $^{207}Pb/^{206}Pb$ é utilizada para zircões mais velhos que 1 Ga e a razão $^{206}Pb/^{238}U$ para grãos mais jovens (GEHRELS, 2011; SPENCER; KIRKLAND; TAYLOR, 2016). O KDE da figura 7 apresenta 96 idades individuais de zircões detríticos, com picos mais importantes em torno de 257 Ma, 571 Ma e 1030 Ma. Os picos ao redor de 1377 e 1725 Ma representam contribuições secundárias. Os traços pretos abaixo da linha ilustram as idades para cada zircão, e sobreposição e densidade destes traços demonstram a maior concentração de idades nestas idades.

Figura 7. Diagrama KDE's para arenito eólico da Formação Botucatu da Bacia do Paraná demonstrando os picos principais: Permiano (257 Ma), Neoproterozoico (571 Ma) e Mesoproterozoico (1030) e picos secundários (1337 e 1725 Ma - Paleoproterozoicos).



Fonte: Modificado de BERTOLINI et al. (2021)

6 Aplicações em ambientes modernos e no registro geológico

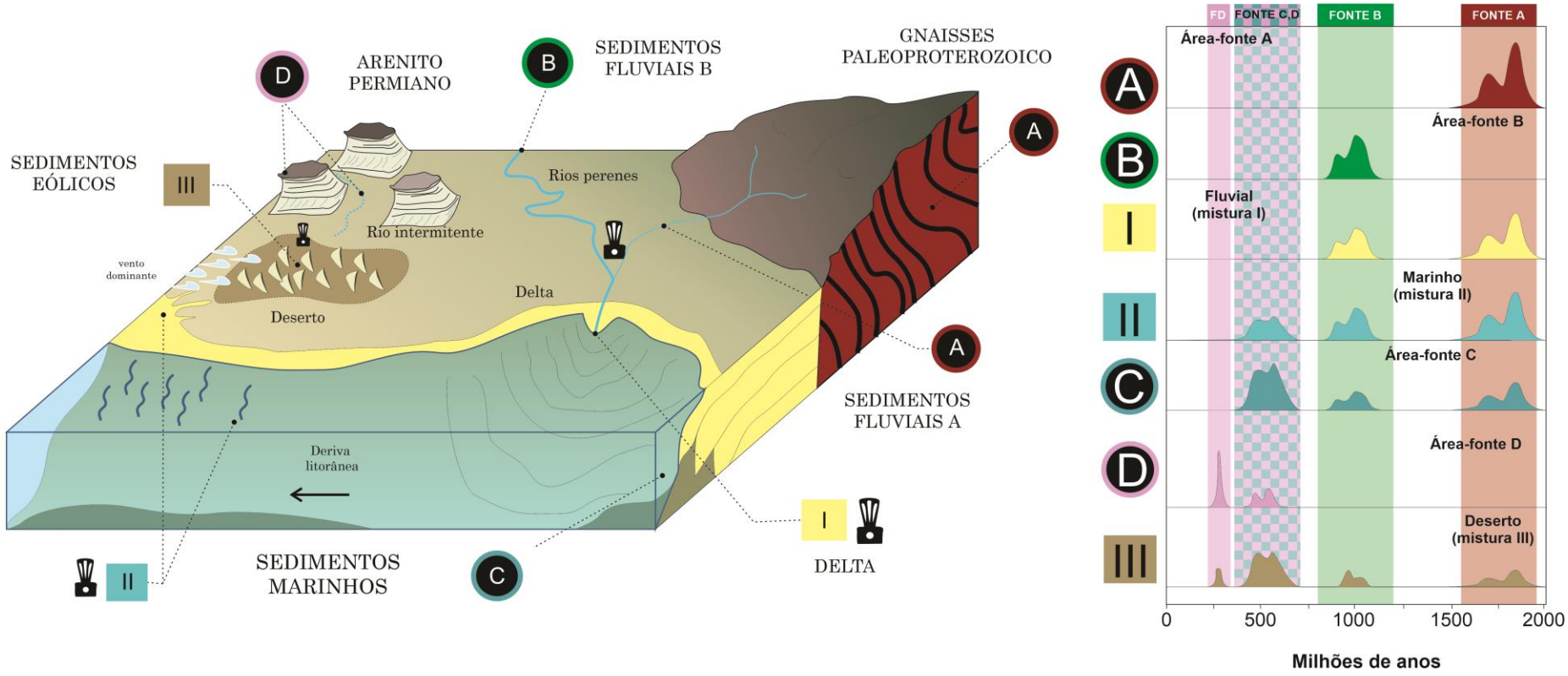
Estudos de proveniência podem ser realizados tanto em ambientes deposicionais atuais, quanto no registro geológico das rochas. Em ambientes modernos é possível utilizar zircão detrítico para traçar as fontes de sedimento ao longo de trajetórias desde a área-fonte até a bacia de deposição, a fim de quantificar as modificações e misturas de grãos sedimentares impostas por cada ambiente deposicional. Em rochas, trabalhos de reconstrução paleoambientais e paleogeográficos buscam remontar os ambientes

