

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA JÚLIO DE MESQUITA
FILHO

Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais –
POSMAT

Bruno Henrique Vaz Santos

**MÉTODO DE TRAÇOS DE FISSÃO E U-Pb NOS MINERAIS
APATITA E ZIRCÃO: TERMO-CRONOLOGIA DOS ANDES
PERUANOS NA REGIÃO DE YURA, AREQUIPA – PERU**

PRESIDENTE PRUDENTE

2024

BRUNO HENRIQUE VAZ SANTOS

MÉTODO DE TRAÇOS DE FISSÃO E U-Pb NOS MINERAIS APATITA E ZIRCÃO:
TERMO-CRONOLOGIA DOS ANDES PERUANOS NA REGIÃO DE YURA, AREQUIPA
– PERU

Exemplar definitivo após Defesa como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia de Materiais do Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais (POSMAT) da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Tello Sáenz

Coorientador: Dr. Cleber José Soares

V393m Vaz Santos, Bruno Henrique Vaz Santos

Método de Traços de Fissão e U-Pb nos minerais Apatita e zircão: Termo-Cronologia dos Andes Peruanos na Região de Yura, Arequipa – Peru / Bruno Henrique Vaz Santos Vaz Santos. -- Presidente Prudente, 2024

122 p. : il., tabs., fotos, mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente

Orientador: Carlos Alberto Tello Sáenz Sáenz

Coorientador: Cleber José Soares Soares

1. Caracterização isotópica e cristalográfica do mineral apatita e zircão. 2. Datação via MDE e MTLA em apatitas. 3. Datação via U-Pb e MTLA em zircões. 4. Estudo de História Térmica em apatitas. I. Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Presidente Prudente

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: MÉTODO DE TRAÇOS DE FISSÃO E U-Pb NOS MINERAIS APATITA E ZIRCÃO: TERMO-CRONOLOGIA DOS ANDES PERUANOS NA REGIÃO DE YURA, AREQUIPA – PERU

AUTOR: BRUNO HENRIQUE VAZ SANTOS

ORIENTADOR: CARLOS ALBERTO TELLO SAENZ

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciência e Tecnologia de Materiais, área: Ciência de Materiais pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. CARLOS ALBERTO TELLO SAENZ (Participação Virtual)
Departamento de Física / Faculdade de Ciências e Tecnologia - Unesp/Campus de Presidente Prudente

Prof. Dr. EDUARDO AUGUSTO CAMPOS CURVO (Participação Virtual)
Instituto de Física / Universidade Federal do Mato Grosso

Profa. Dra. CLARISSA DE ALMEIDA OLIVATI (Participação Virtual)
Departamento de Física / Faculdade de Ciência e Tecnologia - Unesp/ Campus de Presidente Prudente

Presidente Prudente, 30 de abril de 2024



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Presidente Prudente

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE BRUNO HENRIQUE VAZ SANTOS, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS, DA FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA - CÂMPUS DE PRESIDENTE PRUDENTE.

Aos 30 dias do mês de abril do ano de 2024, às 09:30 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de BRUNO HENRIQUE VAZ SANTOS, intitulada **MÉTODO DE TRAÇOS DE FISSÃO E U-Pb NOS MINERAIS APATITA E ZIRCÃO: TERMO-CRONOLOGIA DOS ANDES PERUANOS NA REGIÃO DE YURA, AREQUIPA - PERU**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. CARLOS ALBERTO TELLO SAENZ (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Física / Faculdade de Ciências e Tecnologia - Unesp/Câmpus de Presidente Prudente, Prof. Dr. EDUARDO AUGUSTO CAMPOS CURVO (Participação Virtual) do(a) Instituto de Física / Universidade Federal do Mato Grosso, Profa. Dra. CLARISSA DE ALMEIDA OLIVATI (Participação Virtual) do(a) Departamento de Física / Faculdade de Ciência e Tecnologia - Unesp/ Câmpus de Presidente Prudente. Após a exposição pelo mestrando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: Aprovado . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. CARLOS ALBERTO TELLO SAENZ

Carlos Alberto
Tello Saenz

Assinado de forma digital por
Carlos Alberto Tello Saenz
Dados: 2024.04.30 12:10:49
-03'00'

DEDICATÓRIA

Antes de dedicar esse enorme trabalho eu não poderia me esquecer de manter registrado o quanto tudo isso é realização de um sonho vindo da minha infância desde a escola básica. Eu tenho uma memória muito vívida de um dia específico, enquanto cursava a antiga segunda série do ensino básico, em que uma das minhas primeiras professoras perguntou para as crianças da sala “o que elas gostariam de ser quando crescer?” e cada uma delas foi respondendo na ordem enfileirada das carteiras em que se sentavam. Cada uma com sonho mais criativo e pessoal digno da infância. Na minha vez, eu respondi que gostaria de ser um astronauta. Na minha inocência esse era o cara mais importante da Ciência. Essa era a minha completa paixão pelas ciências já na infância — por todas elas, não apenas pela Física ou pela Ciência dos Materiais. As aulas de ciência sempre foram minhas preferidas.

Por outro lado, eu só poderia me apaixonar pela ciência por causa de minha mãe, Maria Vaz Santos, que desde cedo me provocou a ser muito crítico, pelos meios que ela detinha.

Mas meu agradecimento mais acalorado é à minha irmã, Ana Aparecida Vaz Cruz que me ensinou a contar até mil e a juntar as sílabas para pronunciar os sons das palavras. Hoje sei que sempre enxerguei em você aquilo que seria uma figura materna.

Dedico essa dissertação a Wellington Mendes da Silva por ser a pessoa em que eu mais confiei nessa vida e por ter sido uma luz para eu poder me guiar sempre que estive perdido.

Dedico essa dissertação especialmente para você Nathalia Ramos Paulon por ter sido a pessoa mais importante da minha vida. Meus sinceros agradecimentos.

Para finalizar, com muita dor no meu coração eu dedico essa dissertação para vocês, mas também para o meu falecido pai em 04 de julho de 2023 que não vai me assistir, por pouco, a tentar me tornar mestre. Carlos Roberto da Costa Felipe, está sendo difícil sem você. Até a próxima, pai.

AGRADECIMENTOS

Eu agradeço ao professor Dr. Carlos Alberto Tello Sáenz por ter acreditado que eu poderia produzir algo de bom; que eu poderia produzir Ciência; por ter me orientado.

Agradeço ao Murilo Candido de Azevedo por ter sido um amigo e por ter sido extremamente prestativo em todas as etapas de execução desse estudo.

Agradeço a todos os membros do gpDETRAN, um grupo de pesquisa de ambiente acolhedor e amigável.

Agradeço à Universidade Estadual Paulista (UNESP) por ter financiado esse projeto com verba própria de conformidade com o edital 20/2022 instaurado pela PROPG/PROGRAD, à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processo número 2020/02464-8, que foram responsáveis por subsidiar esse e tantos outros projetos do grupo de pesquisa que faço parte.

RESUMO

Foram datadas, através do Método de traços de Fissão, MTF, via a técnica do detector externo, MDE, três amostras de apatita coletadas na região de Yura, cidade de Arequipa, localizada na parte sul dos Andes Peruanos (ARE02, ARE03 e ARE04). Com a finalidade de avaliar o emprego metodológico do MTF por parte do autor, 40 campos da amostra padrão de Durango, México, também foram datados, dando como resultado uma idade média de $30,3 \pm 0,8$ Ma, a qual é compatível do ponto de vista estatístico com a idade obtida nos diversos laboratórios localizados no mundo todo. Na amostra ARE02, 63 grãos de apatita foram datados, sendo que possuem uma distribuição cujo valor médio da idade é de $V_M = 113,7 \pm 2,3$ Ma. Na amostra ARE03, 66 grãos de apatita foram datados, dando como resultados uma idade média de $V_M = 110,1 \pm 2,4$ Ma. Por outro lado, na amostra ARE04, 29 grãos de apatita foram datados via o MDE, fornecendo a idade média de $133,1 \pm 8,8$ Ma. Estes resultados mostram que as idades destas amostras (ARE02, ARE03 e ARE04) são estatística e geologicamente compatíveis, pois foram coletadas na mesma unidade geológica. Estas amostras também foram datadas via o Laser Ablation-Inductively coupled plasma-mass spectrometry, LA-ICP-MS, TFLA. A idade TFLA de 33 grãos de apatita da amostra ARE02 tem como valor médio $103,13 \pm 8,20$ Ma. A idade TFLA de 35 grãos de apatita da amostra ARE03 tem um valor médio de $135,52 \pm 13,85$ Ma. A idade TFLA de 34 grãos de apatita da amostra ARE04 forneceram uma idade média de $101,46 \pm 9,10$ Ma. Estes resultados mostram que as idades obtidas via TFLA na apatita são compatíveis com as idades obtidas via o MDE. Ou seja, pode-se utilizar o método TFLA que é muito mais rápido dado que neste método as amostras não precisam ser irradiadas em um reator nuclear. Além destas três amostras (ARE02, ARE03 e ARE04) mais duas amostras, a ARE06 e a ARE07 também foram datadas via o método de TFLA. O valor médio de 12 grãos da amostra ARE06 deu como resultado uma idade média de $109,00 \pm 13,27$ Ma, enquanto o valor médio de 18 grãos da amostra ARE07 foi de $105,21 \pm 13,10$ Ma. Estas idades são compatíveis com aquelas obtidas nas amostras ARE02, 03 e 04. Nas amostras ARE02 e ARE03 foi possível determinar suas histórias térmicas dado que foram encontrados uma quantidade suficiente de traços confinados com comprimentos médios de $13,41 \pm 0,17$ μm e $13,72 \pm 0,23$ μm , respectivamente. As histórias térmicas foram determinadas através do modelo de *annealing* usando o programa HeFTy. A história térmica da amostra ARE02 passou pela isoterma de 120 °C há 105 Ma e foi esfriando linearmente durante um intervalo de 70 Ma até atingir temperaturas entre 60 e 40° C há 45 Ma atrás. Os últimos 20 Ma são marcados por um resfriamento bem mais acelerado até atingir a temperatura ambiente. Por outro lado, a história térmica da amostra

ARE03 teria atingido a temperatura de 120 °C há 160 Ma e sofreu um resfriamento relativamente lento entre 120 e 80 °C no intervalo de tempo de 160 a 105 Ma. A partir deste ponto a história térmica da amostra ARE03 é semelhante ao resultado da história térmica da amostra ARE02. Isto é, essas histórias térmicas são estatística e geologicamente compatíveis. Idades simultâneas obtidas através do TFLA e U-Pb foram determinadas em grãos de zircão das amostras ARE05, ARE07, ARE14 e ARE17, sendo que as duas primeiras correspondem a rochas ígneas e as duas últimas a rochas sedimentares, todas elas da região de Yura. Os 32 grãos de zircão datados via TFLA na amostra ARE05 forneceram uma idade média de $57,66 \pm 4,46$ Ma e a idade U-Pb uma média de $187,24 \pm 3,37$ Ma; 38 grãos de zircão da amostra ARE07 tem uma idade média obtida via TFLA de $83,98 \pm 4,40$ Ma e uma idade U-Pb com média de $175,77 \pm 1,45$. Por outro lado, a amostra ARE14 possui três picos de idades TFLA, centralizados em 227 Ma, 325 Ma e 478 Ma e três picos de idades U-Pb em 633 Ma, 2 Ga e 2,5 Ga. A amostra ARE17 também apresentou 3 picos de idades TFLA, o primeiro em 240 Ma, o segundo em 358 Ma e o terceiro em 511 Ma com idades U-Pb centralizados em três picos em 558 Ma, 931 Ma e 2.1 Ga. Pode-se dizer que as amostras ARE14 e ARE17 possuem uma distribuição de idades similares TFLA, dado que os picos de idades de cada uma delas são compatíveis. Por outro lado, as idades U-Pb possuem um pico Brasileiro (~600 Ma) mais largo na amostra ARE14, outro pico no Meso-proterozoico (Steniano ~ 1 Ga), este mais largo na amostra ARE14, também ambas amostras apresentam picos com idades Paleo-proterozoicas. É muito provável que estes grãos tenham a sua fonte primária no Craton de São Francisco, Brasil.

Palavras-chave: 1. Caracterização do mineral apatita e zircão. 2. Método de Traços de Fissão. 3. Sistemática U-Pb. 4. Estudo de história térmica.

ABSTRACT

Three apatite samples collected in the Yura region, city of Arequipa, located in the southern part of the Peruvian Andes (ARE 02, ARE 03 and ARE 04) were dated via the external detector technique. In order to validate the MTF, 40 fields of the standard Durango sample, from Mexico, were also dated, resulting in a mean age of 30.3 ± 0.8 Ma, which is statistically compatible with age obtained in several laboratories located all over the world. In the ARE 02 sample, 63 apatite grains were dated and they have a distribution whose average age value is $V_M = 113.7 \pm 2.3$ Ma. In the ARE 03 sample, 66 apatite grains were dated, resulting in an average age of $V_M = 110.1 \pm 2.4$ Ma. On the other hand, in the ARE 04 sample, 29 apatite grains were dated via the external detector method, with a mean age of 133.1 ± 8.8 Ma. These results show that the ages of these samples (ARE 02, ARE 03 and ARE 04) are statistically and geologically compatible, as they were collected in the same geological unit. These samples were also dated via Laser Ablation-Inductively coupled plasma-mass spectrometry, LA-ICP-MS, TFLA. The TFLA age of 33 apatite grains from the ARE02 sample has an average value of 103.13 ± 8.20 Ma. The TFLA age of 35 apatite grains from the ARE03 sample has a mean value of 135.52 ± 13.85 Ma. The TFLA age of 34 apatite grains from the ARE04 sample provided an average age of 101.46 ± 9.10 Ma. These results show that the ages obtained via TFLA in apatite are compatible with the ages obtained via external detector method. That is, the TFLA method can be used, which is much faster since in this method the samples do not need to be irradiated in a nuclear reactor. In addition to these three samples (ARE02, 03 and 04) another two samples, ARE06 and ARE07, were also dated via the TFLA method. The mean value of 12 grains from the ARE 06 sample resulted in an average age of 109.00 ± 13.27 Ma, while the mean value of 18 grains from the ARE07 sample was 105.21 ± 13.10 Ma. These ages are compatible with those obtained in samples ARE02, 03 and 04. In samples ARE02 and ARE03 it was possible to determine their thermal histories given that a sufficient amount of confined tracks with average lengths of 13.41 ± 0.17 μm and 13.72 ± 0.23 μm , respectively. Thermal histories were determined through the annealing model using the HeFTy program. The thermal history of sample ARE02 passed through the 120 °C isotherm 105 Ma ago and cooled linearly over a 70 Ma interval until reaching temperatures between 60 and 40 °C 45 Ma ago. The last 20 Ma are marked by a much more accelerated cooling down to room temperature. On the other hand, the thermal history of sample ARE03 would have reached a temperature of 120 °C 160 Ma ago and suffered a relatively slow cooling between 120 and 80 °C in the time interval of 160 to 105 Ma. From this point on, the thermal history of sample ARE03 is similar to the result of the thermal history of

sample ARE02. That is, these thermal histories are statistically and geologically compatible. Simultaneous ages obtained through TFLA and U-Pb were determined in zircon grains from samples ARE05, ARE07, ARE14 and ARE17, in witch the first two corresponding to igneous rocks and the last two to sedimentary rocks, all of them from Yura region. The 32 zircon grains dated via TFLA in the ARE05 sample gave a mean age of 57.66 ± 4.46 Ma and the U-Pb age a mean of 187.24 ± 3.37 Ma; 38 zircon grains from the ARE07 sample have an average age obtained via TFLA of 83.98 ± 4.40 Ma and a U-Pb age with an average of 175.77 ± 1.45 . On the other hand, the ARE 14 sample has three TFLA age peaks, one centered at 227 Ma, another at 325 Ma and the third at 478 Ma and three peaks, one at 633 Ma, another at 2 Ga and the last at 2, 5 Ga. The ARE17 sample also showed 3 TFLA age peaks, the first at 240 Ma, the second at 358 Ma and the third at 511 Ma with U-Pb ages also centered on three peaks one at 558 Ma, another at 931 Ma and the third at 2.1 Ga. It can be said that the ARE14 and ARE17 samples have a similar TFLA age distribution, given that the age peaks of each of them are compatible. On the other hand, the U-Pb ages have a Brasiliano peak (~ 600 Ma) wider in the ARE14 sample, another peak in the Meso-Proterozoic (Stenian ~ 1 Ga), this one wider in the ARE14 sample, also both samples show peaks with Paleo-Proterozoic ages. It is very likely that these grains have their primary source in the São Francisco Craton, Brazil.

Keywords: 1. Characterization of the mineral apatite and zircon. 2. Fission Track Method. 3. U-Pb systematics. 4. Study of thermal history.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: cristal (grão) de apatita. Eixos cristalográficos em diferentes perspectivas.	3
Figura 2: modelo de caminhos de resfriamento para F-apatita através das zonas de estabilidade de traços.	4
Figura 3: ilustração esquemática de um mineral atacado que revela traços confinados e superficiais de diferentes dimensões.	6
Figura 4: padrão da distribuição de comprimento de traços em relação ao caminho de resfriamento.	6
Figura 5: mapa geológico da região Yura com a região onde as amostras foram coletadas.	12
Figura 6: etapas de separação até a obtenção dos grãos de apatita e zircão.	14
Figura 7: empilhamento de amostras e dosímetros para irradiação.	16
Figura 8: estágios de preparação do grão para contagem de traços.	17
Figura 9: matriz de apatita na resina epóxi acompanhada da mica muscovita com campos de traços induzidos após irradiação. Amostra rotulada sobre lâmina de vidro.	18
Figura 10: microscópio óptico Leica MC170 HD.	19
Figura 11: captura sobre a mica, via sistema de microscopia Leica. Traços induzidos (esquerda); Captura sobre o grão (direita). Traços fósseis. À esquerda, podem ser observados os traços induzidos produzidos com irradiação de nêutrons pelo reator nuclear (a forma é literalmente de “traços”, em alguns casos “pontos” detalhados por serem mais escuros que o “fundo” da mica). O retângulo com arestas vermelhas, dimensionado virtualmente com o programa de microscopia do sistema Leica, foi a área escolhida que mais se adequou à presença dos traços. À direita, podem ser observados os traços fósseis. Fazer imagens dos traços fósseis sobre grão é mais complicado que imagens de traços induzidos na mica, isso porque sobre o grão a forma dos traços fósseis não pode ser perfeitamente vista a partir de apenas um único plano focal (os traços são os pequenos defeitos, — mais escuros — no presente cristal de apatita). O quadrado vermelho foi a área escolhida como a mais adequada para esse grão de apatita.	20
Figura 12: sistema LA-ICP-MS. Para as medidas de espectroscopia de massa para MTF e U-Pb nas amostras citadas foi utilizado o sistema de equipamento LA-ICP-MS do laboratório Chronuscamp, prestadora de serviços geo-termocronológicos com datação por MTF, U-Pb e U-Th/He, administrada pelo coorientador do trabalho, Dr. Cleber José Soares.	25
Figura 13: Cadeia radioativa dos isótopos. Da esquerda para à direita: série ^{238}U , ^{232}Th e ^{235}U	28
Figura 14: Ilustração das diferentes meias-vidas de ^{232}Th , ^{238}U e ^{235}U por meio do decaimento do isótopo-pai e do crescimento interno do isótopo-filho.	29
Figura 15: Ilustração do diagrama de concórdia U-Pb mostrando idades concordantes (pontos analíticos sobre a curva concórdia) e discordantes (pontos analíticos posicionados sobre a linha discórdia).	33
Figura 16: flutuação (superior) e distribuição (inferior) de 40 medidas de idade MTF via detector externo da amostra padrão para apatitas Durango. N: número de medidas; V_M : valor médio; V_{MP} : valor médio ponderado; (χ^2_v) : qui-quadrado reduzido; $(P(\chi^2_v))$: probabilidade do qui-quadrado reduzido. A linha em magenta é o valor médio aritmético da idade.	36
Figura 17: flutuação (superior) e distribuição (inferior) de 63 medidas de idade MTF via detector externo da amostra ARE02 tipo apatita. N: número de cálculos; V_M : valor médio; V_{MP} : valor médio ponderado; (χ^2_v) : qui-quadrado reduzido; $(P(\chi^2_v))$: probabilidade do qui-quadrado reduzido.	37

Figura 18: flutuação (superior) e distribuição (inferior) de 66 medidas de idade MTF via detector externo da amostra ARE03 tipo apatita. N: número de cálculos; V_M : valor médio; V_{MP} : valor médio ponderado; (χ^2_v) : qui-quadrado reduzido; $(P(\chi^2_v))$: probabilidade do qui-quadrado reduzido. 39

Figura 19: distribuição (esquerda superior), flutuação (direita superior) e diagrama radial (inferior) com 29 idades MDE da amostra ARE04 tipo apatita. N: número de medidas; VM: valor médio; VMP: valor médio ponderado; (χ^2_v) : qui-quadrado reduzido; MSWD: quadrado médio dos desvios ponderados (mean square of weighted deviates); prop.: proporção; t/σ (no diagrama radial) é um parâmetro precisão da medida baseada no seu erro individual. 41

Figura 20: distribuição (esquerda superior), flutuação (direita superior) e diagrama radial (inferior) de 34 medidas de idade MTF via LA-ICP-MS da amostra ARE04 tipo apatita. N: número de medidas; VM: valor médio; VMP: valor médio ponderado; (χ^2_v) : qui-quadrado reduzido; MSWD: quadrado médio dos desvios ponderados (mean square of weighted deviates); prop.: proporção; t/σ (no diagrama radial) é um parâmetro precisão da medida baseada no seu erro individual. 47