sedimentares ao longo da história geológica da Terra. As assinaturas geocronológicas de zircão detrítico são úteis para identificar com maior acertividade as rochas fontes que deram origem aos detritos carreados para os ambientes sedimentares.

A figura 8 exemplifica a utilização de dados de geocronologia U-Pb em zircão detrítico em ambientes modernos. O modelo apresentado busca recriar a mistura de sedimentos em ambientes sedimentares utilizando as assinaturas dos gráficos KDE como traçador de áreas-fonte. Conforme este modelo, existem quatro áreas-fonte principais de sedimentos: (A) fluvial A provenientes de rochas de idade paleoproterozoica do embasamento; (B) fluvial B; (C) sedimentos marinhos transportados pela deriva litorânea; (D) rochas sedimentares de idade permiana. Cada fonte apresenta uma assinatura de zircão detrítico particular, como demonstrado nos padrões dos gráficos tipo KDE. Os ambientes deposicionais presentes no modelo ilustram os processos de mistura que ocorrem quando duas ou mais fontes sedimentares interagem. Por exemplo, o deserto recebe sedimento do litoral através de transporte eólico (III) e de rios intermitentes (D). Esta mistura resulta em uma assinatura nova, desta vez contando com proporções diferentes entre as fontes sedimentares. O mesmo processo de mistura pode ocorrer de diversas formas, como na mistura de sedimentos marinhos e sedimentos deltaicos (II), ou então na mistura entre dois afluentes de rios que drenam diferentes áreas-fontes (I).

Revista da Academia de Ciências do Piauí, Volume 3, Número 3, p.157 – 176 , Janeiro/Junho, 2022. **ISSN: 2675-9748.**

Figura 8. Modelo de ambientes sedimentares atuais com 4 áreas-fontes (A-D) e 3 misturas entre fontes (I-III). Os diagramas KDEs a direita registra as assinaturas de zircão detrítico para as áreas-fontes e o resultado da mistura (representado pelos liquidificadores) entre essas fontes nos sistemas sedimentares fluviais (I), fluvial-marinho (II) e marinho-desértico.



Fonte: Elaborado pelos autores.