Figura 21: distribuição (esquerda superior), flutuação (direita superior) e diagrama radial (inferior) de 12 medidas de idade MTF via LA-ICP-MS da amostra ARE06 tipo apatita. N: número de medidas; VM: valor médio; VMP: valor médio ponderado; (χ^2_v) : qui-quadrado reduzido; MSWD: quadrado médio dos desvios ponderados (mean square of weighted deviates); prop.: proporção; t/σ (no diagrama radial) é um parâmetro precisão da medida baseada no seu erro individual. 49

Figura 22: distribuição (esquerda superior), flutuação (direita superior) e diagrama radial (inferior) de 18 medidas de idade MTF via LA-ICP-MS da amostra ARE07 tipo apatita. N: número de medidas; VM: valor médio; VMP: valor médio ponderado; (χ^2_v) : qui-quadrado reduzido; MSWD: quadrado médio dos desvios ponderados (mean square of weighted deviates); prop.: proporção; t/σ (no diagrama radial) é um parâmetro precisão da medida baseada no seu erro individual. 51

Figura 23: distribuição (esquerda superior), flutuação (direita superior) e diagrama radial (inferior) de 32 medidas de idade MTF via LA-ICP-MS da amostra ARE05 tipo zircão. N: número de medidas; VM: valor médio; VMP: valor médio ponderado; (χ^2_v) : qui-quadrado reduzido; MSWD: quadrado médio dos desvios ponderados (mean square of weighted deviates); prop.: proporção; t/σ (no diagrama radial) é um parâmetro precisão da medida baseada no seu erro individual. 53

Figura 24: distribuição (esquerda superior), flutuação (direita superior) e diagrama radial (inferior) de 38 medidas de idade MTF via LA-ICP-MS da amostra ARE07 tipo zircão. N: número de medidas; VM: valor médio; VMP: valor médio ponderado; (χ^2_v) : qui-quadrado reduzido; MSWD: quadrado médio dos desvios ponderados (mean square of weighted deviates); prop.: proporção; t/σ (no diagrama radial) é um parâmetro precisão da medida baseada no seu erro individual. 55

Figura 25: distribuição (superior) e flutuação (inferior) de 27 medidas de idade MTF via LA-ICP-MS da amostra ARE14. N: número de medidas. 57

Figura 26: distribuição (superior) e flutuação (inferior) de 37 medidas de idade MTF via LA-ICP-MS da amostra ARE17. N: número de medidas. 59

Figura 27 : idade 6/8 da amostra ARE07. Distribuição (superior) e diagrama de concórdia (inferior) 63

Figura 28: idade de concórdia da amostra ARE14. Distribuição (superior) e diagrama de concórdia (inferior). 65

Figura 29: idade de concórdia da amostra ARE17. Distribuição (superior) e diagrama de concórdia (inferior).....	67
Figura 30: distribuição de comprimento de traços confinados da amostra ARE02 (superior) e ARE03 (inferior).....	70
Figura 31: flutuação das medidas Dpar em cada grão de apatita da amostra ARE02. N: número de medidas; Vm: valor médio aritmético; σ : desvio padrão. Linha em vermelho é a média.....	71
Figura 32: flutuação medida Dpar para cada grão da amostra de apatita ARE03. N: número de medidas; Vm: valor médio aritmético; σ : desvio padrão. Linha em vermelho é a média.....	72
Figura 33: História térmica da amostra ARE02. Temperature: temperatura; Time: tempo. Área da cor lilás representa as curvas de história térmica de maior compatibilidade com os dados observados da amostra ARE02. A área de cor verde representa curvas de menor compatibilidade, mas ainda aceitáveis de acordo com os dados observados. A curva azul é o caminho médio ponderado das curvas encontradas.	74
Figura 34: História térmica da amostra ARE03. Temperature: temperatura; Time: tempo. Área da cor lilás representa as curvas de história térmica de maior compatibilidade com os dados observados da amostra ARE03. A área de cor verde representa curvas de menor compatibilidade, mas ainda aceitáveis de acordo com os dados observados. A curva azul é o caminho médio ponderado das curvas encontradas.	75
Figura 35: Modelo Geológico da evolução tectônica da região de Arequipa.....	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: informações posicionais, tipo mineral, tipo de rocha e descrição das amostras coletadas em Yura, Arequipa.....	11
Tabela 2: valores dos fatores da Equação da Idade para MTF-MDE.....	23
Tabela 3: Isótopos, abundâncias, meia-vida, constante de decaimento. Sistemática U-Pb.....	28
Tabela 4: comprimento e angulação em relação ao eixo C dos traços confinados na amostra ARE 02.....	68
Tabela 5: comprimento e angulação em relação ao eixo C dos traços confinados na amostra ARE 03.....	69
Tabela 6: resumo dos resultados das datações MDE, MTLA e U-Pb.....	76
Tabela 7: medidas do MDE e idades correspondentes para amostra ARE02. Esta tabela contém informações sobre a contagem, número do grão (posição na matriz), medidas de traços fósseis e induzidos, com suas respectivas densidades ($10^6/\text{cm}^2$) e as idades aparentes correspondentes calculadas a partir da equação da idade para o MDE. Aqui fica representado os grãos que puderam ser datados e os grãos que, por insuficiência e alguma medida, não puderam ter idades determinadas. Nesse caso o símbolo “--” informa os grãos que não selecionados para datação. Ns: número de traços fósseis; Ni: número de traços induzidos; ps: densidade de traços fósseis; t: idade aparente MDE. Fonte: o autor.	88
Tabela 8: medidas do MDE e idades correspondentes para amostra ARE03. Esta tabela contém informações sobre a contagem, número do grão (posição na matriz), medidas de traços fósseis e induzidos, com suas respectivas densidades ($10^6/\text{cm}^2$) e as idades aparentes correspondentes calculadas a partir da equação da idade para o MDE. Aqui fica representado os grãos que puderam ser datados e os grãos que, por insuficiência e alguma medida, não puderam ter idades determinadas. Nesse caso o símbolo “--” informa os grãos que não selecionados para datação. Ns: número de traços fósseis; Ni: número de traços induzidos; ps: densidade de traços fósseis; t: idade aparente MDE. Fonte: o autor.	89
Tabela 9: medidas do MDE e idades correspondentes para amostra ARE04. Esta tabela contém informações sobre a contagem, número do grão (posição na matriz), medidas de traços fósseis e induzidos, com suas respectivas densidades ($10^6/\text{cm}^2$) e as idades aparentes correspondentes calculadas a partir da equação da idade para o MDE. Aqui fica representado os grãos que puderam ser datados e os grãos que, por insuficiência e alguma medida, não puderam ter idades determinadas. Nesse caso o símbolo “--” informa os grãos que não selecionados para datação. Ns: número de traços fósseis; Ni: número de traços induzidos; ps: densidade de traços fósseis; t: idade aparente MDE. Fonte: o autor.	90
Tabela 10: medidas do MDE e idades correspondentes para amostra Durango. Esta tabela contém informações sobre os campos selecionados para medidas de traços fósseis e induzidos, com suas respectivas densidades ($10^6/\text{cm}^2$) e as idades aparentes correspondentes calculadas a partir da equação da idade para o MDE. Essas medidas foram realizadas em uma amostra Durango de grão único. Ns: número de traços fósseis; Ni: número de traços induzidos; ps: densidade de traços fósseis; t: idade aparente MDE; σ : desvio individual. Fonte: o autor.	91
Tabela 11: medidas do MTLA e idades correspondentes para amostra ARE02. Esta tabela indica os grãos selecionados para ablação, densidade de traços fósseis ($10^6/\text{cm}^2$) e a quantidade de urânio em ppm. Ns: número de traços fósseis; Uppm: quantidade de urânio em partes por milhão; ps: densidade de traços fósseis; E[Uppm]: desvio de Uppm t: idade aparente MTLA. Fonte: o autor.....	92

Tabela 12: medidas do MTLA e idades correspondentes para amostra ARE03. Esta tabela indica os grãos selecionados para ablação, densidade de traços fósseis ($10^6/\text{cm}^2$) e a quantidade de urânio em ppm. Ns: número de traços fósseis; Uppm: quantidade de urânio em partes por milhão; ps: densidade de traços fósseis; E[Uppm]: desvio de Uppm t: idade aparente MTLA. Fonte: o autor.....93

Tabela 13: medidas do MTLA e idades correspondentes para amostra ARE04. Esta tabela indica os grãos selecionados para ablação, densidade de traços fósseis ($10^6/\text{cm}^2$) e a quantidade de urânio em ppm. Ns: número de traços fósseis; Uppm: quantidade de urânio em partes por milhão; ps: densidade de traços fósseis; E[Uppm]: desvio de Uppm t: idade aparente MTLA. Fonte: o autor.....94

Tabela 14: medidas do MTLA e idades correspondentes para amostra ARE06. Esta tabela indica os grãos selecionados para ablação, densidade de traços fósseis ($10^6/\text{cm}^2$) e a quantidade de urânio em ppm. Ns: número de traços fósseis; Uppm: quantidade de urânio em partes por milhão; ps: densidade de traços fósseis; E[Uppm]: desvio de Uppm t: idade aparente MTLA. Fonte: o autor.....95

Tabela 15: medidas do MTLA e idades correspondentes para amostra ARE07. Esta tabela indica os grãos selecionados para ablação, densidade de traços fósseis ($10^6/\text{cm}^2$) e a quantidade de urânio em ppm. Ns: número de traços fósseis; Uppm: quantidade de urânio em partes por milhão; ps: densidade de traços fósseis; E[Uppm]: desvio de Uppm t: idade aparente MTLA. Fonte: o autor.....96

Tabela 16: medidas do MTLA e idades correspondentes para amostra ARE05. Esta tabela indica os grãos selecionados para ablação, densidade de traços fósseis ($10^6/\text{cm}^2$) e a quantidade de urânio em ppm. Ns: número de traços fósseis; Uppm: quantidade de urânio em partes por milhão; ps: densidade de traços fósseis; E[Uppm]: desvio de Uppm t: idade aparente MTLA. Fonte: o autor.....97

Tabela 17: medidas do MTLA e idades correspondentes para amostra ARE07 tipo zircão. Esta tabela indica os grãos selecionados para ablação, densidade de traços fósseis ($10^6/\text{cm}^2$) e a quantidade de urânio em ppm. Ns: número de traços fósseis; Uppm: quantidade de urânio em partes por milhão; ps: densidade de traços fósseis; E[Uppm]: desvio de Uppm t: idade aparente MTLA. Fonte: o autor. 98

Tabela 18: medidas do MTLA e idades correspondentes para amostra ARE14. Esta tabela indica os grãos selecionados para ablação, densidade de traços fósseis ($10^6/\text{cm}^2$) e a quantidade de urânio em ppm. Ns: número de traços fósseis; Uppm: quantidade de urânio em partes por milhão; ps: densidade de traços fósseis; E[Uppm]: desvio de Uppm t: idade aparente MTLA. Fonte: o autor.....99

Tabela 19: medidas do MTLA e idades correspondentes para amostra ARE17. Esta tabela indica os grãos selecionados para ablação, densidade de traços fósseis ($10^6/\text{cm}^2$) e a quantidade de urânio em ppm. Ns: número de traços fósseis; Uppm: quantidade de urânio em partes por milhão; ps: densidade de traços fósseis; E[Uppm]: desvio de Uppm t: idade aparente MTLA. Fonte: o autor..... 100

Tabela 20: razões isotópicas (à esquerda) 238/206 e 207/206 e idades (à direita) 75, 76, 68 e de Concórdia da amostra ARE05. Grãos com números acompanhados da letra “b” indica uma segunda ablação no mesmo grão. 101

Tabela 21: razões isotópicas (à esquerda) 238/206 e 207/206 e idades (à direita) 75, 76, 68 e de Concórdia da amostra ARE07. Grãos com números acompanhados da letra “b” indica uma segunda ablação no mesmo grão. Fonte: o autor. 102

Tabela 22: razões isotópicas (à esquerda) 238/206 e 207/206 e idades (à direita) 75, 76, 68 e de Concórdia da amostra ARE14. Grãos com números acompanhados da letra “b” indica uma segunda ablação no mesmo grão.
Fonte: o autor. 103

Tabela 23: razões isotópicas (à esquerda) 238/206 e 207/206 e idades (à direita) 75, 76, 68 e de Concórdia da amostra ARE17. Grãos com números acompanhados da letra “b” indica uma segunda ablação no mesmo grão.
Fonte: o autor. 104

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MTF: Método de Traço de Fissão

MDE: Método de Traço de Fissão com detector externo

MTLA: Métodos de traço de Fissão via espectrometria de massa por ablação a laser

U-Pb: urânio-chumbo (refere-se a sistemática que envolve o decaimento radioativo de isótopos de urânio até que alcance os de chumbo)

LA-ICP-MS: *Ablation-Inductively coupled plasma-mass spectrometry* (espectrometria de massa com fonte de plasma indutivamente acoplada com ablação a laser)

TFLA: Idade de traço de fissão por datação com espectrometria de massa (em que se refere à técnica com ablação a laser)

TF: traço de fissão

gpDETRAN: grupo de pesquisa Detectores de Traços Nucleares

HT: história térmica

MO: microscopia ótica

ZAP: Zona de *Annealing* Parcial

ZAT: Zona de *Annealing* Total

F-apatita: fluorapatita

Cl-apatita: clorapatita

CMT: comprimento médio de traços

MSWD: *mean square of weighted deviates* (quadrado médio dos desvios ponderados)

ppm: partes por milhão

Uppm: partes por milhão de urânio

TC: traço confinado

LISTA DE SÍMBOLOS

HF: ácido fluorídrico

HNO₃: ácido nítrico

NaOH: hidróxido de sódio

KOH: hidróxido de potássio

HCl: ácido clorídrico

λ_F : constante de decaimento por fissão do ²³⁸U

λ_α : constante de decaimento alfa do ²³⁸U

R_M : probabilidade por núcleo alvo da indução da fissão do isótopo ²³⁵U acontecer devido a fluência de nêutrons térmicos

t: idade aparente MTF; idade U-Pb

t₀: idade MTF corrigida

U: urânio

Th: tório

Pb: chumbo

χ^2_v : qui-quadrado reduzido

P(χ^2_v): probabilidade do qui-quadrado reduzido

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 MÉTODO DE TRAÇO DE FISSÃO (MTF)	1
1.2 CINÉTICA DE ANNEALING	2
1.3 SISTEMÁTICA U-PB (SISTEMA LA-ICP-MS)	7
1.4 GEOLOGIA DA REGIÃO DE ESTUDO	8
2 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS	9
3 MATERIAIS E METODOLOGIA.....	11
3.1 AMOSTRAGEM	11
3.2 SEPARAÇÃO MINERAL E MONTAGEM DAS AMOSTRAS	12
3.2 MÉTODO DE TRAÇO DE FISSÃO VIA DETECTOR EXTERNO (APATITA)	15
3.2.1 Produção de Traços Induzidos	15
3.2.2 Equação da Idade Mtf-.....	20
3.2.2.1 Calibração Absoluta do MDE (Fator R_m)	23
3.3 MTF POR ESPECTROMETRIA DE MASSA (SISTEMA LA-ICP-MS)	24
3.3.2 EQUAÇÃO DA IDADE MTF VIA LA-ICP-MS	26
3.4 SISTEMÁTICA U-Pb.....	28
3.4.1 EQUAÇÃO DA IDADE U-Pb.....	30
3.4.2 DIAGRAMA DE CONCÓRDIA	32
4 RESULTADOS	34
4.1 DATAÇÃO MTF-DE (AMOSTRAS APATITAS ARE02, ARE03, ARE04 E DURANGO)	34
4.2 DATAÇÃO MTF POR ESPECTROMETRIA DE MASSA LA-ICP-MS (AMOSTRAS DE APATITA).....	42
4.3 DATAÇÃO MTF POR ESPECTROMETRIA DE MASSA LA-ICP-MS (AMOSTRAS DE ZIRCÃO).....	52
4.4 DATAÇÃO U-Pb POR ESPECTROMETRIA DE MASSA LA-ICP-MS (AMOSTRAS DE ZIRCÃO).....	60
4.5 ESTUDO DE HISTÓRIA TÉRMICA DAS AMOSTRAS ARE02 E ARE03	68
5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	76
6. CONCLUSÕES	80
7. REFERÊNCIAS	82
APÊNDICE A (MDE EM AMOSTRAS DE APATITA)	88
APÊNDICE B (MTLA EM AMOSTRAS DE APATITA)	92
APÊNDICE C (MTLA EM AMOSTRAS DE ZIRCÃO)	97
APÊNDICE D (U-PB EM AMOSTRAS DE ZIRCÃO)	101

1 INTRODUÇÃO

O método de Traço de Fissão (MTF) e a sistemática U-Pb são metodologias de datação radiométrica baseadas no fato de minerais como apatita e zircão concentrarem naturalmente elementos químicos pesados como urânio e tório em ordem de algumas dezenas ou de centenas de partes por milhão (ppm) em sua estrutura cristalina. A alta resistência à dissolução e ao meio ambiente permite ao mineral zircão (apatita em menor grau) experimentar sucessivos ciclos de sedimentação, metamorfismo e erosão ((CARTER; BRISTOW, 2000)). Devido a essas características, ambos vêm sendo muito utilizados em datações simultâneas, com U-Pb (via LA-ICP-MS (*Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry*; espectrometria de massa com fonte de plasma indutivamente acoplada com ablação a laser) e MTF (Ver por exemplo: BONILLA et al., 2020; FENG et al., 2020; ROJAS-AGRAMONTE et al., 2014; SONG et al., 2018) para estudar eventos termocronológicos que auxiliam nos estudos da história geológica da Terra.

O propósito deste trabalho consiste em realizar uma investigação termocronológica abrangente da região dos Andes Centrais Peruanos, utilizando de forma simultânea a técnica MTF e a sistemática U-Pb. Para isso, foram analisadas amostras de apatita e zircão provenientes de Yura, distrito de Arequipa - Peru.

1.1 MÉTODO DE TRAÇO DE FISSÃO (MTF)

A fissão do isótopo natural mais abundante do urânio, o ^{238}U , presente na estrutura cristalina da apatita e do zircão produz as informações de interesse termocronológico em que se baseia o funcionamento do MTF. No processo de fissão do ^{238}U , o núcleo é dividido em dois fragmentos que se repelem em sentidos opostos em relação ao centro de massa, possuindo carga e energia capaz de deslocar átomos da estrutura cristalina ao longo do caminho, provocando as deformações que recebem o nome de traço latente; por vezes, traços fósseis (assim chamados devido passagem de tempo geralmente geológico desde sua formação).

Após um ataque químico adequado para cada tipo de mineral, os traços superficiais do grão têm suas dimensões ampliadas, da ordem de nanômetros para micras, e passam a ser visíveis através de um equipamento de microscopia ótica (MO). O número dos traços latentes na superfície do grão, isto é, a sua quantidade de ocorrências pode ser aferida em termos de densidade de traços. Por meio da análise desses traços via MO, essa medida é obtida pela contagem individual de cada traço em uma área adequada que envolva regiões onde a

distribuição de traços seja uniforme. A densidade de traços é um dado dependente da concentração do isótopo ^{238}U e do tempo decorrido desde que esses traços passaram a ser registrados de tal forma que ao se conhecer o conteúdo de urânio, sua meia-vida por fissão espontânea e a quantidade de fissões ocorridas é possível determinar uma idade pela qual os traços passaram a ser retidos.

1.2 CINÉTICA DE ANNEALING

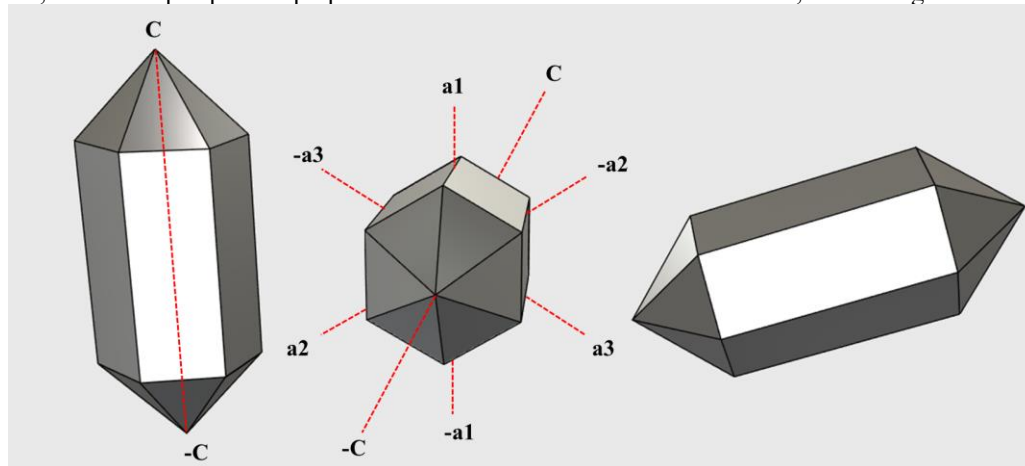
Por outro lado, os traços fósseis são sensíveis a determinadas condições de temperatura, ou seja, os grãos de apatita, bem como os de zircão, podem sofrer recozimento parcial ou integral que reseta os registros de traços de fissão no material sólido. Isto é, existe uma faixa de temperatura de *annealing* para abaixo da qual os traços passam a ser registrados e se mantêm por períodos geológicos. Acima dessa faixa os traços podem ser totalmente apagados. Ao considerar um gradiente geotérmico de 30 °C por km, sendo a temperatura na superfície de 20 °C, existe uma zona com temperaturas em que os traços fósseis são mantidos, chamada zona de retenção total (ZRT); outra zona em que são parcialmente recristalizados ou simplesmente encurtados (a depender da resistência à cinética de *annealing* para cada tipo de mineral) chamada ZAP (zona de *annealing* parcial) e uma terceira zona chamada ZAT (zona de *annealing* total) pela qual os traços formados não se mantêm e a informação cronológica é resetada (ver figura 2). De maneira geral, a temperatura que afixa a permanência de traços por períodos geológicos para a apatita é em média de 120 °C (existe complexidade acerca da proposição dessa média, como será discutida em breve) e para o zircão, 205 ± 18 °C (BERNET, 2009). Portanto as idades obtidas com o MTF se referem ao período em que esses cristais passaram por resfriamento responsável por garantir a preservação desse estado metaestável da rede cristalina portadora das informações de interesse termocronológico.