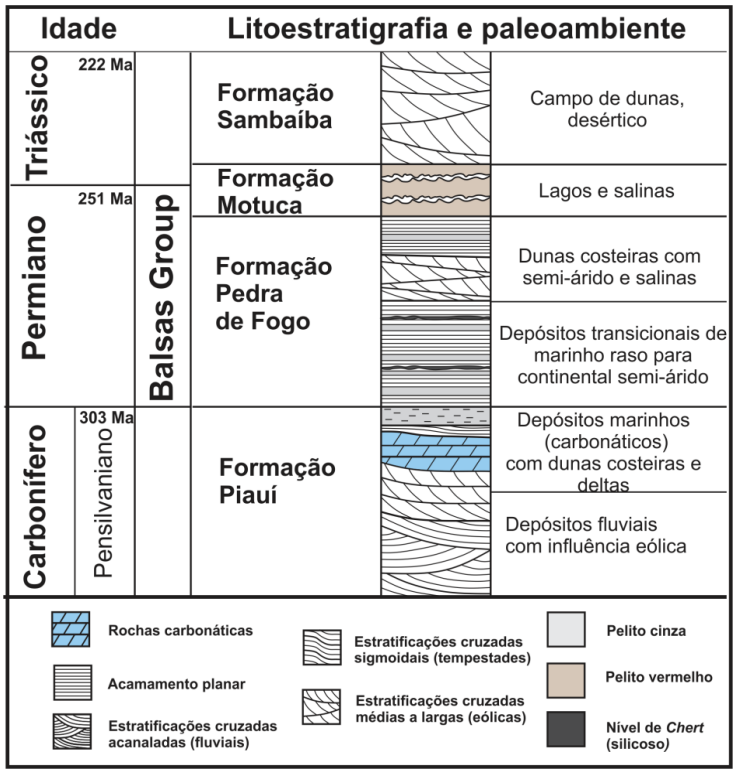
A interação entre a origem dos sedimentos (área-fonte) e deposição registra a história *source-to-sink* dos grãos sedimentares. Estas mesmas assinaturas são encontradas no registro sedimentar das rochas e, portanto, a assinatura de zircão detrítico nas rochas é aplicada para reconstrução dos sistemas sedimentares antigos. Os picos encontrados nos KDE podem ser correlacionados com os terrenos tectônicos como orógenos, crátons, cinturões metamórficos ou até mesmo bacias sedimentares. Portanto, a integração de mapas geológicos e geocronológicos é fundamental para a reconstrução dos sistemas sedimentares antigos. Por exemplo, no modelo da figura 8, o sistema fluvial A recebe sedimentos proximais das rochas metamórficas aflorantes com idades ao redor de 1.8 Ga, enquanto o sistema fluvial B recebe sedimentos de outro terreno geológico marcado por idades ao redor de 1.2 Ga.

7 Proveniência sedimentar na Bacia do Parnaíba

A Bacia do Parnaíba é uma das maiores bacias intracratônicas do Paleozoico da América do Sul. Esta bacia é formada por sequências sedimentares dominantemente paleozoicas de idades desde o Ordoviciano/Siluriano até o Cretáceo, com uma espessura de cerca de 3.500 m que registram sua história geológica (VAZ et al., 2007). Mudanças tanto climáticas quanto de ambientes de sedimentação ocorreram ao longo do tempo e suas unidades sedimentares da bacia registram múltiplos ciclos e ambientes, variando desde glacio-fluvial e marinho raso (grupos Serra Grande e Canindé), até plenamente continental (Grupo Balsas) (Figura 9). Trabalhos de proveniência já foram desenvolvidos, alguns dos quais dedicados a unidades e intervalos de tempo específicos, especialmente concentrados nos grupos Serra Grande e Canindé, em unidades do Devoniano ao Carbonífero (DE OLIVEIRA; MOURA, 2019; MENZIES et al., 2018) e Ordoviciano (CERRI et al., 2020). Já o trabalho de Hollanda et al. (2018), fez uma abordagem mais ampla, do Siluriano até o Triássico, excetuando a Formação Pedra de Fogo, do Grupo Balsas.

Revista da Academia de Ciências do Piauí, Volume 3, Número 3, p.157 – 176 , Janeiro/Junho, 2022. **ISSN: 2675-9748.**

Figura 9. Estratigrafia resumida da Bacia do Parnaíba, no intervalo do final do Carbonífero ao Triássico.



Fonte: Traduzido de MEDEIROS et al. (2019)

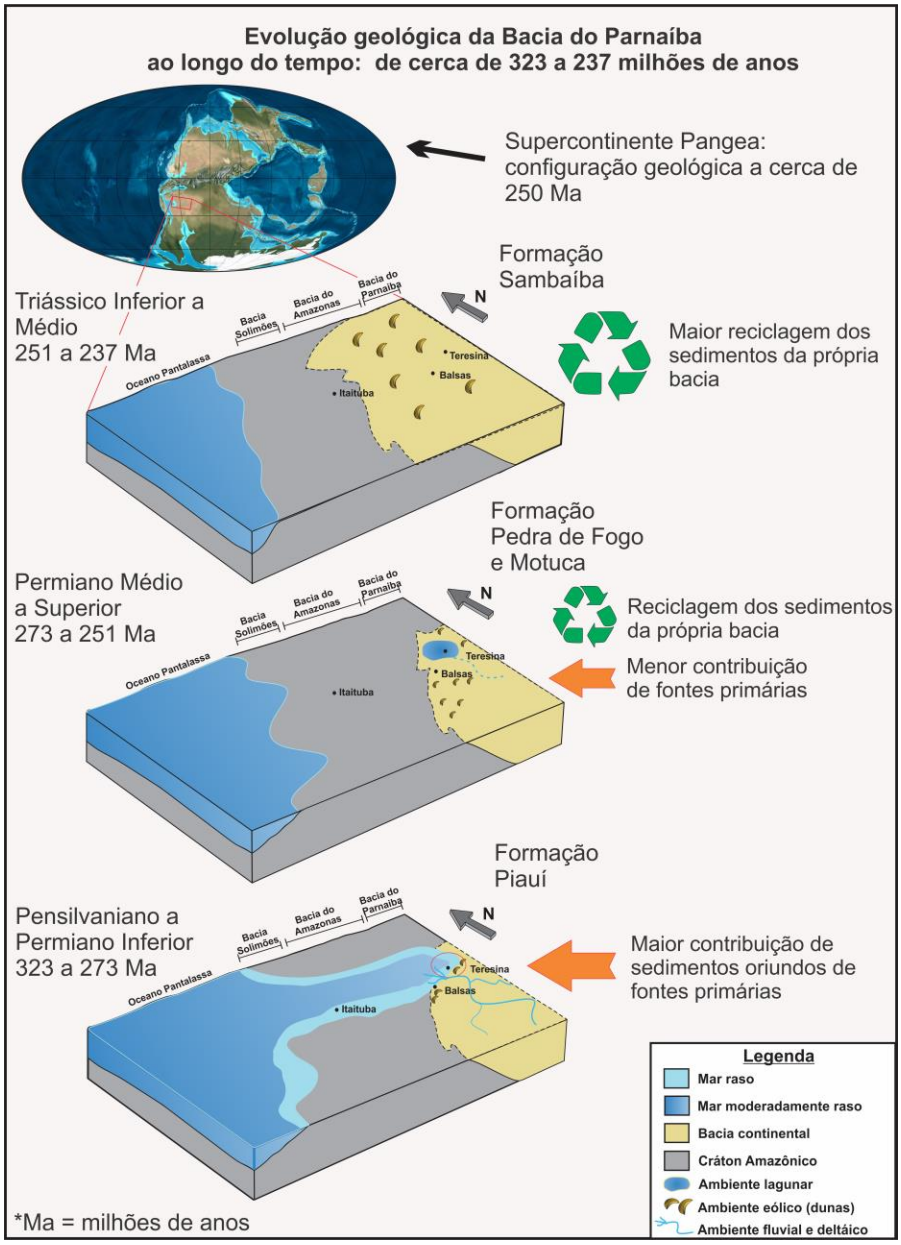
Menzies et al. (2018) trabalharam com amostras das porções sudoeste e nordeste da Bacia do Parnaíba, no intervalo dos grupos Serra Grande e Canindé. O trabalho utilizou técnicas de descrição e quantificação de minerais pesados, bem como datações U-Pb de zircão detrítico. Dentre as principais conclusões, os autores destacam que a origem dos sedimentos se deu a partir de sudoeste, com uma rota longa de proveniência e uma subsidência muita lenta da bacia, o que permitiu dissolução de minerais, preservando apenas aqueles mais resistentes. Recentemente, o trabalho de Cerri et al. (2020), detalhou a proveniência do Grupo Serra Grande da Bacia do Parnaíba por meio de análise granulométrica e de minerais pesados, e considera que esta, já em seu estágio inicial, apresenta sedimentos com maturidade alta (maior transporte), corroborando a sugestão de áreas fontes distais. O trabalho de Oliveira e Moura (2019) focou em dados de U-Pb de zircões detríticos, e sugere que apenas parte das rochas fonte deve ser distal, mas parte pode ser proveniente de terrenos que ainda hoje circundam a bacia. O trabalho de Hollanda et al. (2018) demonstra a manutenção das distribuições de idade de zircões detríticos ao longo das diferentes unidades. Dois cenários foram considerados para explicar estes