A apatita pode se apresentar contendo variedades composicionais. A apatita mais comum é a apatita rica em F chamada fluorapatita, ou simplesmente F-apatita. Outras variedades de apatita são a clorapatita (Cl-apatita), a hidroxiapatita, entre outras. Por isso quando se aborda sobre esse mineral no tocante a suas principais variedades usa-se a fórmula química $[\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})]$. A cinética de *annealing* ocorre com efetividades distintas dependendo da composição química da apatita. O alto teor de cloro permite ao mineral maior resistência ao apagamento de traços que faz deslocar a ZAP para apatitas com essa composição (SANDERS, 1998). Daí a importância da caracterização cristalográfica e química dos minerais. A isoterma que delimita a entrada na ZAT para a Cl-apatita é entrono de 130 ± 10 °C e 110 ± 10 °C para o

caso da F-apatita. Isso significa que a Cl-apatita tem mais condições de manter suas informações de interesse cronológico que a F-apatita de maneira cujas idades MTF em Cl-apatita tendem a ser mais antigas. De outra forma, supondo uma Cl-apatita experimentando a condição de 100 °C ela deve apresentar maior densidade de traços fósseis, devido a essa preservação do sistema, em concomitância de condições à uma F-apatita. Isso ressalta que o processo de *annealing* pode apresentar uma complexidade para além de sua determinação focada na apenas na evolução térmica como principal fator atuante. A composição química e as características cristalográficas dos minerais também são fundamentais para se compreender esse processo abrangentemente. O estudo de História Térmica realizado e apresentado na seção 4.5 leva em conta a medida D_{par} de cada grão analisado como parâmetro da composição de Cl na estrutura cristalina desses, em que se mede o comprimento do eixo maior da boca dos traços superficiais.

Outro aspecto que interfere na eficiência do processo de *annealing* é a orientação cristalina na formação dos traços em relação ao eixo C (eixo principal) da apatita (ver figura 1). Esse é um fenômeno que já havia sido mostrado antes de Green et al., 1986 em que os traços paralelos ao eixo principal dos cristais apresentam mais resistência ao apagamento que traços perpendiculares, mas foi em Green et al., 1986 a demonstração clara dessa propriedade anisotrópica do *annealing*. No entanto, as investigações que visam entender tantos aspectos que afetam a cinética de annealing não se esgotam e esse fenômeno é relativamente pouco conhecido. A seguir, a figura 1 é um modelo da aparência cristalográfica de um grão de apatita com seus eixos principais e secundários.

Figura 1: cristal (grão) de apatita. Eixos cristalográficos em diferentes perspectivas. Três perspectiva de um grão de apatita; sistema hexagonal; À esquerda: perspectiva paralela ao eixo principal C da apatita; ao centro: perspectiva perpendicular ao eixo C com eixos secundários; à direita: grão sem os eixos.

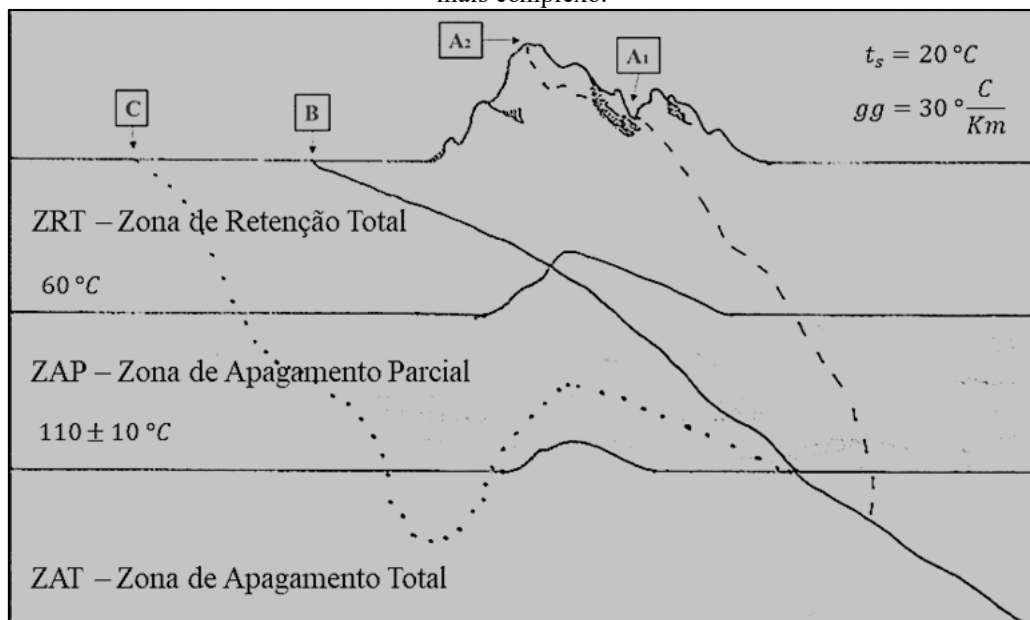


Fonte: o autor.

As aplicações na obtenção de idades (a se referir do MTF, mas também à sistemática U-Pb) incluem dados para o estudo de eventos térmicos como metamorfismo de rocha, vulcanismo, hidrotermalismo, impacto de meteoritos, entre outros, os quais descrevem formações geológicas como encontro de placas tectônicas, soerguimento de rochas, dados e análises cruciais para realizar a prospecção de minérios, além de que as idades ajudam a caracterizar o mineral e suas propriedades cristalográficas.

O esquema a seguir, apresentado na figura 2, é um modelo para apatitas do caminho de resfriamento que elas podem apresentar durante seus processos geológicos, tendo em vista as zonas de apagamento total e parcial (ZAT e ZAP). O caminho descrito em A (trajeto tracejado) é o caminho mais curto e está relacionado a um processo de resfriamento rápido das rochas, muitas vezes associado a eventos vulcânicos. O caminho B (trajeto em contínuo) está relacionado ao resfriamento lento em que as rochas passam tempo suficiente sobre as isothermas de 130 e 110 ± 10 °C no caso da Cl-apatita e F-apatita, respectivamente até 60 °C (temperatura de retenção total). O caminho C (trajeto pontilhado) é um caminho mais complexo que ilustra períodos de reaquecimento em meio ao processo de resfriamento.

Figura 2: modelo de caminhos de resfriamento para F-apatita através das zonas de estabilidade de traços. gg: gradiente geotérmico; ts: temperatura na superfície. (A) caminho de resfriamento veloz. Notar que A1 (fundo de vale) deve ter idade menor que A2 (região montanhosa). (B) resfriamento lento. (C) resfriamento não linear mais complexo.



Fonte: SANDERS, 1998 com adaptação de SILVA, 2006 e do autor.

Essas três interpretações representam diferentes caminhos temperatura-tempo que a rocha levou desde a base da ZAP até a superfície. A combinação da idade TF e o padrão de distribuição

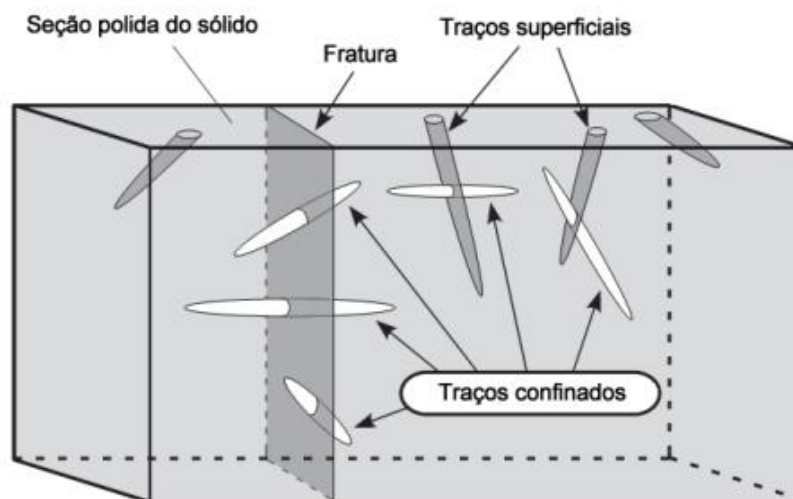
dos comprimentos de traços de uma mesma população de cristais de apatita permitem avaliar a história térmica da rocha. No entanto, são indispensáveis os parâmetros geológicos que restrinjam essas possibilidades de caminhos, dando consistência à história de resfriamento.

Outro parâmetro fundamental para as idades de traço de fissão é o comprimento dos traços confinados. Os traços fósseis frequentemente são produzidos de tal forma que fragmentos da fissão do ^{238}U alcança a superfície. Isso interrompe com a formação completa do traço no corpo do grão. Por outro lado, os traços confinados representam o caso contrário. Esse traço é produzido inteiramente dentro da estrutura cristalina. Desta forma, os traços confinados possuem relevância por manifestar as dimensões atuais dos traços da amostra em questão, mas só podem ser revelados por contato que permita a propagação da corrosão, isto é, o ataque químico realizado para revelar os traços fósseis superficiais acaba por revelar os traços confinados quando eles interceptam outros traços ou fissuras na estrutura cristalina (ver figura 3). Contudo, o encurtamento dos traços, pelo processo de *annealing*, é dependente do tempo que as amostragens passaram na ZAP e das temperaturas envolvidas. Em outras palavras, enquanto os traços superficiais são utilizados na determinação das idades TF, o encurtamento de traços (que se tem como parâmetro o comprimento de traços confinados) permite avaliar as histórias térmicas através de modelos de *annealing* aplicados em amostras de interesse.

A figura 3 logo abaixo é um modelo ilustrativo que apresenta os traços superficiais e os traços confinados revelados através da estrutura cristalina de um grão após polimento e ataque químico.

Figura 3: ilustração esquemática de um mineral atacado que revela traços confinados e superficiais de diferentes dimensões.

Estrutura do sólido polido e atacado com revelação de traços superficiais e confinados; com fratura/fissura; os traços confinados são revelados após ataque químico quando em contato do tipo: traços em fraturas – TINCLEs – e traços em traços – TINTs; TINCLEs – do inglês, *tracks-in-cleavage*; TINTs – do inglês, *tracks-in-track*.

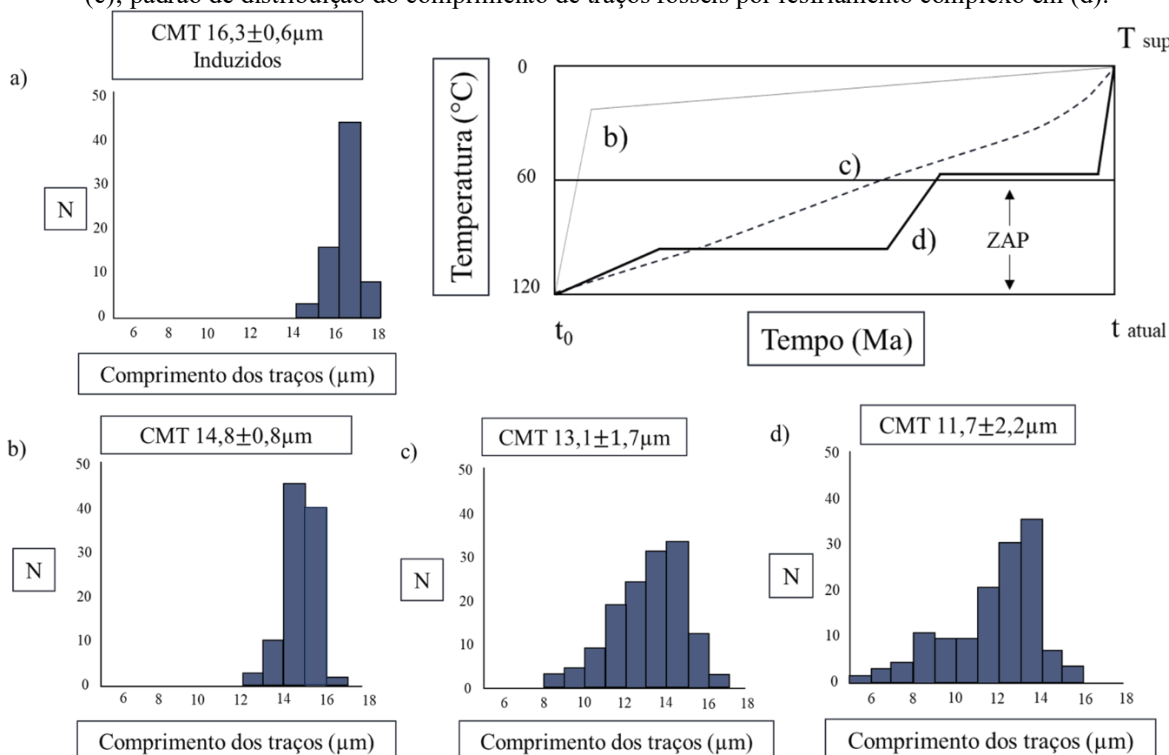


Fonte: modificado de TAGAMI; O'SULLIVAN, 2005, p. 31.

O padrão de distribuição de comprimento de traços confinados é um produto dependente do caminho de resfriamento que as amostras assumem em seus processos geológicos, ou seja, a velocidade de resfriamento, e também a se considerar a complexidade da ocorrência de eventos térmicos em meio ao processo de resfriamento, gera padrões de distribuição de comprimento de traços confinados de tal forma a se refletir no grau de dispersão, no comprimento médio e de maneira geral no plot de densidade de probabilidade que caracteriza cada distribuição de comprimentos. A seguir, tem-se a figura 4 que é um esquema que relaciona os padrões de distribuição do comprimento de traços com os caminhos de resfriamento correspondentes para apatitas. Na distribuição em (a) se tem o padrão de distribuição de traços induzido (ver seção 3.2.1), em (b) se tem o padrão de distribuição de comprimentos de traços fósseis que percorre o caminho (b), caracterizado pelo resfriamento rápido (no diagrama de caminhos localizado à direita), em (c), o padrão de distribuição de comprimentos para traços fósseis que percorre o caminho (c), caracterizado pelo resfriamento lento e em (d) o padrão de distribuição comprimentos de traços fósseis que percorre o caminho (d) com resfriamento complexo.

Figura 4: padrão da distribuição de comprimento de traços em relação ao caminho de resfriamento. CMT: comprimento médio dos traços (μm); ZAP: zona de *annealing* parcial. Padrão de distribuição dos comprimentos de traços induzidos em (a); padrão de distribuição do comprimento de traços fósseis por

resfriamento rápido em (b); padrão de distribuição do comprimento de traços fósseis por resfriamento lento em (c); padrão de distribuição do comprimento de traços fósseis por resfriamento complexo em (d).



Fonte: adaptado de DE BRUIJNE, 2001, com adaptações do autor.

1.3 SISTEMÁTICA U-Pb (SISTEMA LA-ICP-MS)

A sistemática U-Pb é uma metodologia de datação baseada nos produtos radiogênicos provenientes do decaimento dos isótopos-pai ^{238}U , ^{235}U e ^{232}Th presentes em apatita e zircão, em seus isótopos-filho ^{206}Pb , ^{207}Pb e ^{208}Pb , nesta ordem. Esses isótopos de chumbo são estáveis assim como o chumbo comum ^{204}Pb , embora o chumbo comum não seja produto radiogênico; ou seja, essa é uma metodologia que trabalha diretamente com a medida de razões isotópicas.

A sistemática U-Pb fornece dois geocronômetros ($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$, $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$) podendo ser substituídos pelo método $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, na ocasião de perda de U ou de Pb, por essa ser uma razão insensível a perda desses isótopos. Para a determinação das idades U-Pb basta que se conheça as razões isotópicas do sistema. Para obter essas razões é necessário o uso de equipamento de espectrometria de massa. Neste trabalho o sistema de espectrometria de massa utilizado foi o LA-ICP-MS (ver seção 3.3).

A elevadas temperaturas o mecanismo cinético de difusão é ativado e permite aos isótopos atravessarem a estrutura dos cristais. Neste estado tem-se a abertura do sistema isotópico e o conteúdo de importância informacional não se mantém. Os isótopos passam a ser retidos a partir de uma temperatura, chamada temperatura de fechamento, em que a difusão se encerra. Isto é,

ao se fazer uma análise de idades via U-Pb no zircão e na apatita, serão atingidas suas respectivas idades nas temperaturas de fechamento em aproximadamente 900 e 500 °C (CHAMBERLAIN; BOWRING, 2001; CHEW; DONELICK, 2012; SCHOENE; BOWRING, 2007).

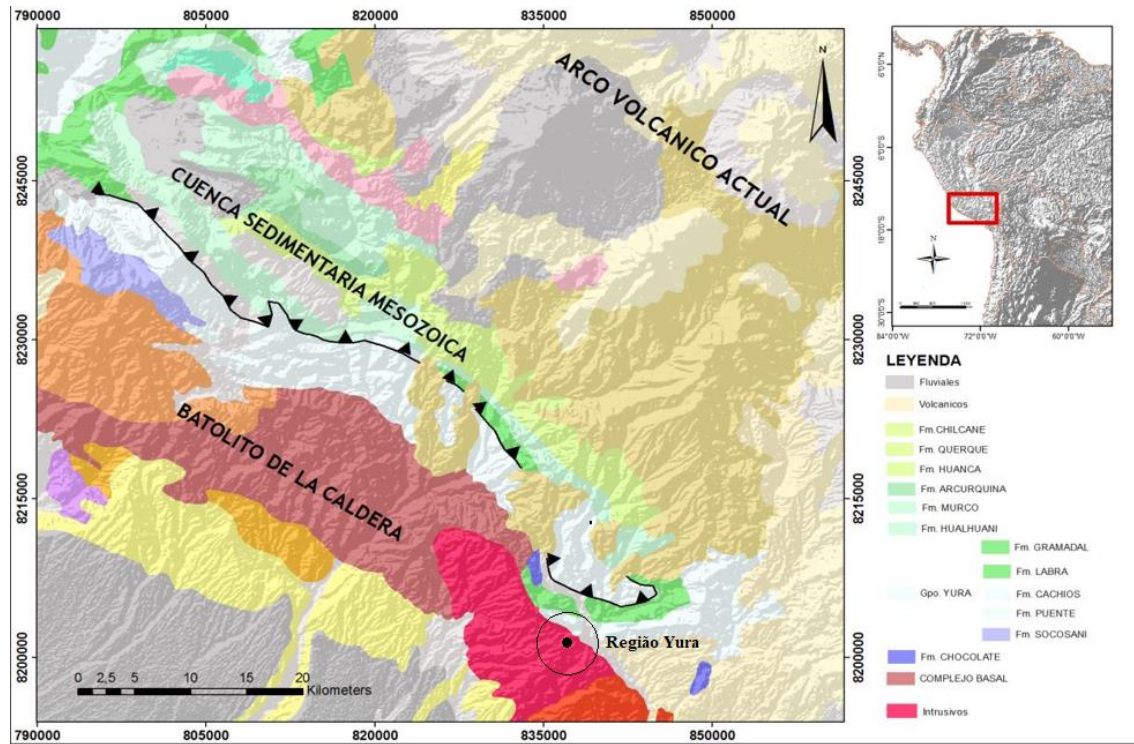
A datação U-Pb no mineral apatita através de LA-ICP-MS é mais complexa devido a apatita normalmente possuir concentrações muito baixas de U e Pb, e altas razões de chumbo comum em relação ao chumbo radiogênico, o que leva à necessidade da correção de Pb comum de forma mais elaborada do que no zircão. Assim, em contraste com o bem documentado comportamento policíclico do zircão, a apatita é instável em águas subterrâneas ácidas e perfis de intemperismo, e possui algumas limitações de estabilidade mecânica nos sistemas de transporte sedimentar (MORTON; HALLSWORTH, 1999).

1.4 GEOLOGIA DA REGIÃO DE ESTUDO

A Bacia Mesozoica de Arequipa, localizada a 35 Km ao NW da cidade homônima (*Ver Mapa na figura 1*). Inicialmente esta bacia estava definida em base a critérios litológicos, agrupando 5 formações maiormente sílico-clásticas de origem marinho (Jenks, 1948, Benavides, 1962, Vargas, 1970, León, 1981, Vicente, 1981, 2006). Há 15 anos estava-se enfocando critérios genéticos (Pino et al., 2002) o que levou a agrupar dentro desta bacia todas as unidades que participaram na formação e sua estratificação, a partir da Formação Socosani até a Formação Chilcane. Na região de Arequipa, localizada ao sul do Perú, esta bacia leva o nome de Grupo Y2ura. Este Grupo possui no seu conjunto entre 5,5 a 6,5 km de espessura mostrando uma boa continuidade, apesar que possam existir hiatos erosivos e estratigráficos. O registro estratigráfico indica que a bacia evoluciona desde um ambiente peri-vulcânico emergido com depósitos Vulcano-clásticos de trans-arco (Formação Chocolate) (Jenks, 1948; Vicente, 1981) que foram cobertos por carbonatos marinhos somero (Formação Socosani) que sofreram um afundamento pronunciado da bacia com depósitos turbilíticos (formação Puente) e logo após a depósitos marinhos profundos com forte instabilidade na bacia (Formação Cachíos), para ser preenchida por areniscas deltaicas mais submersas (formações Labra, Gramada e Hualhuani), chegando a um máximo regressivo no Cretáceo Inferior (Formação Murco, de origem fluvial distal). A bacia foi logo afetada pela grande transgressão no Cretáceo Médio (Albiano a Turoniano), que gerou a formação de uma plataforma carbonatada (Formação Arcurquina). Durante a regressão final que terminou com a bacia (Cenomaniano inferior), se depositaram capas vermelhas intercaladas com carbonatos e evaporitas (Formação Chilcane) (Vicente, 1989). Todo este perfil estratigráfico foi afetado por processos tectônicos relacionado à orogêneses dos Andes (Vicente,

1979). Estes se dividem em 2 unidades tectônicas, uma in situ e a outra transportada sendo que o seu nível de início se localiza na formação Chilcane a qual funciona como “Capa Sabão” fornecendo grandes acumulações tectônicas diapíricas (Vicente, 1979).

Figura 1: mapa geológico da região de Yura.



Fonte: Elaborado pelo autor com a ajuda do M.e Cesar Anthony Chavez Machaca.

2 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS

O objetivo global desta dissertação é aplicar as metodologias de datação MTF em cinco amostras de apatitas e a aplicação simultânea do MTF e U-Pb em quatro amostras de zircão, amostras essas coletadas na região de Yura, distrito de Arequipa - localizada nos Andes Centrais do Peru - visando iniciar um modelo geológico abrangente da evolução tectônica dessa área de estudo. Quanto as datações, das cinco amostras de apatita três foram datadas por MTF via detector externo (ARE02, ARE03 e ARE04) e essas juntamente com as restantes (ARE06 e ARE07) foram datadas por MTF via espectrometria de massa, abordagem que se demonstrou mais apropriada para datação total das amostra. Dessa forma, pôde se estabelecer um objetivo secundário, ao datar com ambas as abordagens do MTF, comparando seus resultados e a partir disso avaliar o emprego do MTF via expectrometria de massa por parte do autor. Outro objetivo

global foi construir estudo de História Térmica em apatitas com Modelo de *Annealing* para investigar os aspectos dos processos termocronológicos responsáveis pelos soerguimento dos Andes Peruanos;

São os objetivos específicos:

- Datar simultaneamente via MTF e U-Pb 4 amostras de zircão
- Datar via o MTF 5 amostras de apatita;
- • Obter a história térmica utilizando Modelo de *annealing* em duas amostra de apatita;
- Realizou-se a caracterização isotópica e química dos minerais de apatita e zircão através de espectrometria de massa;
- Caracterizar via MO a estrutura cristalina e os traços fósseis;
- Caracterizar via MO os traços induzidos no detector externo;
- Caracterizar via MO os traços confinados para a construção do estudo de História Térmica em duas amostras de apatita;
- Realizar medidas Dpar como parâmetro da composição de cloro nas amostras de apatita como etapa da construção do estudo de História Térmica;
- Realizar uma interpretação geológica global dos dados obtidos pelos métodos de datação empregados, como produto dessa dissertação;

3 MATERIAIS E METODOLOGIA

3.1 AMOSTRAGEM

A seguir, a tabela 1 apresenta as coordenadas dos pontos onde as amostras foram coletadas, suas litologias e descrição. As amostras foram coletadas com a colaboração do Prof. Pedro Figueroa, da *Universidad Nacional San Agustín de Arequipa*, UNSA, Peru, com quem o gpDETRAN (grupo de pesquisa Detectores de Traços Nucleares) tem uma estreita colaboração científica desde 2011.

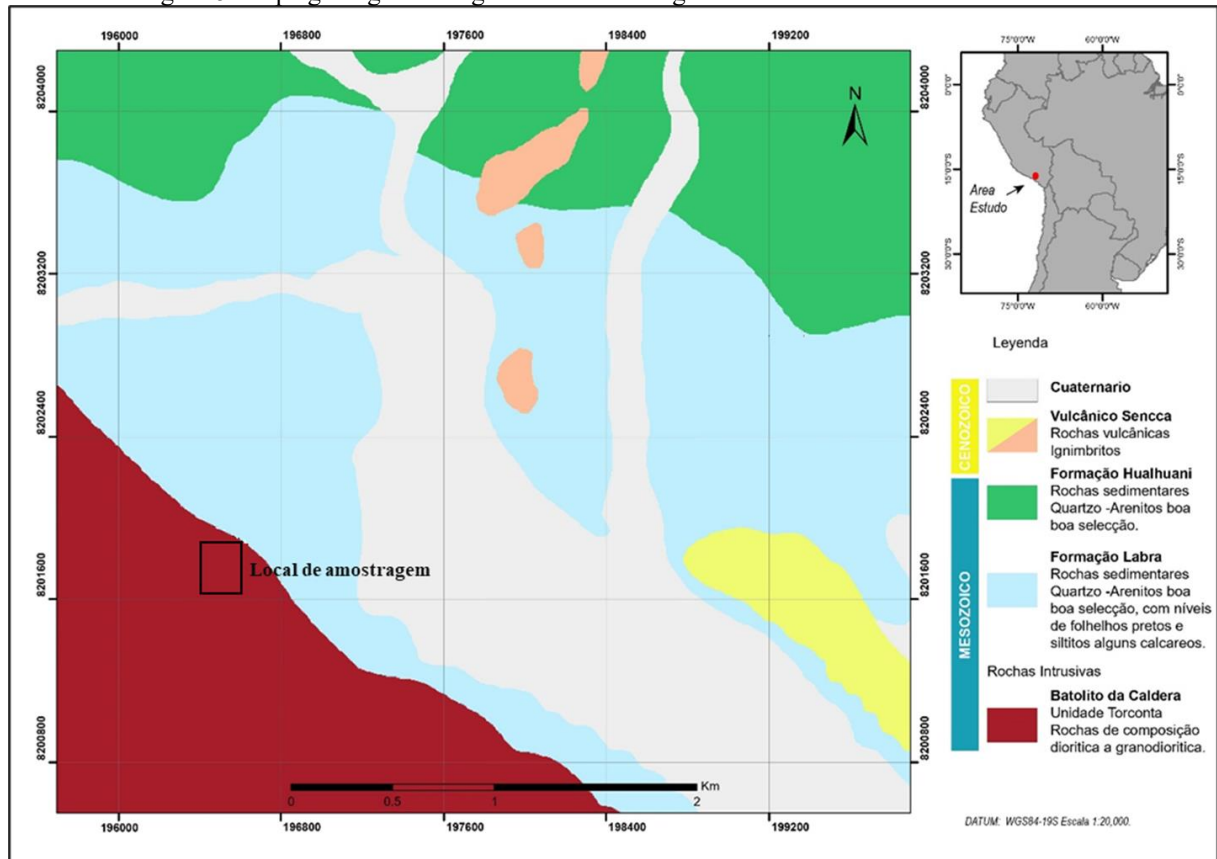
Tabela 1: informações posicionais, tipo mineral, tipo de rocha e descrição das amostras coletadas em Yura, Arequipa

Nome das amostras	Tipo de rocha, descrição e litologia	Norte	Leste	Altura $\pm$ 4m	Zona	Mineral separado
ARE02	Ígnea. Granodiorito. Intrusivos Torconta.	8201724	196362	2670	19K	Apatita
ARE03	Ígnea. Granodiorito. Intrusivos Torconta.	8201766	196363	2649	19K	Apatita
ARE04	Ígnea. Granodiorito. Intrusivos Torconta.	8201804	196379	2617	19K	Apatita
ARE05	Rocha metamórfica de baixo grado flaser. Apresenta um plano de pseudotaquilito	8201860	196381	2616	19K	Zircão
ARE06	Ígnea. Granodiorito. Intrusivos Torconta.	8201860	196405	2589	19K	Apatita
ARE07	Ígnea. Tonalito. Intrusivos Torconta. Rochas do tipo plagioclases hidrotermais (perto das águas termais de Yura a aproximadamente 20 km da cidade de Yura-Arequipa, Peru). Diorito mais antigo do que as rochas plutônicas. Não apresentam transições de metamorfismo.	8201890	196425	2556	19K	Apatita e Zircão
ARE14	quartzito, quartzito arenito com disseminações de óxido de ferro	8202550	198944	2494	19K	Zircão
ARE17	Formação Murco com depósitos eólicos. La estratificação é segada. Rocha quartzo-arenítica	8202954	199427	2712	19K	Zircão

Fonte: o autor

A seguir, apresenta-se a figura 5 que é um mapa da região de interesse geológico onde as amostras foram coletadas (retângulo com arestas em preto) com descrição das formações geológicas constituintes.

Figura 5: mapa geológico da região Yura com a região onde as amostras foram coletadas.



Fonte: Elaborado com a ajuda do Me Cesar Anthony Chavez Machaca

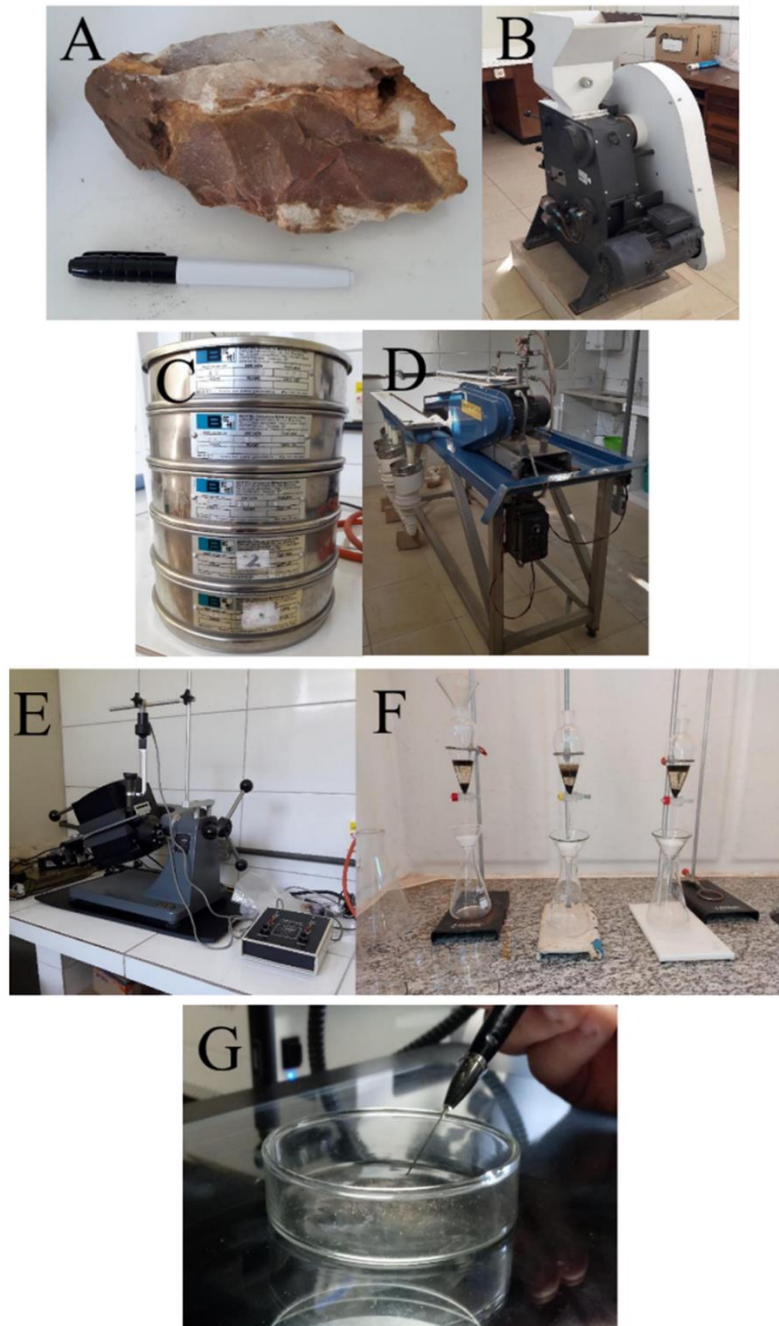
3.2 SEPARAÇÃO MINERAL E MONTAGEM DAS AMOSTRAS

A metodologia de separação mineral até a montagem do zircão (válido igualmente para apatita), segue o método de (TAGAMI et al., 1988), adaptado pelo grupo DETRAN conforme Resende, 2015. Com base nas propriedades químicas e físicas dos minerais, diversas etapas são necessárias para separar um concentrado de uma rocha. Inicialmente se faz a moagem, em que pedaços de até 5 cm de rocha (figura 6^a) são transformados em pó através de um britador de mandíbula Jaw Crusher (figura 6B). Após a moagem, o produto em obtido na forma de pó é levado ao agitador magnético de peneiras (figura 6C) por 30 minutos, com seleção de granulometria entre 180 μ m e 250 μ m, que são as dimensões ideais para grãos de zircão e de apatitas. A amostra então passa por uma mesa vibratória (figura 6D) que, através da regulação do fluxo de água e da velocidade de rotação, realiza uma separação por peso, em que os grãos

mais pesados são selecionados por esses possuírem maior probabilidade de se encontrar o zircão. Após a secagem, o concentrado passa por uma separação magnética através do equipamento Frantz Modelo LB-1 (figura 6E) pelas correntes de 0,5 A, 1 A, e 1,5 A para separar os minerais ferromagnéticos e paramagnéticos de minerais diamagnéticos como o zircão e a apatita. Em seguida, com uso de funis de separação, é realizada mais uma seleção por líquidos pesados utilizando bromofórmio, com $2,85 - 2,90 \text{ g/cm}^3$ a 20°C (figura 6F). Esse processo produz a separação adequada dos produtos mais densos como o zircão ($4,6 - 4,7 \text{ g/cm}^3$), que irão decantar até o fundo do funil, a apatita por ser menos densa do que o zircão fica em suspensão, dessa forma se pode separar a apatita do zircão. Para finalizar, se faz a separação manual desses grãos em um microscópio de baixo aumento nominal (figura 6G), procurando por suas propriedades como brilho e formato. Com uma agulha, os grãos de zircão são transferidos para uma lâmina com uma fina camada de vaselina evita os grãos escorregarem. No caso da apatita os grãos são inseridos em um molde de silicone e cobertos com resina epóxi. Esse molde facilita a remoção da resina após solidificação, evitando danos à montagem sem a necessidade de aplicar forças excessivas. As amostras tanto de apatita quanto de zircão são montadas em forma de matriz idealmente 10 por 10 grão, em seus respectivos substratos.

Para o polimento das amostras, é utilizada uma politriz equipada com controles automáticos de tempo e rotação do disco. Antes de iniciar o processo de polimento com pasta de diamante, são realizados lixamentos sequenciais utilizando lixas de 800, 1200, 2400 e 4000, respectivamente. O polimento com pasta de diamante é realizado em duas etapas, utilizando pastas de granulometria de $1 \mu\text{m}$ e $0,25 \mu\text{m}$, respectivamente.

Figura 6: etapas de separação até a obtenção dos grãos de apatita e zircão
(A) rocha bruta; (B) britador de mandíbula Jaw Crusher; (C) peneiras granulométricas; (D) mesa vibratória;
(E) Frantz; (F) funil de separação com bromofórmio; (G) separação manual de grãos.



Fonte: AZEVEDO, 2021

O ataque químico no zircão é realizado com uma mistura de NaOH:KOH (1:1 em proporção de peso) aquecida em um forno elétrico Jung sob uma temperatura de 225 °C até que derreta. A seguir, as amostras polidas são inseridas no líquido para os traços serem revelados. A duração pode variar de 4 horas até mais de 20 horas. Uma solução de HCl 5% é necessária para parar o ataque químico. O tempo ideal é aquele no qual os traços ficam com uma abertura do “etch pit” de aproximadamente 2 µm. Para isso a amostra é verificada com um microscópio

óptico com aumento de até 1500x em intervalos com tempos variados. Por outro lado, para revelação dos traços de fissão na apatita, é utilizada uma solução HNO_3 a 20%, 15°C por 20 segundos.

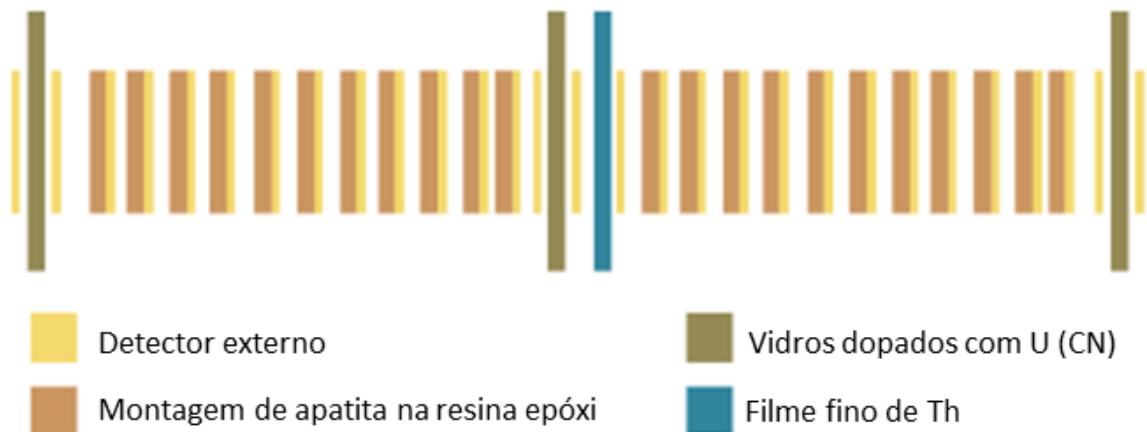
3.2 MÉTODO DE TRAÇO DE FISSÃO VIA DETECTOR EXTERNO (APATITA)

O Método de Traço de Fissão via detector externo (MDE) foi utilizado em três das amostras de apatitas coletadas da região de Yura, sendo elas ARE02, ARE03 e ARE04 e em uma amostra padrão do MTF para apatitas, a amostra Durango.

3.2.1 Produção de traços induzidos

Para a obtenção de idades de Traço de Fissão é necessário conhecer o conteúdo de ^{238}U presente nos cristais a serem datados. O MDE é uma abordagem do MTF que visa conhecer esse conteúdo de ^{238}U a partir da determinação do conteúdo do ^{235}U — um isótopo que possui uma relação constante com o ^{238}U na natureza — presente nos cristais. Para realização desse procedimento é necessário o uso de detectores externos que são acoplados justapostos às resinas epóxi contendo as apatitas (o detector é geralmente uma mica muscovita, como é o caso do presente de trabalho). Antes dessa acoplagem, a mica é atacada quimicamente com uma solução de 48% de ácido fluorídrico (HF) em 15 °C, por 90 min. Esse ataque é realizado para que eventuais traços de fissão presentes naturalmente na mica sejam revelados para diferenciá-los dos traços que serão produzidos por indução da fissão do ^{235}U . Em seguida, as amostras são levadas a um reator nuclear (o reator utilizado foi o reator do IPEN/CNEN em São Paulo, Brasil). O reator produz nêutrons rápidos ($E \sim 2,0\text{MeV}$) os quais se transformam em nêutrons térmicos ($E \sim 0,025\text{ eV}$) ao colidirem elasticamente com seu elemento moderador. Nessa condição, existe alta probabilidade de indução da fissão dos núcleos de ^{235}U contidos nos cristais. Dessa forma, os fragmentos provenientes da fissão do ^{235}U penetram a superfície da mica. A mica, por sua vez, retém os traços denominados induzidos. A fluência dos nêutrons térmicos pode ser obtida através de vidros dopados com urânio, calibrados através de filmes finos de urânio e tório naturais, que são posicionados intercaladamente com as amostras, assim como mostrado na figura 7. A fluência nominal de nêutrons térmicos utilizada na irradiação das amostras deste trabalho é da ordem de $1,0 \times 10^{15}$ nêutrons/cm².

Figura 7: empilhamento de amostras e dosímetros para irradiação.