resultados: *a)* pode ter havido manutenção da configuração dos terrenos mais elevados que serviram de fonte ao longo de milhões de anos; ou, *b)* pode ter ocorrido reciclagem de sedimentos da própria bacia. De qualquer forma, mais estudos são recomendados para elucidar estas questões. Outra contribuição deste trabalho foi a identificação de fragmentos de rochas e minerais de origem metamórfica, sugerindo denudação de terrenos formados em maior profundidade.

No projeto BIOCRONORTE, estudos de proveniência serão realizados em diferentes intervalos que contenham arenitos de diferentes ambientes deposicionais e de diferentes unidades estratigráficas. O projeto objetiva complementar trabalhos anteriores e será focado em processos sedimentológicos das unidades do final do Carbonífero (formações Poti e Piauí) e permiana (Formação Pedra de Fogo). A figura 10 ilustra a estratigrafia deste intervalo, que inclui a maior parte do Grupo Balsas. Dados da Formação Pedra de Fogo serão relevantes, considerando que nenhum trabalho anterior de proveniência em zircão detrítico abordou esta unidade, que possivelmente marca a transição final de um contexto marinho para um contexto continental, dentro da história sedimentar da Bacia do Parnaíba. A figura 10 ilustra a evolução da bacia, no intervalo de 323 a 237 milhões de anos, pontuando as mudanças ambientais e paleogeográficas em toda sua extensão. Embora tais ambientes sedimentares estivessem restritos ou ao norte da bacia, como o mar epicontinental da Formação Piauí, durante o Pensilvaniano (Figura 10; MEDEIROS et al., 2019); ou à borda oeste, como os lagos permianos da Formação Motuca e os grandes desertos triássicos da Formação Sambaíba (Figura 10; ABRANTES et al., 2019); tais variações ambientais foram amplamente regidas por condições climáticas regionais, que juntamente com as variações geográficas, influenciaram toda história deposicional da Bacia do Parnaíba. A proveniência pode contribuir para o melhor entendimento deste contexto. Em áreas mais úmidas, que apresentam o predomínio de aporte fluvial, é esperada uma tendência de maior contribuição de sedimentos oriundos de fontes primárias. Conforme estas áreas se tornam mais desérticas, a tendência é de maior predomínio de reciclagem dos sedimentos da própria bacia.

Figura 10. Evolução paelogeográfica sugerida para o intervalo do final do Carbonífero ao Triássico, que compreende a transição final do sistema marinho e epicontinental para continental com depósitos fluviais e costeiros da Fm. Piauí, depósitos transicionais marinho-continental árido na Fm. Pedra de Fogo, depósitos lacustres e salinos da Fm. Motuca e depósitos eólicos desérticos da Fm. Sambaíba.

Revista da Academia de Ciências do Piauí, Volume 3, Número 3, p.157 – 176 , Janeiro/Junho, 2022. **ISSN: 2675-9748.**



Fonte: Adaptado de MEDEIROS et al. (2019)

8 Considerações finais

Este artigo revisa a aplicação de técnicas de datação U-Pb em zircão detrítico para fins de proveniência sedimentar. São abordados o mineral zircão e suas propriedades geocronológicas, técnicas de preparação e imageamento, equipamentos, técnicas de visualização e cálculo de dados geocronológicos, aplicações de assinaturas de zircão detrítico na reconstrução de ambientes modernos e em rocha com exemplos aplicados à Bacia do Parnaíba. Os conceitos apresentados nesta revisão constituem uma introdução ao tema de proveniência sedimentar e geocronologia, que apresentam bibliografias extensas e complexidade alta. No contexto do Projeto Biocronorte, as análises irão contribuir para

reconstruções paleogeográficas e correlações com áreas vizinhas. Estudos geológicos de proveniência representam esforços científicos para o melhor conhecimento da dinâmica dos processos superficiais e evolução das bacias sedimentares e suas relações com variações no clima e eventos tectônicos que afetam o planeta ao longo de milhões de anos.