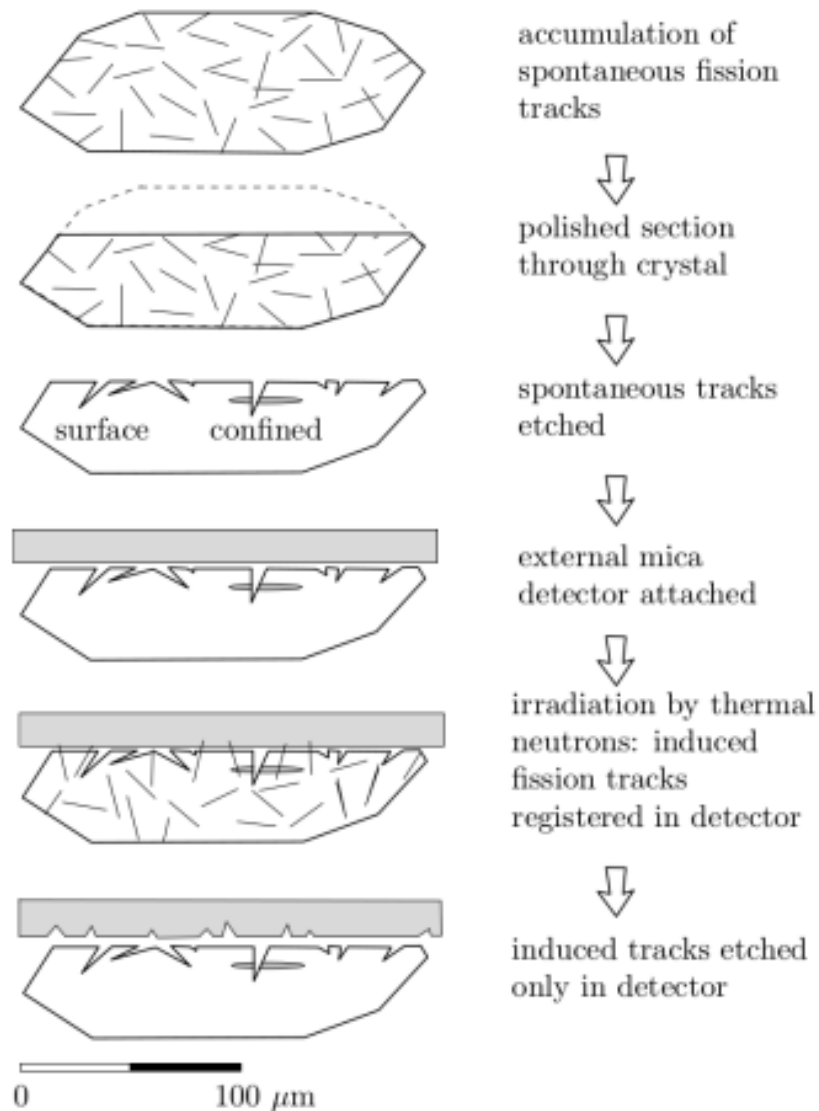


Fonte: RESENDE, 2015 com adaptações do autor.

Depois desse procedimento, as amostras são isoladas por meses até que seu manuseio seja seguro. Para revelação dos traços induzidos na mica, outro ataque químico é realizado com uma solução de 48% de HF, em 15 °C por 90 min.

A figura 8 apresenta um esquema resumido do procedimento de preparação, irradiação e ataque químico das amostras descrito até aqui.

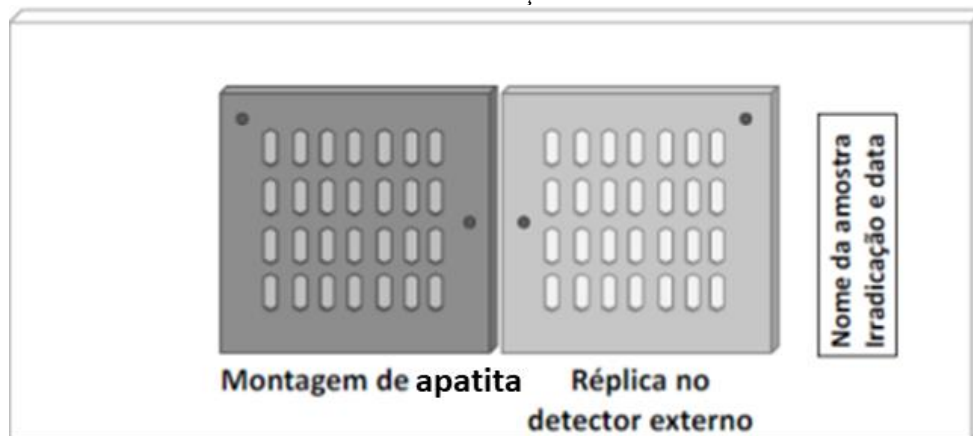
Figura 8: estágios de preparação do grão para contagem de traços.



Fonte: VERMEESCH, 2020.

A figura 9 ilustra o objeto final do procedimento de irradiação das amostras em uma lâmina de vidro devidamente rotulada para caracterização via MO. Cada matriz de apatita (idealmente 10×10) terá uma mica contendo os traços induzidos em posição espelhada à posição de cada grão de onde os traços são provenientes. A junção do detector sobreposto a resina é perfurada em um dos vértices e no meio de uma das arestas opostas. Isso garante que a posição espelhada da mica seja sempre identificável.

Figura 9: matriz de apatita na resina epóxi acompanhada da mica muscovita com campos de traços induzidos após irradiação. Amostra rotulada sobre lâmina de vidro. A matriz dos grãos de apatita após irradiação resulta em uma “outra matriz” na mica com a formação dos traços induzidos. As posições das regiões onde se formaram os traços induzidos são espelhadas às posições dos grãos fonte desses traços.

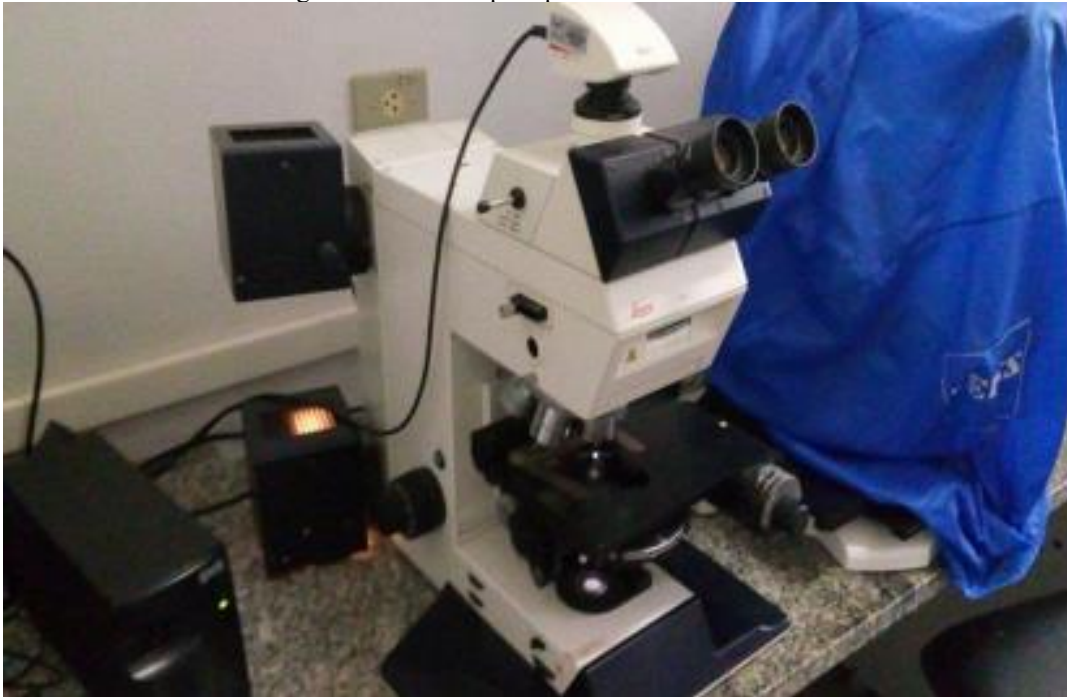


Fonte: RESENDE, 2015 com adaptação do autor.

A revelação de traços na mica geralmente se apresenta de maneira uniforme, então se pode escolher áreas aleatórias para a determinação da densidade de traços induzidos, processo realizado via MO sobre a mica. Caso os traços se apresentem de forma heterogênea, deve-se atentar à escolha de áreas para contagem da densidade de traços induzidos posicionadas igualmente àquelas que se fez no grão.

O sistema de microscopia utilizado na contagem dos traços espontâneos e induzidos foi o sistema de microscopia Leica DMRX (figura 10). Os principais aumentos nominais utilizados foram de 1.000× e 1.500×. No processo de escolha das áreas onde os traços são contados, e a densidade de traços portanto aferida, é interessante que se obtenha sempre as mesmas dimensões entre as medições nos grãos e nas micas com o benefício de facilitar o processamento de dados posterior (caso de grãos homogêneos). Entretanto nem sempre isso é possível já que frequentemente os grãos podem apresentar padrões heterogêneos de revelação de traços (grão heterogêneos). Neste caso a área escolhida deve ser a adequada para conter as maiores densidades. Quanto aos grãos denominados anômalos, não é possível fazer contagem dos traços, uma vez que esses grãos apresentam danificação completa da estrutura cristalina. Nos grãos denominados híbridos, grãos em que parte da estrutura é cristalina e outra parte significativa se apresenta danificada, as áreas são escolhidas sobre as regiões em que os traços se apresentam. Neste contexto, uma técnica procedimental importante para identificação de traços é a mudança manual no foco do microscópio. Isso porque os traços são mais facilmente identificados ao se obter uma perspectiva geral do seu formato.

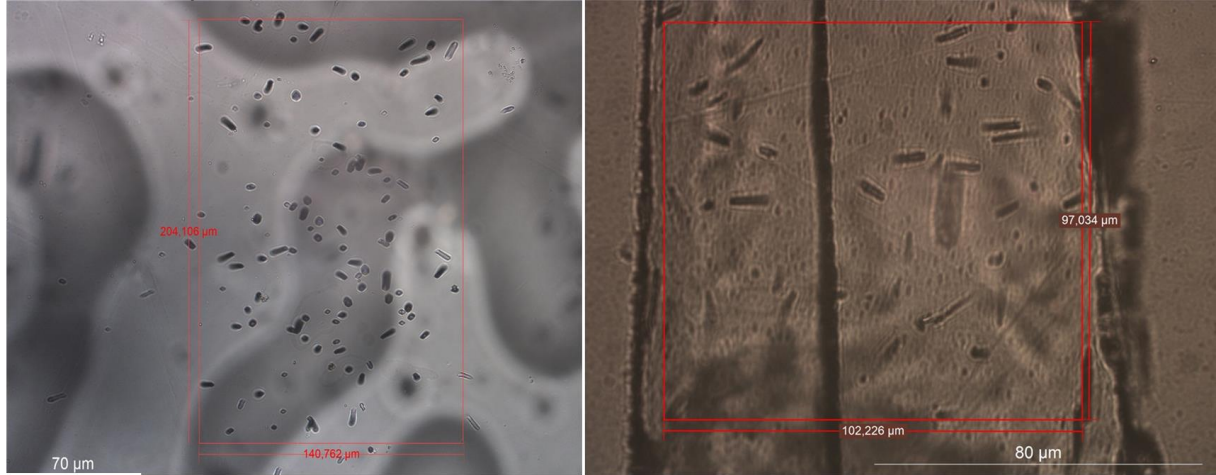
Figura 10: microscópio óptico Leica MC170 HD.



Fonte: AZEVEDO, 2021.

A figura 11 (à esquerda) é captura de uma região em uma mica a partir do microscópio, contendo os traços induzidos a título de ilustração. O que se pode observar na figura 11 é aparência de uma “silhueta” formada pelo conjunto dos traços induzidos provenientes do grão de apatita que na acoplagem da mica assumiu essa projeção. Isso é devido a que geralmente grandes quantidades de traços induzidos ocorrem sobre a mica. Contudo, a quantidade de traços espontâneos e induzidos variam de amostra para amostra. A área delimitada pelo quadrado na cor vermelha é a área escolhida para obtenção da densidade de traços induzidos. Enquanto isso, a região à direita da figura 11 ilustra uma captura através do microscópio sobre grão em que é possível observar a presença dos traços fósseis. O quadrado em vermelho é o limite de uma área escolhida para a composição da densidade dos traços fósseis.

Figura 11: captura sobre a mica, via sistema de microscopia Leica. Traços induzidos (esquerda); Captura sobre o grão (direita). Traços fósseis. À esquerda, podem ser observados os traços induzidos produzidos com irradiação de nêutrons pelo reator nuclear (a forma é literalmente de “traços”, em alguns casos “pontos” detalhados por serem mais escuros que o “fundo” da mica). À direita, podem ser observados os traços fósseis. O retângulo com arestas vermelhas, dimensionado virtualmente com o programa de microscopia do sistema Leica, representa a área escolhida que mais se adequou à presença dos traços. Fazer imagens dos traços fósseis sobre grão é mais complicado que imagens de traços induzidos na mica, isso porque sobre o grão a forma dos traços fósseis não pode ser perfeitamente vista a partir de apenas um único plano focal (os traços são os pequenos defeitos, — mais escuros — no cristal de apatita).



Fonte: o autor.

3.2.2 Equação da idade MTF-MDE

A equação da idade MTF-MDE deriva da relação do decaimento radioativo de um átomo-pai para o seu átomo-filho. A variação da quantidade de átomos-pais em um determinado tempo infinitesimal está relacionada com a quantidade de átomos-pais restantes por um fator λ (a^{-1}) que representa a taxa de decaimento radioativo, como expressão:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (1)$$

Integrando (1) e considerando N_0 como sendo a quantidade original de átomos-pais, se tem:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2)$$

Ou

$$N_0 = N e^{\lambda t} \quad (2)$$

Os átomos-filhos podem ser expressos em termos de N_D tal como:

$$N_D = N_0 - N \quad (3)$$

Com (3), (2) pode ser expresso na forma:

$$N_D = N(e^{\lambda t} - 1) \quad (4)$$

Pode-se adaptar (4) especificando os átomos-pais restantes como sendo os isótopos do ^{238}U , fazendo N como N^{238} . Por outro lado, a constante de decaimento total (λ_D) para o ^{238}U é composta pelas constantes de decaimento por fissão espontânea (λ_F) e por decaimento alfa (λ_α) de forma que a constante decaimento total é a soma. De ambas, se entende que a quantidade de decaimentos por fissões espontâneas segue uma relação proporcional a λ_F/λ_D . Isto é, a porção de decaimentos por fissões espontâneas é uma parcela dos decaimentos que o ^{238}U pode apresentar. Com isso se tem uma expressão para a quantidade de traços por fissão espontânea:

$$N_S = \frac{\lambda_F}{\lambda_D} N^{238} (e^{\lambda_D t} - 1) \quad (5)$$

Ao fazer a aproximação de que λ_D é igual a λ_α com argumento de que a constante de decaimento alfa é muito maior do que a constante de decaimento por fissão espontânea e resolvendo a equação 4 para o isolamento de t , se obtém o seguinte:

$$t = \frac{1}{\lambda_\alpha} \ln \left(\frac{\lambda_\alpha}{\lambda_F} \frac{N_S}{N^{238}} + 1 \right) \quad (6)$$

A determinação de N^{238} pode ser realizada a partir da quantidade de ^{235}U , isso devido ao isótopo do ^{235}U possuir uma relação linear na natureza com o isótopo do ^{238}U , tendo em vista a concentração isotópica C^{238} (ver tabela 2). A quantidade N^{235} , ou seja, dos isótopos de ^{235}U pode ser aferida através da irradiação da amostra em um reator nuclear. A fluência de nêutrons térmicos (Φ) produz a indução do ^{235}U de acordo com sua seção de choque (σ , ver tabela 2), de tal forma que:

$$N_i = N^{235} \sigma \Phi \quad (7)$$

Sendo N_i as ocorrências dos traços de fissão induzidos. Quanto à relação linear entre os isótopos de U, pode se modificar (7) para:

$$N_i = \frac{N^{238}}{C^{238}} \sigma \Phi \quad (8)$$

A equação em (8) permite reescrever (6) de tal forma a se obter:

$$t = \frac{1}{\lambda_\alpha} \ln \left(\frac{\lambda_\alpha}{\lambda_F} \frac{N_s}{N_i} \frac{\sigma \Phi}{C^{238}} + 1 \right) \quad (9)$$

N_s e N_i são parâmetros que podem ser medidos a partir da contagem de traços fósseis e traços induzidos com a caracterização por MO no grão e na mica, após irradiação e ataque químico. A densidade de traços fósseis (induzidos) representada por ρ_s (ρ_i) é uma densidade obtida sobre a superfície do grão (detector externo), portanto, a densidade desses traços precisa ser adequada planar e espacialmente, inclusive compreendendo os fatores físico-químicos do ataque químico que influenciam o processo de revelação de traços. Desta forma, ρ_s (ρ_i) é composta pelos termos:

$$\rho_s = g_s N_s R_s \eta_s f(t)_s q_s \quad (10)$$

$$\rho_i = g_i N_i R_i \eta_i f(t)_i q_i \quad (11)$$

Em que $\rho_{s/i}$ é a densidade superficial de traços espontâneos/induzidos, $g_{s/i}$ é o fator de geometria para traços espontâneos/induzidos (na apatita ou no zircão, ver tabela 2), $R_{s/i}$ é o comprimento médio após o ataque químico dos traços espontâneos/induzidos, $\eta_{s/i}$ é a eficiência do ataque químico sobre os traços espontâneos/induzidos, $f(t)_{s/i}$ é o fator de tempo na execução do ataque químico para revelação de traços espontâneos/induzidos, $q_{s/i}$ é o fator de observação para traços espontâneos/induzidos (TOGLIATTI, V. 1965; BHANDARI et al., 1971 apud WAGNER; VAN DEN HAUTE, 1992). Em (9) a equação da idade ocorre em termos da razão $\frac{N_s}{N_i}$ que pode ser expandida considerando (10) e (11), ao isolar N_s e N_i . Nesse passo, pode-se aglutinar os termos entre (10) e (11) que se relacionam, bem como a seguir:

$$g = \frac{g_i}{g_s} \quad (12)$$

$$\varepsilon_{238} = \eta_s f(t)_s q_s ; \varepsilon_{235} = \eta_i f(t)_i q_i \quad (13)$$

$$\frac{R_i}{R_s} = 1 \quad (14)$$

Os alcances de ataque químico médio R_s e R_i assumem o mesmo valor em uma mesma amostra e se cancelam. Os fatores σ e Φ podem ser unidos em (9). Então, pode-se reescrever a equação (9), tendo em vista (10) e (11) simplificados em (12), (13) e (14). Desta forma, se tem:

$$t = \frac{1}{\lambda_\alpha} \ln \left(\frac{\lambda_\alpha \rho_s \varepsilon_{235}}{\lambda_F \rho_i \varepsilon_{238}} \frac{gR}{C^{238}} + 1 \right) \quad (15)$$

Em que (15) é a equação da idade em termos das densidades superficiais de traços de fissão e de traços induzidos, $\varepsilon_{238/235}$ é compreendido como a eficiência de fragmentos de fissão espontânea/induzida que se pode considerar a razão como 1 em condições equivalentes de revelação e contagem de traços espontâneos e induzidos. No caso de amostras afetadas pelo *annealing*, a densidade dos traços espontâneos diminui, fazendo ε_{238} menor que ε_{235} (BIGAZZI et al., 1991). Ver WAGNER; VAN DEN HAUTE, 1992 para mais detalhes da demonstração da equação da idade MDE.

Tabela 2: valores dos fatores da Equação da Idade para MTF-MDE

Constante	Valor
λ_α (constante de decaimento alfa do ^{238}U)	$\sim 1,55125 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$ (JAFNEY et al., 1971)
λ_F (constante de decaimento por fissão espontânea do ^{238}U)	$(8,37 \pm 0,17) \times 10^{-17} \text{ a}^{-1}$ (GUEDES et al., 2003)
C^{238} (concentração isotópico do ^{238}U no urânio natural)	0,99275 (LEDERER e SHIRLEY, 1978)
g (fator de geometria relacionado ao detector externo)	$0,684 \pm 0,012$ para o zircão; $0,549 \pm 0,015$ para apatita (IWANO e DANHARA, 1998)
σ (seção de choque do ^{235}U)	570,8 barn (1 barn = 10^{-24} cm^2)

Fonte: (RESENDE, 2015)

3.2.2.1 Calibração absoluta do MDE (fator R_M)

A equação (15) foi modificada pelo grupo de Cronologia da IFGW/UNICAMP com a colocação do fator R_M , que permite calibração absoluta dos parâmetros relacionados ao reator nuclear sem

a necessidade do uso de amostras padrão. Essa calibração é realizada com vidros dopados com U e Th num esquema similar ao apresentado com a figura 4 (seção 3.2.1). Ver (IUNES, 1990, 1999; IUNES et al., 2002a, 2002b; IUNES et al., 2004; IUNES et al., 2005). Os vidros dopados com U e Th recebem acoplagem dos detectores externos, os quais também têm suas densidades de traços aferidas com microscopia ótica. A seguir, a expressão para o fator R_M e, com isso, a equação da idade vinda de (15) em termos de R_M :

$$R_M = R_U + \frac{N_{Th}}{N_U} R_{Th} \quad (16)$$

$$R_U = \frac{\rho_U^V}{N_U^V \epsilon^V} \quad (17)$$

$$t = \frac{1}{\lambda_\alpha} \ln \left(\frac{\lambda_\alpha}{\lambda_F} \frac{\rho_s}{\rho_i} \frac{\epsilon_{235}}{\epsilon_{238}} \frac{g R_M}{C^{238}} + 1 \right) \quad (18)$$

Em que R_M é a probabilidade por núcleo alvo da indução da fissão do isótopo ^{235}U acontecer devido a fluência de nêutrons térmicos; R_U é o número de fissões por núcleo de urânio; N_{Th}/N_U é a razão entre tório e urânio conteúdo da amostra em que geralmente $N_U \gg N_{Th}$ fazendo o segundo termo da soma em (16) irrelevante para o cálculo do fator R_M ; R_{Th} número de fissões por núcleo de tório; ρ_U^V é a densidade superficial de traços induzidos no detector externo uma vez acoplados aos vidros dopados com urânio; N_U^V é o número de átomos de urânio por unidade de volume de vidro; ϵ^V é a razão entre a densidade de traço na mica e o número de fissões em unidade de volume de vidro.

O valor R_M usado na datação da amostra padrão para MTF em apatitas Durango foi de $2,80 \times 10^{-8} \pm 3,9\%$; nas amostras ARE02, ARE03 e ARE04 o R_M foi $6,26 \times 10^{-9} \pm 3,4\%$.

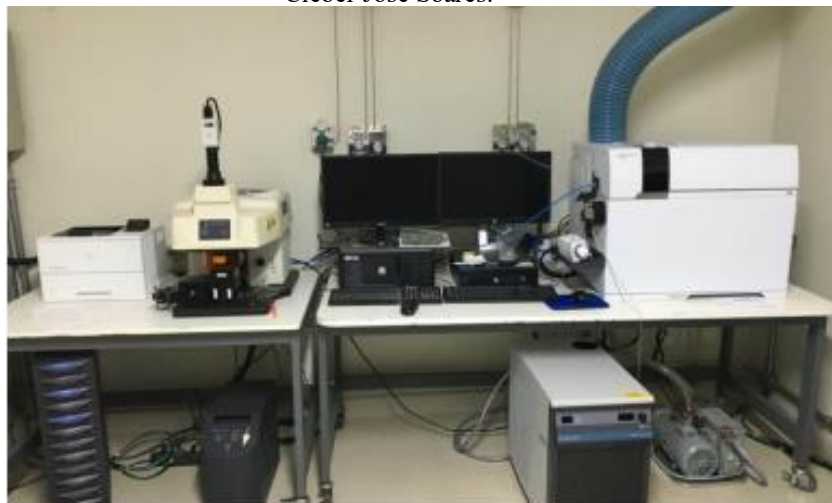
3.3 MTF POR ESPECTROMETRIA DE MASSA (SISTEMA LA-ICP-MS)

O uso do detector externo é uma abordagem do MTF que pode ser substituída vantajosamente pela abordagem do MTF por espectrometria de massa. Isso porque o processo de irradiação das amostras pelo reator nuclear pode aumentar significativamente o tempo de emprego da metodologia até que elas atinjam uma estabilidade para manejo seguro. Contudo, a aplicação simultânea dessas duas abordagens permite avaliar a concordância de idades, uma vez que elas pretendem ser equivalentes no que diz respeito aos seus produtos. Com isso, 5

amostras de apatita coletadas em Yura foram analisadas via MTF por espectrometria de massa (sistema LA-ICP-MS), sendo elas ARE02, ARE03, ARE04, ARE06 e ARE07. Outras 4 amostras de zircão, coletadas em Yura, foram juntamente analisadas, sendo elas ARE05, ARE07, ARE14 e ARE17.

Na abordagem do MTF por espectrometria de massa, se dispensa a necessidade do uso de um detector externo e no lugar pode-se conhecer o conteúdo em partes por milhão do ^{238}U (Uppm) a partir da leitura das contagens isotópicas por segundo realizadas pelo equipamento de espectrometria de massa, bastando ter uma amostra controle adequada de conteúdo de ^{238}U e ^{43}Ca (para apatita) e ^{91}Zr conhecido. O sistema de espectrometria de massa com fonte de plasma indutivamente acoplada com ablação a laser (LA-ICP-MS), que pode ser visto na figura 12 a seguir utilizado neste estudo, produz uma ablação a laser em uma área convenientemente escolhida no corpo do grão a ser analisado e como resultado o material abaixo do qual o laser incide (em uma região de aproximadamente 30 μm de diâmetro) é evaporado e serve como conteúdo para as contagens isotópicas. No mesmo processo, se obtém as informações isotópica para a aplicação da metodologia U-Pb, isto é, a mesma medida permite o emprego do MTF e do U-Pb simultaneamente.

Figura 12: sistema LA-ICP-MS. Para as medidas de espectroscopia de massa para MTF e U-Pb nas amostras citadas foi utilizado o sistema de equipamento LA-ICP-MS do laboratório Chronuscamp, prestadora de serviços geo-termocronológicos com datação por MTF, U-Pb e U-Th/He, administrada pelo coorientador do trabalho, Dr. Cleber José Soares.



Fonte: Azevedo, 2021

Essa abordagem do MTF via LA-ICP-MS é análoga ao conhecido MTF-MDE. A diferença principal ocorre nos procedimentos experimentais necessários para obtenção da concentração do isótopo ^{238}U como conteúdo das amostras. Neste caso, o que se faz é uma ablação a laser sobre uma região do corpo do mineral que é preferencialmente ao centro do grão

e em regiões onde a estrutura cristalina se apresente intacta. Outro fator importante a ser considerado é que, com alguma frequência, tanto os grãos de apatita quanto os grãos de zircão podem apresentar inclusões quando em formação. A região onde ocorrem essas inclusões devem ser evitadas no momento da seleção da área em que a ablação acontece. Isso porque as inclusões podem alterar as leituras isotópicas, uma vez que suas composições podem ser diferentes das composições dos grãos de interesse, situação essa que promove efeitos de distorção nas razões isotópicas na aplicação tanto do MTF quanto da sistemática U-Pb.

Para obtenção do conteúdo de ^{238}U em apatitas em termo de Uppm, é necessário observar as contagens por tempo de varredura realizadas pelo equipamento de espectrometria de massa dos isótopos ^{43}Ca e ^{238}U com uso de uma amostra de referência de conteúdo conhecido, como descrito na expressão a seguir:

$$U^{238} = \frac{\frac{[C_u]_{UNK}}{[C_{Ca}]_{UNK}}}{\frac{[C_u]_{REF}}{[C_{Ca}]_{REF}}} U_{REF} \quad (19)$$

Em que $[C_u]_{UNK}$ e $[C_{Ca}]_{UNK}$ são contagens por segundo dos isótopos ^{238}U e ^{43}Ca da amostra de concentração a ser determinada; $[C_u]_{REF}$ e $[C_{Ca}]_{REF}$ são as contagens por segundo dos isótopos ^{238}U e ^{43}Ca da amostra de referência; U_{REF} é a concentração de ^{238}U da amostra de conhecida e U^{238} é a concentração de ^{238}U da amostra de interesse. Para obtenção da concentração de ^{238}U para amostras de zircão, tem-se uma expressão análoga a das apatitas (19), mas considerando o isótopo ^{91}Zr em vez do ^{43}Ca . A amostra de referência utilizada na obtenção da quantidade de Uppm das amostras de apatita neste estudo foi a MT7 com razão U/Ca de aproximadamente 0,0261 e 6,9 Uppm. Para a determinação da concentração em Uppm das amostras de zircão, a amostra de referência foi a S9 com razão U/Zr aproximada em 0,00142 e 76 Uppm (WIEDENBECK et al., 1995)

3.3.2 Equação da Idade MTF via LA-ICP-MS

A equação da idade MTF (20) é uma adaptação para LA-ICP-MS obtida por SOARES et al., 2013:

$$t = \frac{1}{\lambda_\alpha} \ln \left(1 + \zeta_{ICPMS} \frac{1}{(\eta q)_{is} r_s} \frac{\rho_s}{238U} \right) \quad (20)$$

Em que ζ_{ICPMS} são fatores constantes do material a ser datado, tal que:

$$\zeta_{ICPMS} = \frac{\lambda_{\alpha}}{\lambda_f} \frac{M}{g_{4\pi} N_A \times 10^{-6} d} \quad (21)$$

Em que $\lambda_{\alpha/f}$ é a constante de decaimento alfa/decaimento por fissão espontânea do ^{238}U ; t é a idade de traço de fissão em Ma; ρ_s é a densidade superficial de traços fósseis; r_s é a média do comprimento horizontal dos traços fósseis confinados; $g_{4\pi}$ é o fator de geometria para uma superfície interna; $(\eta q)_{is}$ é a eficiência de observação e de ataque químico; N_A é a constante de avogadro; ^{238}U é a concentração ($\mu\text{g/g}$) do isótopo ^{238}U determinado via LA-ICP-MS; d é a densidade média do mineral e M é o peso isotópico do ^{238}U .

Enquanto para o cálculo da idade em MTF-MDE se tem uma calibração absoluta, para o cálculo do MTF por LA-ICP-MS se utiliza uma calibração zeta (ζ), que surgiu para corrigir valores de fatores controversos como as variáveis de λ_f e o fator $[\eta q]_{is}$, os isolando da equação e os deixando em função de um único fator, o qual pode ser descoberto pela comparação com idades de amostras já conhecidas da literatura que foram obtidas por diferentes métodos radiométricos. Pelos estudos de Hurford em VETTER et al., 1998, p. 19, temos a equação (22) para o fator ζ :

$$\zeta = \frac{e^{(t_{st}\lambda_{\alpha})} - 1}{\lambda_{\alpha} g \left(\frac{\rho_s}{\rho_i} \right)_{st}} \quad (22)$$

Em que t_{st} = idade da amostra padrão em Ma; λ_{α} = constante de decaimento alfa; g = fator de geometria; $\rho_s (\rho_i)_{st}$ = densidade de traços espontâneos (induzidos) calculados da amostra padrão. Originalmente feito para o MTF-MDE, essa equação foi adaptada para o LA-ICP-MS, obtendo a forma:

$$\zeta = \frac{e^{(t_{st}\lambda_{\alpha})} - 1}{\lambda_{\alpha} g \frac{\rho_{st}}{U_{st}}} \quad (23)$$

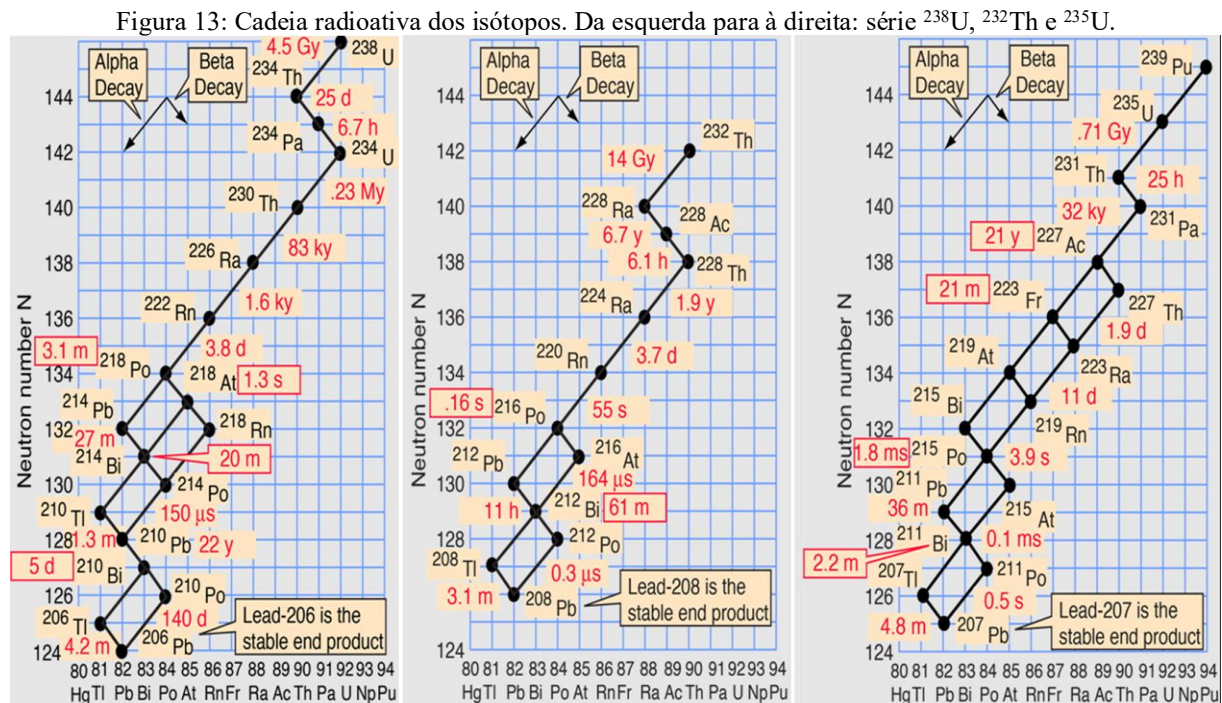
Em que $U_{st} = U_{ppm}$ da amostra padrão. A amostra padrão utilizada como referência para as amostras de zircão, neste trabalho, foi a KGD com 602,7 Uppm e zeta determinado em

$2,355 \times 10^3$. Para as amostras de apatita, a amostra padrão foi a Durango com 182,5 Uppm e zeta igual a $1,280 \times 10^3$.

3.4 SISTEMÁTICA U-Pb

Quatro amostras de Zircão foram datadas através da sistemática U-Pb, sendo elas ARE05, ARE07, ARE14 e ARE17.

A datação por U-Pb se baseia no processo de decaimento dos isótopos-pais: ^{238}U , ^{235}U e ^{232}Th ; para os respectivos isótopos-filhos: ^{206}Pb , ^{207}Pb e ^{208}Pb ; cuja cadeia radioativa de cada um está ilustrada na figura 13, a seguir.



Fonte: Hyper Physics, 2008 com adaptações do autor

A seguir, a tabela 3 contém os principais isótopos naturais de urânio e tório, suas abundâncias e meia-vida.

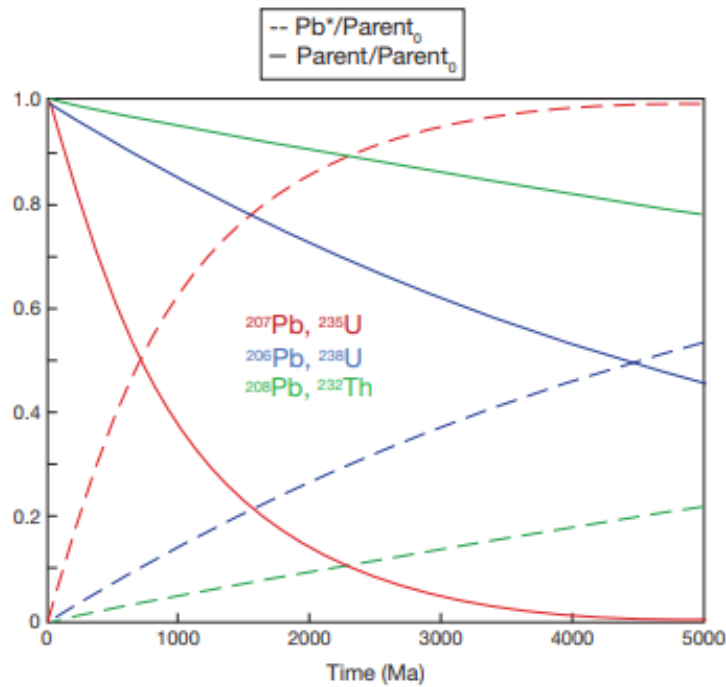
Tabela 3: Isótopos, abundâncias, meia-vida, constante de decaimento. Sistemática U-Pb

Isótopo	Abundância (%)	Meia-vida (a)	constante de decaimento (a^{-1})
^{238}U	99,2743	$4,468 \times 10^9$	$1,55125 \times 10^{-10}$
^{235}U	0,7200	$0,7038 \times 10^9$	$9,8485 \times 10^{-10}$
^{234}U	0,0057	$2,47 \times 10^5$	$2,806 \times 10^{-6}$
^{232}Th	100	$14,010 \times 10^9$	$4,9475 \times 10^{-11}$

Fonte: FAURE, 1986, p. 284.

Se o sistema permanece fechado, os isótopos-pais permanecem no cristal e o processo de decaimento faz com que esses isótopos, pela cadeia descrita na figura 13, deem origem aos seus respectivos isótopos filhos. Suas concentrações diminuem à medida que as concentrações dos isótopos-filhos aumentam a partir de uma relação inversamente proporcional conforme a passagem do tempo. A figura 14 ilustra essa dinâmica.

Figura 14: Ilustração das diferentes meias-vidas de ^{232}Th , ^{238}U e ^{235}U por meio do decaimento do isótopo-pai e do crescimento interno do isótopo-filho.



Fonte: Schoene, 2014 com adaptações do autor.

A grande meia-vida dos isótopos do início da cadeia radioativa em comparação com os últimos permite aplicar o conceito de equilíbrio secular, no qual o produto da quantidade (N) de isótopos-pais com suas respectivas constantes de decaimento (λ) é igual para os isótopos-filhos, cuja relação está representada na equação (24):

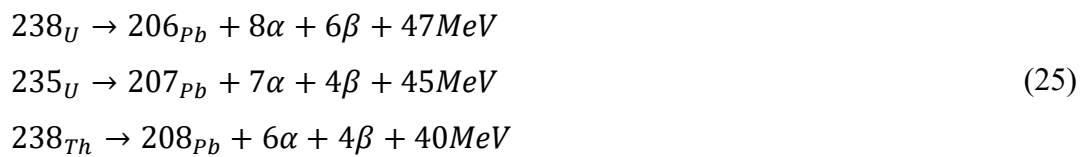
$$N_1\lambda_1 = N_2\lambda_2 = \dots = N_n\lambda_n \quad (24)$$

Para os sistemas em que não houve processos de perda de isótopos da cadeia radioativa, os chamados sistemas fechados, o equilíbrio secular será atingido com o tempo da meia-vida mais longa de algum isótopo intermediário (SCHOENE, 2014). Em processos que ocorreram perda de parte dos isótopos da cadeia radioativa é designado como sistema aberto, o equilíbrio

secular não se mantém e está relacionado no zircão a fenômenos físico-químicos e geológicos, como metamorfismo, lixiviação, metamictização entre outros. Para a sistemática U-Pb, os decaimentos de urânio passam a se acumular com temperaturas menores do que aproximadamente 900 °C, que representa a temperatura de fechamento para este sistema, considerada a maior temperatura de fechamento dos métodos de datação radioisotópicos, podendo indicar a idade de cristalização de um mineral. Detalhes adicionais dessa metodologia podem ser encontrados em TORQUATO e KAWASHITA (1996) e WILLIAMS (1998).

3.4.1 Equação da Idade U-Pb

Os produtos radiogênicos dos decaimentos dos isótopos ^{238}U , ^{235}U e ^{232}Th com suas múltiplas emissões α e β até chegar nos chumbos respectivos de cada série estão indicados na relação (25):



Reaproveita-se a equação (4) presente na seção 3.2.2, relação entre os isótopos-pais e filhos, se tem para cada reação respectivamente o conjunto de equações (25):

$$\begin{aligned} ^{206}\text{Pb} &= ^{238}\text{U}(e^{\lambda^{238}t} - 1) \\ ^{207}\text{Pb} &= ^{235}\text{U}(e^{\lambda^{235}t} - 1) \\ ^{208}\text{Pb} &= ^{232}\text{Th}(e^{\lambda^{232}t} - 1) \end{aligned} \quad (26)$$

Em que $\lambda_{238/235/232}$ são as constantes de decaimento dos isótopos ^{238}U , ^{235}U e ^{232}Th nessa ordem (rever tabela 3, seção anterior); t é o tempo desde que o sistema se fechou e a informação cronológica passou a ser registrada; A explicitação de t em (26) leva a (27), a seguir:

$$\begin{aligned} t_{206} &= \frac{1}{\lambda_{238}} \ln \left(\frac{206_{Pb}}{238_U} + 1 \right) \\ t_{207} &= \frac{1}{\lambda_{235}} \ln \left(\frac{207_{Pb}}{235_U} + 1 \right) \\ t_{208} &= \frac{1}{\lambda_{232}} \ln \left(\frac{208_{Pb}}{232_{Th}} + 1 \right) \end{aligned} \quad (27)$$

O isótopo do chumbo ^{204}Pb , o chumbo comum, é usado como referência por não ser produzido por nenhuma das cadeias de decaimentos, uma vez que esse não é produto radiogênico. Precisa ser quantificado, em (26), por estar incorporado ao mineral. Desta forma, através de suas normalizações se tem:

$$\begin{aligned} \frac{206_{Pb}}{204_{Pb}} &= \left(\frac{206_{Pb}}{204_{Pb}} \right)_0 + \frac{238_U}{204_{Pb}} (e^{\lambda_{238}t} - 1) \\ \frac{207_{Pb}}{204_{Pb}} &= \left(\frac{207_{Pb}}{204_{Pb}} \right)_0 + \frac{235_U}{204_{Pb}} (e^{\lambda_{235}t} - 1) \\ \frac{208_{Pb}}{204_{Pb}} &= \left(\frac{208_{Pb}}{204_{Pb}} \right)_0 + \frac{232_{Th}}{204_{Pb}} (e^{\lambda_{232}t} - 1) \end{aligned} \quad (28)$$

As razões simbolizadas por (206, 207 e 208Pb/204Pb) representam as razões isotópicas de chumbo radiogênico no chumbo comum do mineral quando o fechamento do sistema ocorre, já as razões de chumbo no membro direito do conjunto das equações são as razões isotópicas atuais. $^{206, 207 \text{ e } 208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ é compreendido como componente de chumbo comum para cada isótopo. A explicitação de t em (28) resulta na forma:

$$\ln \left(\frac{206_{Pb}}{204_{Pb}} + 1 \right) = \lambda_{238} t \quad (29)$$

$$t_{207} = \frac{1}{\lambda_{235}} \ln \left\{ \left[\frac{\left(\frac{207_{Pb}}{235_U} \right) - \left(\frac{207_{Pb}}{204_{Pb}} \right)_0}{\frac{235_U}{204_{Pb}}} \right] + 1 \right\}$$

$$t_{208} = \frac{1}{\lambda_{232}} \ln \left\{ \left[\frac{\left(\frac{208_{Pb}}{232_{Th}} \right) - \left(\frac{208_{Pb}}{204_{Pb}} \right)_0}{\frac{232_{Th}}{204_{Pb}}} \right] + 1 \right\}$$

A sistemática U-Pb fornece dois geocronômetros ($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ e $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$) com base em diferentes isótopos de U e Pb. O sistema precisa estar fechado para produzir idades significativas e iguais (concordantes). Na ocasião de perda de U ou Pb, os geocronômetros indicam idades diferentes (discordantes). Com a perda ou ganho de U, Pb ou Th, utiliza-se o método $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, pois esse é insensível à perda recente de U e até mesmo Pb (FAURE, 1986). O método $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ consiste em dividir a segunda equação de (28) pela primeira, tomando o conjunto de equações (26) para se obter $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ em termos da proporção natural de $^{235}\text{U}/^{238}\text{U} = 1/137,818$; razão atômica adotada pela IUGS *Subcommission on Geochronology*. Com isso, se tem:

$$\frac{^{207}_{Pb}}{^{204}_{Pb}} = \frac{\left(\frac{^{207}_{Pb}}{^{204}_{Pb}} \right) - \left(\frac{^{207}_{Pb}}{^{204}_{Pb}} \right)_0}{\left(\frac{^{206}_{Pb}}{^{204}_{Pb}} \right) - \left(\frac{^{206}_{Pb}}{^{204}_{Pb}} \right)_0} = \frac{1}{137,818} \frac{e^{\lambda_{235}t} - 1}{e^{\lambda_{238}t} - 1} \quad (30)$$

Essa equação se apresenta apenas em função do tempo; não possui solução direta e só é possível resolvê-las iterativamente através de programas como o isoplotR online.