Referências bibliográficas

ABRANTES, Francisco R. *et al.* **Register of increasing continentalization and palaeoenvironmental changes in the west-central pangaea during the Permian-Triassic, Parnaíba Basin, Northern Brazil**. Journal of South American Earth Sciences, v. 93, n. October 2018, p. 294–312, 2019: 10.1016/j.jsames.2019.05.006.

ALLEN, Philip A. **Sediment routing systems: The fate of sediment from source to sink**. Cambridge University Press, 2017.

BASU, Abhijit. **Evolution of siliciclastic provenance inquiries: a critical appraisal.** Em**:** Mazumder, R. (Ed) 2017. Sediment Provenance: Elsevier, 2017. p. 5-23: 10.1016/B978-0-12-803386-9.00002-2.

BERTOLINI, Gabriel *et al.* **Determining sediment provenance history in a Gondwanan erg: Botucatu formation, Northern Paraná Basin, Brazil**. Sedimentary Geology, v. 417, p. 105883, 2021: 10.1016/j.sedgeo.2021.105883.

CAWOOD, Peter A.; HAWKESWORTH, Chris J.; DHUIME, Bruno. **Detrital zircon record and tectonic setting**. Geology, v. 40, n.10: p. 875-878, 2012: 10.1130/G32945.1.

CERRI, Rodrigo I. *et al.* **Unraveling the origin of the Parnaíba Basin: testing the rift to sag hypothesis using a multi-proxy provenance analysis**. Journal of South American Earth Sciences, v. 101, p. 102625, 2020: 10.1016/j.jsames.2020.102625.

CORFU, Fernando. **Atlas of Zircon Textures**. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, v. 53, n. 1, p. 469–500, 2003: 10.2113/0530469.

DE OLIVEIRA, Camila V.; MOURA, Cândido A. V. **Provenance of detrital zircons of the canindé group (Parnaíba Basin), northeastern Brazil.** Journal of South American Earth Sciences, v. 90, p. 162-180, 2019: 10.1016/j.jsames.2018.12.009.

DICKINSON, William R.; GEHRELS, George E. **Use of U–Pb ages of detrital zircons to infer maximum depositional ages of strata:** a test against a Colorado Plateau Mesozoic database. Earth and Planetary Science Letters, v. 288, n.1-2, p. 115-125, 2009: 10.1016/j.epsl.2009.09.013.

FINCH, Robert J.; HANCHAR, John M. **Structure and chemistry of zircon and zircon-group minerals**. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, v. 53, n.1, p. 1-25, 2003: 10.2113/0530001.

GARZANTI, Eduardo. **From static to dynamic provenance analysis—Sedimentary petrology upgraded**. Sedimentary Geology, v. 336, p. 3-13, 2016: 10.1016/j.sedgeo.2015.07.010.

GEHRELS, George E. **Detrital zircon U-Pb geochronology: Current methods and new opportunities**. Tectonics of sedimentary basins: Recent advances, p. 45–62, 2011: 10.1002/9781444347166.ch2.

GERDES, Axel; ZEH, Armin. **Combined U–Pb and Hf isotope LA-(MC-) ICP-MS analyses of detrital zircons:** comparison with SHRIMP and new constraints for the provenance and age of an Armorican metasediment in Central Germany. Earth and Planetary Science Letters, v. 249, n.1-2, p. 47-61, 2006: 10.1016/j.epsl.2006.06.039.

GEHRELS, George E. *et al.* **Detrital zircon geochronology of pre-Tertiary strata in the Tibetan-Himalayan orogen**. Tectonics, v. 30, n. 5, 2011: 10.1029/2011TC002868.

HARLEY, Simon L.; KELLY, Nigel M. **Zircon tiny but timely**. Elements, v. 3, n. 1, p. 13-18, 2007: 10.2113/gselements.3.1.13.