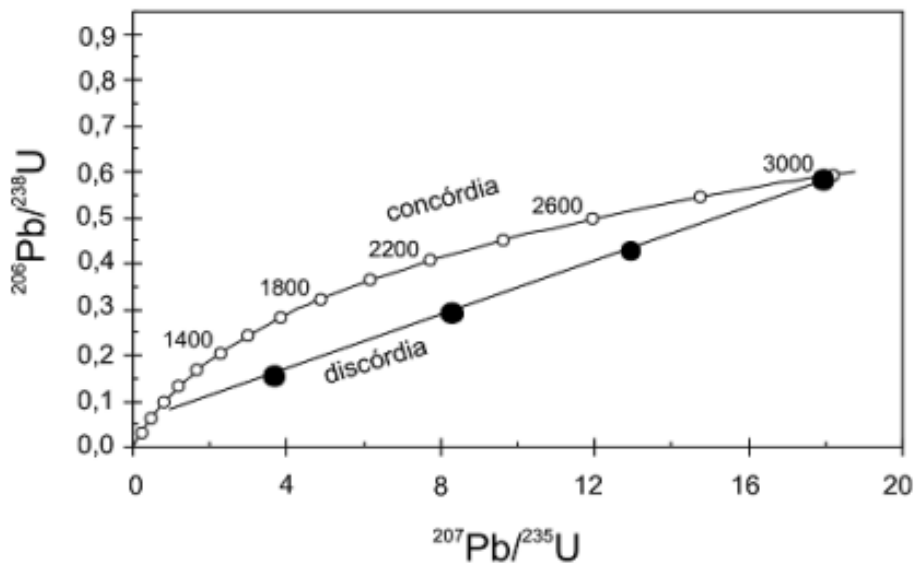
3.4.2 Diagrama de concórdia

O sistema que permaneceu idealmente fechado ao longo da sua história geológica ocasiona geocronômetros que indicam precisamente as mesmas idades. Contudo, muitos são os casos cujos zircões apresentam abertura significativa do sistema. Esse fato fez com que os geocronologistas desenvolvessem ferramentas que permitissem descrever e compreender mais abrangentemente a história geológica dos sistemas que não se mativeram preservados.

O diagrama de concórdia é uma ferramenta muito útil, conceituado por WETHERILL (1956), que toma as primeiras equações de (27) como paramétricas de uma curva. Essa curva é chamada de curva de concórdia, isso porque grãos sobre ela possuem idades estatisticamente

concordantes. Nessa situação não houve perda ou ganho dos isótopos pais ou isótopos intermediários. A razão de essa curva não ser linear é devido ao isótopos ^{238}U e ^{235}U apresentarem meias-vidas distintas. A figura 15 é uma ilustração do recurso gráfico do diagrama de concórdia.

Figura 15: Ilustração do diagrama de concórdia U-Pb mostrando idades concordantes (pontos analíticos sobre a curva concórdia) e discordantes (pontos analíticos posicionados sobre a linha discórdia).



Fonte: SATO et al., 2008.

A reta abaixo da curva de concórdia é chamada de reta da discórdia. Em um diagrama de concórdia os grãos que se apresentam sobre a reta da discórdia possuem idades que são discordantes, isto é, quando os grãos são isotopicamente preservados os geocronômetros tendem a indicar idades similares, por outro lado grãos com idades discordantes passaram por abertura do sistema, por meio de algum evento geoquímico, que produz a perda ou ganho dos isótopos que faz os geocronômetros divergirem.

A intersecção inferior da reta com a curva pode indicar a idade em que tal evento ocorreu, designado em geocronologia como a idade do metamorfismo, enquanto a interceptação superior pode representar a verdadeira idade de cristalização (t_0). Há mais de uma interpretação para os padrões de discórdia, cujos eventos complexos deram origem a mais de 8 modelos nos últimos anos (JÄGER e HUNZIKER, 2012 p. 111), que levam em conta diferentes fenômenos geológicos ou físico-químicos que possam ter causado a abertura do sistema, como: a) a recristalização de zircões durante o metamorfismo da rocha (modelo episódico); b) perda de chumbo por difusão (modelo de difusão); c) mais de um evento de perda de chumbo (modelo complexo); d) zonas de alteração em zircões metamórficos (modelo de alteração); e) baixa

temperatura de annealing de zircões metamíticos (modelo da baixa temperatura de annealing) ou mesmo f) uma mistura de fases de um zircão (modelos de mistura).

4 RESULTADOS

4.1 DATAÇÃO MTF-DE (AMOSTRAS APATITAS ARE02, ARE03, ARE04 E DURANGO)

A seguir, datação da amostra padrão Durango.

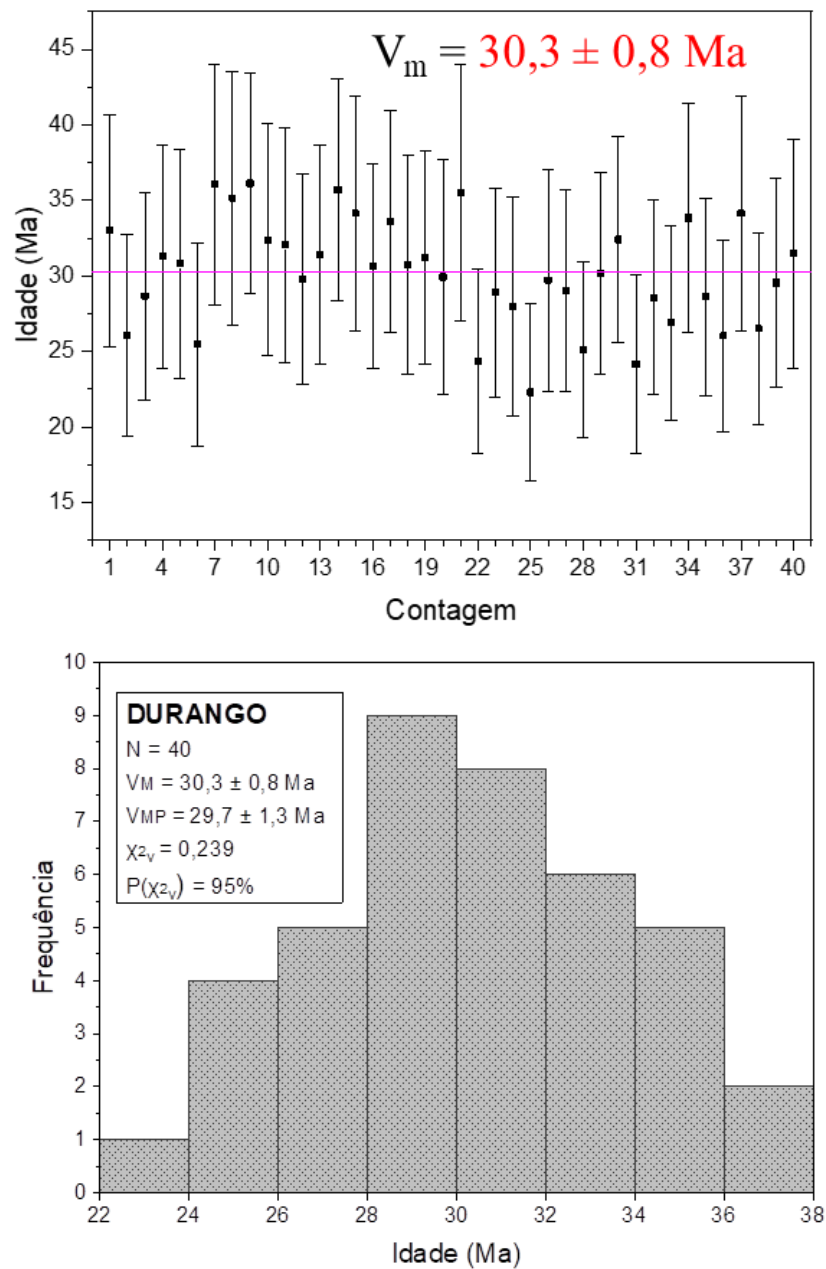
A caracterização dos traços fósseis, bem como dos traços induzidos, via microscopia ótica é um dos principais desafios procedimentais para boa aplicação do MDE. Essa caracterização depende fundamentalmente da capacidade de interpretação e reconhecimento dos traços do executor da medida. Isso requer um longo treinamento para que se possa diferenciar o que é traço do que é fissura; perceber eventuais inclusões, defeitos na rede cristalina dos grãos e amorfismo; identificar homogeneidade e heterogeneidade de traços sobre a superfície; reconhecer o tipo de mineral e, especialmente na medida de densidade de traços, projetar de maneira adequada a área escolhida para a composição da densidade. São tantos fatores, que dois medidores poderiam com alguma frequência chegar a medidas distintas. Devido a isso, realizou-se a aplicação do MDE na amostra Durango. A amostra Durango do México é considerada uma amostra padrão para o método de traço de fissão em Apatita e tem uma idade na literatura de $30,9 \pm 0,3$ Ma (JONCKHEERE e RATSCHBACHER, 2015). A obtenção dessa medida foi realizada sem que o medidor soubesse o resultado mais bem aceito com a finalidade de avaliar o domínio da técnica.

Após 40 medidas de densidades de traços fósseis sobre o Durango e mais 40 de densidade de traços induzidos, foram plotadas uma distribuição e uma flutuação das idades resultantes (por cálculo com a equação (15)) apresentadas na figura 16. O padrão de flutuação (localizado no canto superior da figura 16) dessas idades orbita o valor médio (V_M) de $30,3 \pm 0,8$ Ma representado pela reta de cor magenta, enquanto a média ponderada (valor médio calculado considerando os desvios de cada idade) foi $29,7 \pm 1,3$ Ma. Essas oscilações mostram que as medidas realizadas possuem consistência estatística interna. Por outro lado, o qui-quadrado reduzido (χ^2_v) obtido foi de 0,239 o que representa uma probabilidade de qui-quadrado reduzido ($P(\chi^2_v)$) $\geq$ que 95%. Isso significa que as idades pertencerem a uma mesma população estatística. O erro foi obtido através do cálculo do *standard deviation* dividido pela raiz quadrada do número de medidas (o erro médio ponderado foi calculado com o programa

Wolfram Mathematica, assim como o valor do qui-quadrado reduzido). Esses critérios foram adotados para todas as amostras datadas via MDE).

Esse resultado é estatisticamente compatível com aquela idade padrão considerada na literatura. Portanto, a aproximação desses resultados indica um bom emprego da técnica e que o autor está apto a realizar medidas em amostras com idades desconhecidas.

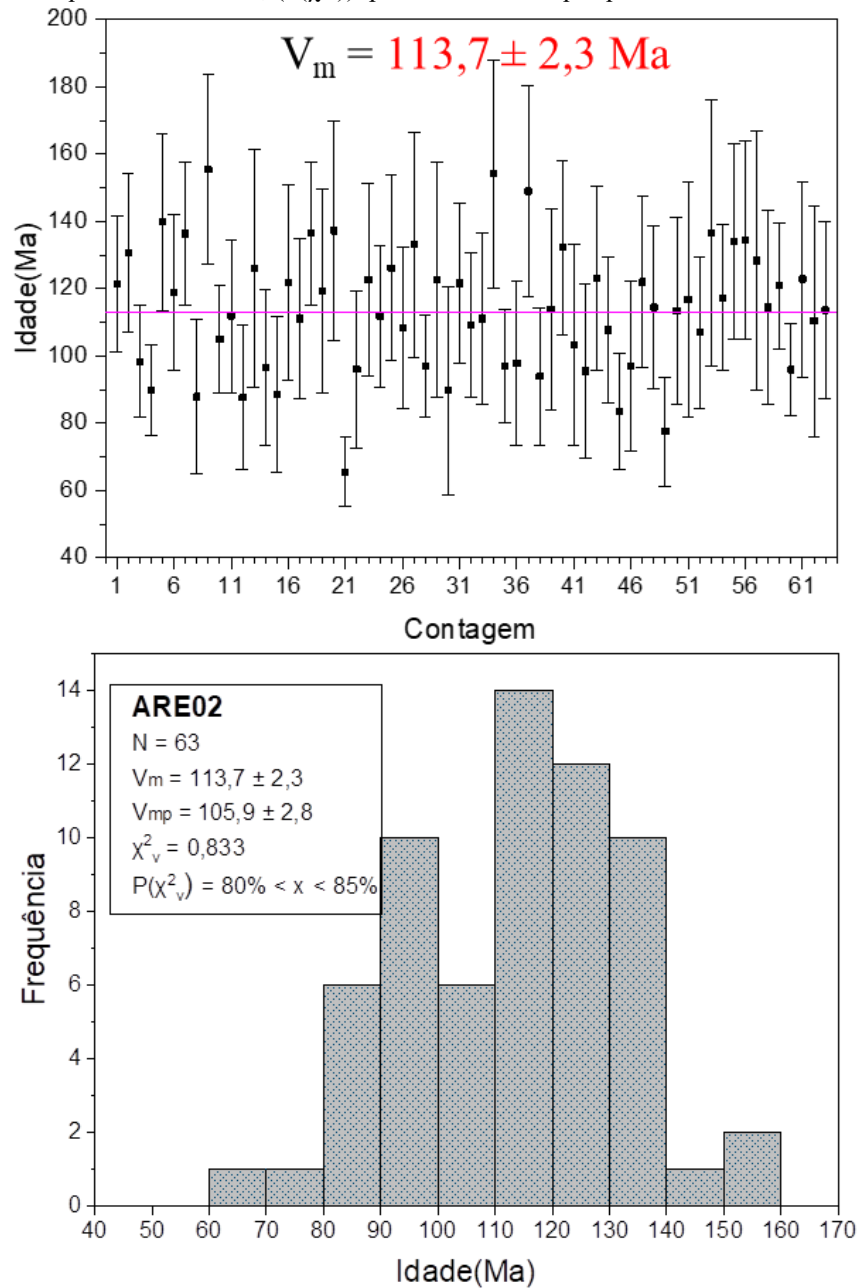
Figura 16: flutuação (superior) e distribuição (inferior) de 40 medidas de idade MTF via detector externo da amostra padrão para apatitas Durango. N: número de medidas; V_M : valor médio; V_{MP} : valor médio ponderado; (χ^2_v) : qui-quadrado reduzido; $P(\chi^2_v)$: probabilidade do qui-quadrado reduzido. A linha em magenta é o valor médio aritmético da idade.



Fonte: o autor.

A seguir, datação da amostra de apatita ARE02: a caracterização via MO da amostra de apatita ARE02 resultou na produção de 63 idades MDE. Com a ajuda do programa Origin 2019 se obteve a distribuição e a flutuação dessas idades. A distribuição e a flutuação estão apresentadas na figura 17.

Figura 17: flutuação (superior) e distribuição (inferior) de 63 medidas de idade MTF via detector externo da amostra ARE02 tipo apatita. N: número de cálculos; V_M : valor médio; V_{MP} : valor médio ponderado; (χ^2_v): qui-quadrado reduzido; ($P(\chi^2_v)$): probabilidade do qui-quadrado reduzido.



Fonte: o autor.

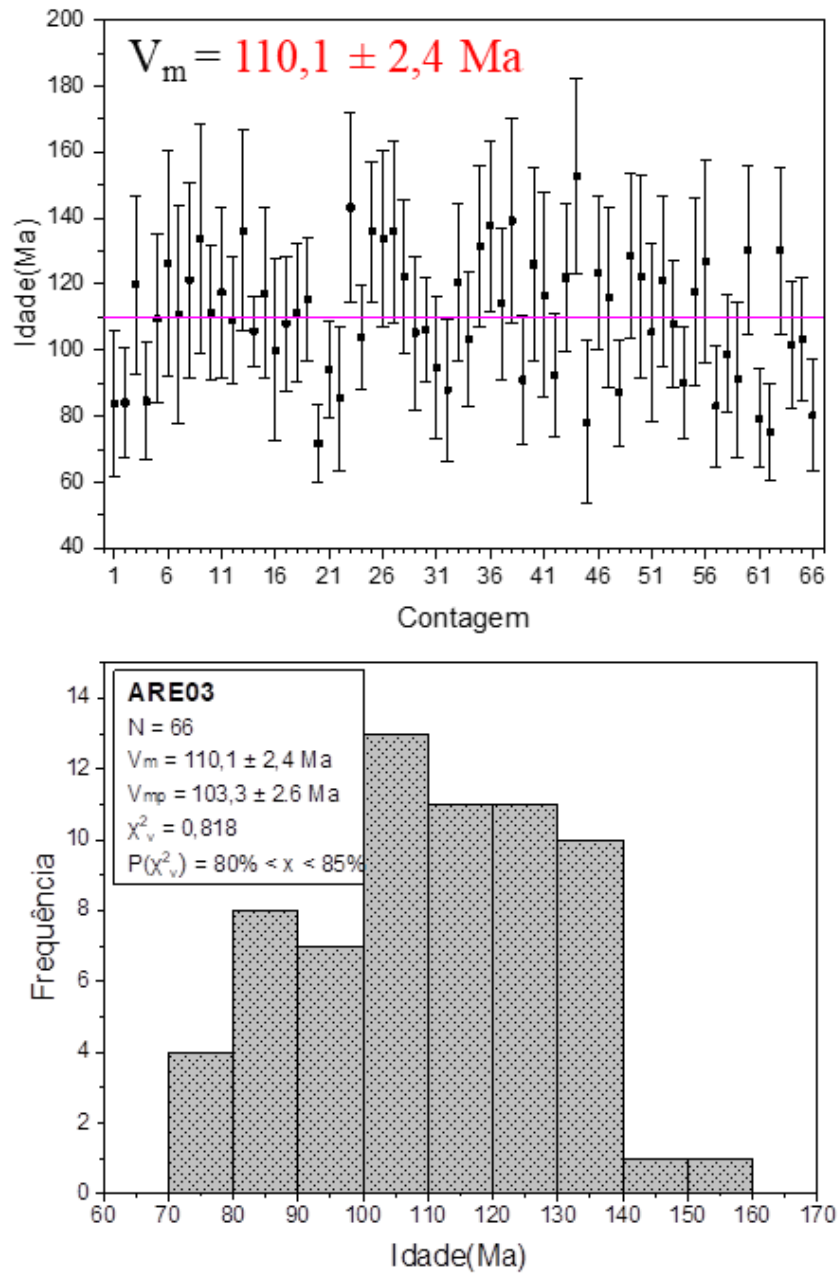
As 63 idades da amostra ARE02 flutuam ao redor de $V_M = 113,7 \pm 2,3 \text{ Ma}$ fixado à reta de cor magenta, enquanto o V_{MP} foi de $105,9 \pm 2,8 \text{ Ma}$. Esse resultado demonstra uma compatibilidade estatística entre médias. A distribuição é caracterizada por idades que ocupam valores entre 60 e 165 Ma, com a faixa mais povoada de idades composta por um-terço do total de medidas entre 105 e 120 Ma. Por outro lado, o cálculo do χ^2_v , realizado com ajuda do programa Wolfram Mathematica, retornou um valor de 0,833 no que implica uma $P(\chi^2_v)$ entre

80 e 85%. Isto é, as idades da amostra ARE02 se comportam, dada sua flutuação, como componentes de uma única população estatística.

A seguir, datação da amostra ARE03: na aplicação do MDE à amostra ARE03, se obteve 66 medidas de densidade de traços fósseis e mais 66 medidas de densidade de traços induzidos correspondentes. Com a equação (15), foram calculadas 66 idades correspondentes que podem ser observadas na forma distribuição e flutuação a partir da figura 18.

As 66 medições têm $V_M = 110,1 \pm 2,4$ Ma (reta de cor magenta) e $V_{MP} = 103,3 \pm 2,6$ Ma. Essas médias indicam uma consistência estatística interna dos dados. As idades compõem a distribuição contida no intervalo que vai de 70 a 170 Ma. A faixa principal, com 22 dados do total de 66, contém idades entre 110 e 130 Ma. O cálculo da $P(\chi^2_v)$, apontou probabilidade entre 80 e 85%. Essa probabilidade significa que as idades da amostra ARE03 compõem uma média povoada por uma única população principal.