HOLLANDA, Maria H. B. M.; GÓES, Ana M.; NEGRI, Flávia A. **Provenance of sandstones in the Parnaíba Basin through detrital zircon geochronology.** Geological Society, London, Special Publications, v. 472, n.1, p. 181-197, 2018: 10.1144/SP472.16.

KOOIJMAN, Ellen; BERNDT, Jasper; MEZGER, Klaus. **U-Pb dating of zircon by laser ablation ICP-MS: recent improvements and new insights**. European Journal of Mineralogy, v. 24, n. 1, p. 5-21, 2012: 10.1127/0935-1221/2012/0024-2170.

MAZUNDER, Rajat. **Sediment provenance: Influence on compositional change from source to sink**. Em: Sediment Provenance. Elsevier, 2017. p. 1-4: 10.1016/B978-0-12-803386-9.00001-0.

MEDEIROS, Renato S. P. *et al.* **Carbonate-clastic sedimentation in the Parnaiba Basin, northern Brazil: Record of carboniferous epeiric sea in the Western Gondwana**. Journal of South American Earth Sciences, v. 91, p. 188–202, 2019: 10.1016/j.jsames.2019.01.018.

MENZIES, Lori A.; CARTER, Andrew; MACDONALD, David I. M. **Evolution of a cratonic basin: Insights from the stratal architecture and provenance history of the Parnaíba Basin**. Geological Society Special Publication, v. 472, n. 1, p. 157–179, 2018: 10.1144/SP472.18.

REINERS, Peter W. *et al.* **Geochronology and thermochronology**. John Wiley & Sons, 2017.

RUBATTO, Daniela. **Zircon: The Metamorphic Mineral**. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, v. 83, n. 1, p. 261–295, 2017: 10.2138/rmg.2017.83.9, 2017.

SPENCER, Christopher J.; KIRKLAND, Christopher L.; TAYLOR, Richard J. M. **Strategies to- wards statistically robust interpretations of in situ U–Pb zircon geochronology**, Geoscience Frontiers., v. 7, p. 581–589, 2016: 10.1016/j.gsf.2015.11.006.

VAZ, Pekim T. *et al.* **Bacia do Parnaíba**. Boletim de Geociências da PETROBRAS, v. 15, n. 2, p. 253–263, 2007.

VERMEESCH, Pieter. **How many grains are needed for a provenance study?**. Earth and Planetary Science Letters, v. 224, n. 3-4, p. 441-451, 2004:10.1016/j.epsl.2004.05.037.

VERMEESCH, Pieter. **On the visualisation of detrital age distributions**. Chemical Geology, v. 312, p. 190–194, 2012: 10.1016/j.chemgeo.2012.04.021.

VERMEESCH, Pieter. **Exploratory Analysis of Provenance Data Using R and the Provenance Package**. Minerals, v. 9, n. 3, p. 193, 2019: 10.3390/min9030193.

VERMEESCH, Pieter. **On the treatment of discordant detrital zircon U–Pb data**. Geochronology, v. 3, p. 247–257, 2021: 10.5194/gchron-3-247-2021.

WELTJE, Gert J.; EYNATTEN, Hilmar von. **Quantitative provenance analysis of sediments: review and outlook**. Sedimentary Geology, v. 171, n. 1-4, p. 1-11, 2004: 10.1016/j.sedgeo.2004.05.007.

WETHERILL, George W. **Discordant uranium-lead ages, I.** Eos, Transactions American Geophysical Union, v. 37, n. 3, p. 320-326, 1956: 10.1029/TR037i003p00320.

Agradecimentos: Os autores agradecem às instituições convenentes do projeto BIOCRONORTE: PETROBRAS (Processo Sigitec 2018/00541-5), FAURGS (8391-3), UFPA, UFPE, UFRGS (Interação Acadêmica 000803), USP, ANP (21561-6); NLP é bolsista do PRH-ANP, GB da CAPES (88887.310123/2018-00) e JCM (309519/2018-7), ACRN (307484/2018-0) e PAS (313340/2018-8) são bolsistas PQ CNPq.

Revista da Academia de Ciências do Piauí, Volume 3, Número 3, p.157 – 176 , Janeiro/Junho, 2022. **ISSN: 2675-9748.**