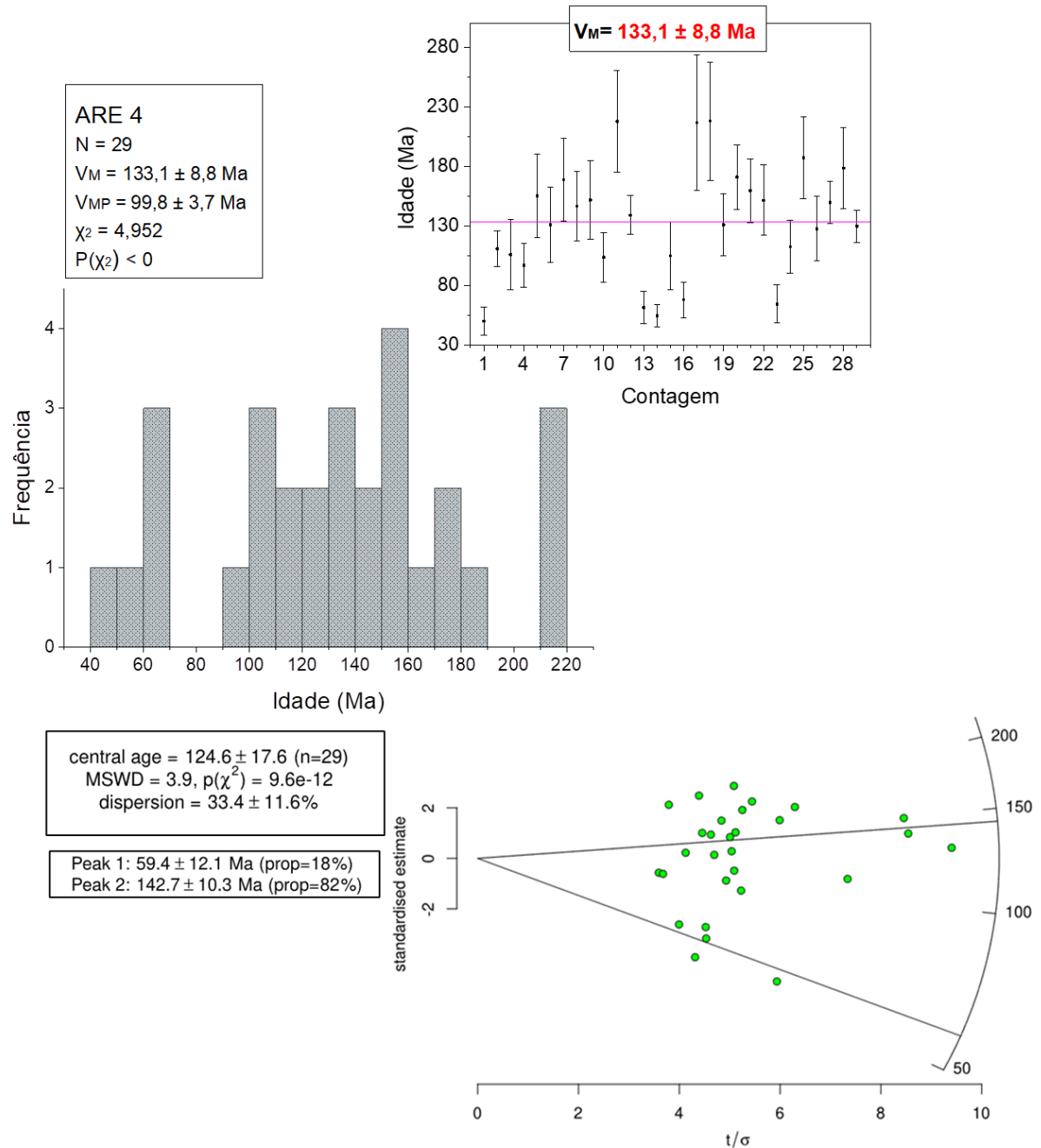
Figura 18: flutuação (superior) e distribuição (inferior) de 66 medidas de idade MTF via detector externo da amostra ARE03 tipo apatita. N: número de cálculos; V_m : valor médio; V_{mp} : valor médio ponderado; (χ^2_v) : qui-quadrado reduzido; $(P(\chi^2_v))$: probabilidade do qui-quadrado reduzido.



Fonte: o autor.

A seguir, datação da amostra ARE04: a amostra ARE04 teve 29 campos de traços fosseis e de traços induzidos para o cálculo da idade MDE. As 29 idades correspondentes foram plotadas em distribuição e flutuação mostradas na figura 19, contendo diagrama radial. As idades obtidas para amostra ARE04 têm V_M de $133,1 \pm 8,8$ Ma. Esse resultado possui compatibilidade estatística com a idade média ponderada de V_{MP} de $99,8 \pm 3,7$ Ma, apesar de a probabilidade de qui-quadrado reduzido de essas idades fazerem parte de uma mesma população estatística ser inferior a 0,001, isto é, a flutuação das 29 medidas da amostra ARE04 não possui um padrão de propagação de desvios naturalmente aleatórios. Desta forma, adotou-se a ferramenta de diagrama radial para análise da precisão individual de cada dado (abcissas) e o grau de dispersão de todo o conjunto entorno de uma idade central (ordenadas).

Figura 19: distribuição (esquerda superior), flutuação (direita superior) e diagrama radial (inferior) com 29 idades MDE da amostra ARE04 tipo apatita. N: número de medidas; VM: valor médio; VMP: valor médio ponderado; (χ^2 v): qui-quadrado reduzido; MSWD: quadrado médio dos desvios ponderados (mean square of weighted deviates); prop.: proporção; t/σ (no diagrama radial) é um parâmetro precisão da medida baseada no seu erro individual.



Fonte: o autor.

Com o diagrama radial se pode observar a aparição de dois picos de idades, um contendo 18% dos dados centrado em $59,4 \pm 12,1$ Ma e o outro com o restante dos dados centrado em $142,7 \pm 10,3$ Ma. Não se pode afirmar o que produziu essas duas populações. Uma hipótese

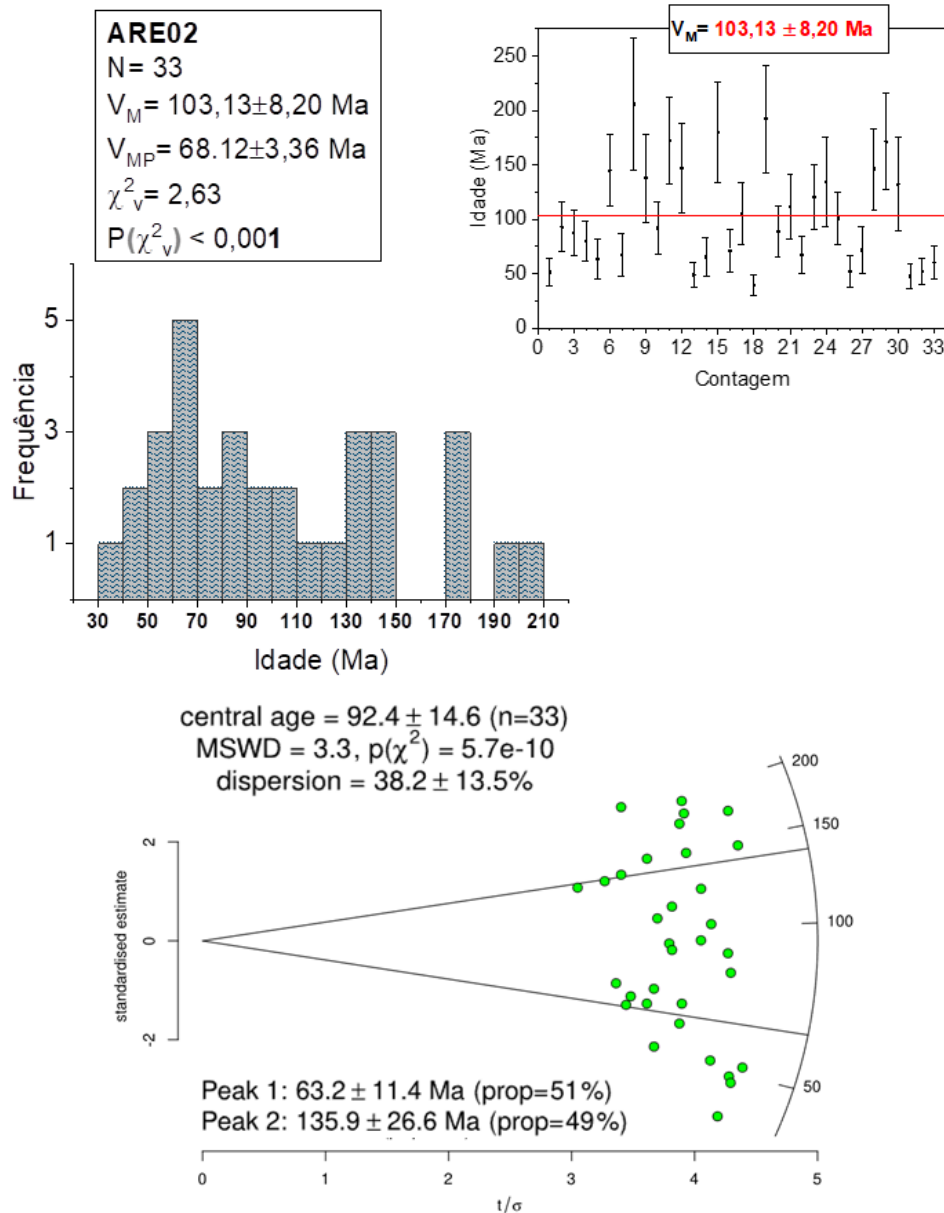
candidata é que a amostra ARE04 teve poucas medidas de densidades, provocando uma dispersão de maior grau.

4.2 DATAÇÃO MTF POR ESPECTROMETRIA DE MASSA LA-ICP-MS (AMOSTRAS DE APATITA)

A seguir, se apresenta os resultados das datações MTF por espectrometria de massa (LA-ICP-MS) das amostras de apatita, qual sejam, ARE02, ARE03, ARE04, ARE06 e ARE07.

Datação MTF por espectrometria de massa LA-ICP-MS da amostra ARE02: a figura 20 pode-se observar a distribuição seguida da flutuação de idades MTF para 33 grãos de apatita obtidas via LA-ICP-MS da amostra ARE02 com diagrama radial.

Figura 20: distribuição (esquerda superior), flutuação (direita superior) e diagrama radial (inferior) de 33 medidas de idade MTF via LA-ICP-MS da amostra ARE02 tipo apatita. N: número de medidas; VM: valor médio; VMP: valor médio ponderado; (χ^2_v): qui-quadrado reduzido; MSWD: quadrado médio dos desvios ponderados (mean square of weighted deviates); prop.: proporção; t/σ (no diagrama radial) é um parâmetro precisão da medida baseada no seu erro individual



Fonte: o autor

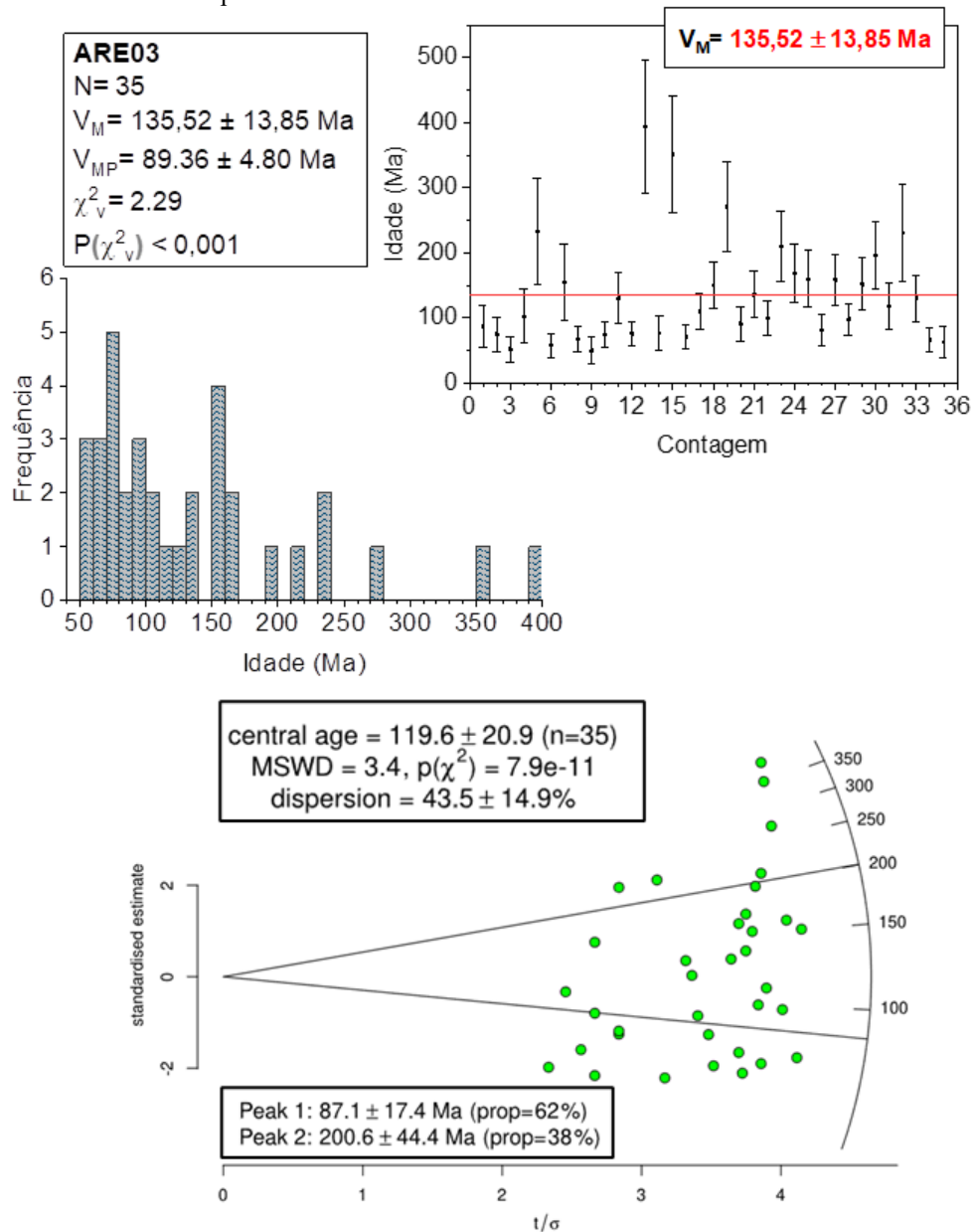
A flutuação possui idades que orbitam o valor médio V_m de $103,13 \pm 8,20$ Ma, representado pela linha vermelha, enquanto o valor médio ponderado V_{mp} é de $68,12 \pm 3,36$ Ma, médias compatíveis estatisticamente. Por outro lado, a distribuição é caracterizada por uma faixa de idades que abrange 30 a 210 Ma, embora haja uma predominância de valores observados entre 40 e 80 Ma. Cerca de metade dessas medidas se encontra somente nesse

segmento. Apesar disso, o teste do qui-quadrado reduzido (χ^2_v) apontou probabilidade ($P(\chi^2_v)$) menor que 0,001 de os desvios serem o mais naturalmente aleatórios.

Aqui se faz necessário salientar alguns aspectos do teste do qui-quadrado reduzido: trata-se uma ferramenta estatística que permite analisar se os desvios em um conjunto de medidas têm origens aleatórias ou se são resultado de um evento que é capaz de sistematizar padrões não naturalmente aleatórios de flutuação. Para avaliar se os desvios em uma flutuação qualquer são propagados em uma relação de dependência é utilizado o critério convenientemente estabelecido de que a probabilidade do qui-quadrado reduzido deva ser igual ou maior que 0,05. A distribuição com $P(\chi^2_v)$ menor que 0,001 da amostra ARE02 é um dado relevante, pois com isso é razoável concluir que a flutuação desse conjunto de idades possa ser resultado da presença de mais de uma população. Essa hipótese é corroborada pelo diagrama radial. O diagrama radial da amostra ARE02 indicou duas componentes principais dessa flutuação com seus picos em $63.17 \pm 9,2\%$ Ma e $135,9 \pm 10\%$ Ma.

Datação MTF por espectrometria de massa LA-ICP-MS da amostra ARE03: a figura 21 é a distribuição seguida da flutuação com diagrama radial das idades MTF via LA-ICP-MS obtidas em 35 grãos de apatita da amostra ARE03.

Figura 21: distribuição (esquerda superior), flutuação (direita superior) e diagrama radial (inferior) de 35 medidas de idade MTF via LA-ICP-MS da amostra ARE03 tipo apatita. N: número de medidas; VM: valor médio; VMP: valor médio ponderado; (χ^2_v): qui-quadrado reduzido; MSWD: quadrado médio dos desvios ponderados (mean square of weighted deviates); prop.: proporção; t/σ (no diagrama radial) é um parâmetro precisão da medida baseada no seu erro individual.



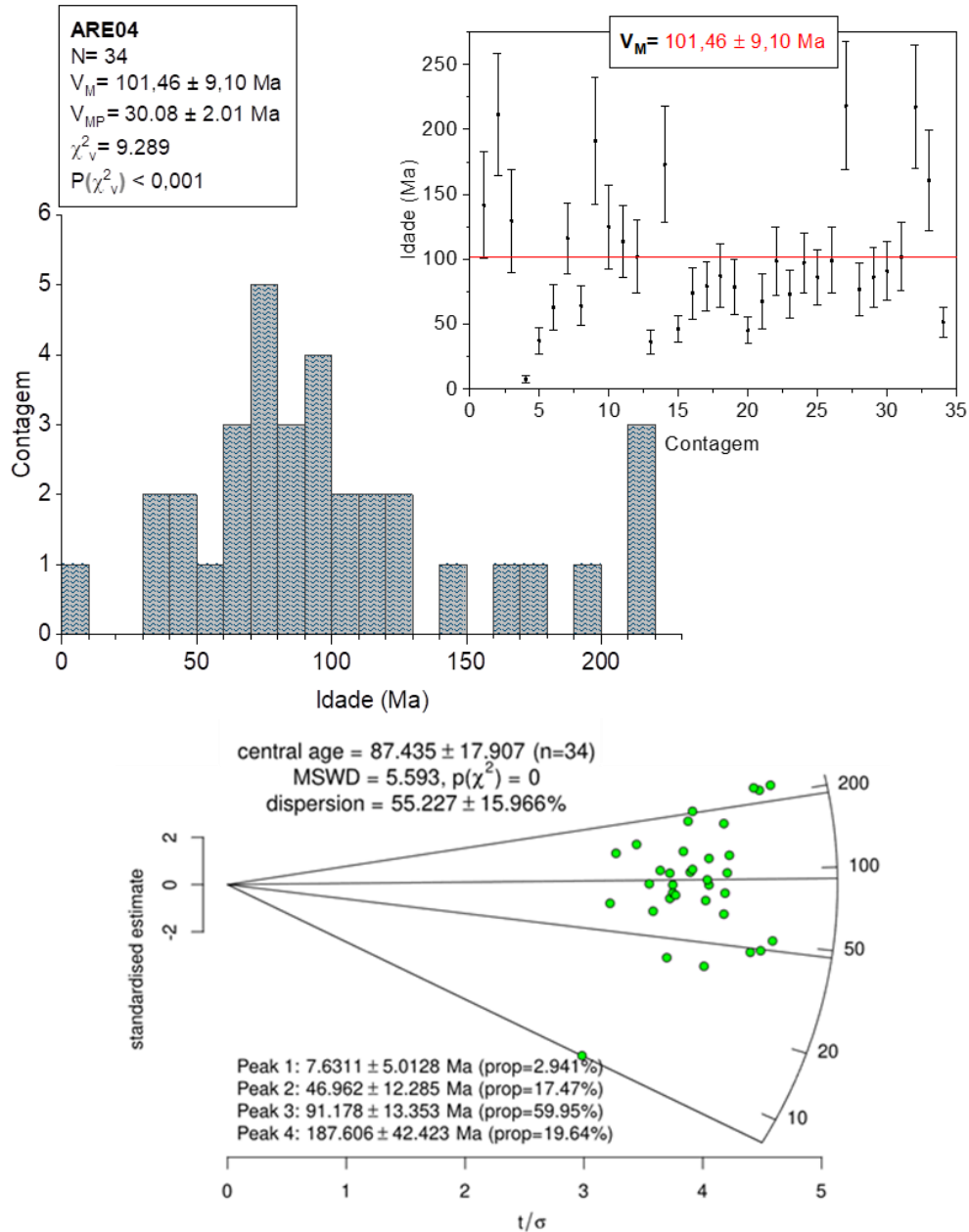
Fonte o autor.

A amostra ARE03 possui uma flutuação de idades com V_M de $135,52 \pm 13,85 \text{ Ma}$, valor fixado pela reta vermelha, e V_{MP} de $89,36 \pm 4,80 \text{ Ma}$ de forma cujas médias são compatíveis.

Contudo, o cálculo do χ^2_v apontou $P(\chi^2_v)$ menor que 0,001, implicando que as idades da amostra ARE03 podem apresentar mais de uma população estatística. A plotagem do diagrama radial apontou a presença de dois picos. Um dos picos de proporção igual a 62% tem o valor $87,1 \pm 17,4$ Ma e o outro fixado em $200,6 \pm 44,4$ Ma composto pelo restante dos dados.

Datação MTF por espectrometria de massa LA-ICP-MS da amostra ARE04: a amostra ARE04 teve 34 grãos de apatita selecionados para a determinação da idade MTF por espectrometria de massa. A distribuição, flutuação e diagrama radial podem ser conferidos na figura 22, a seguir.

Figura 20: distribuição (esquerda superior), flutuação (direita superior) e diagrama radial (inferior) de 34 medidas de idade MTF via LA-ICP-MS da amostra ARE04 tipo apatita. N: número de medidas; VM: valor médio; VMP: valor médio ponderado; (χ^2_v): qui-quadrado reduzido; MSWD: quadrado médio dos desvios ponderados (mean square of weighted deviates); prop.: proporção; t/σ (no diagrama radial) é um parâmetro precisão da medida baseada no seu erro individual.



Fonte o autor.

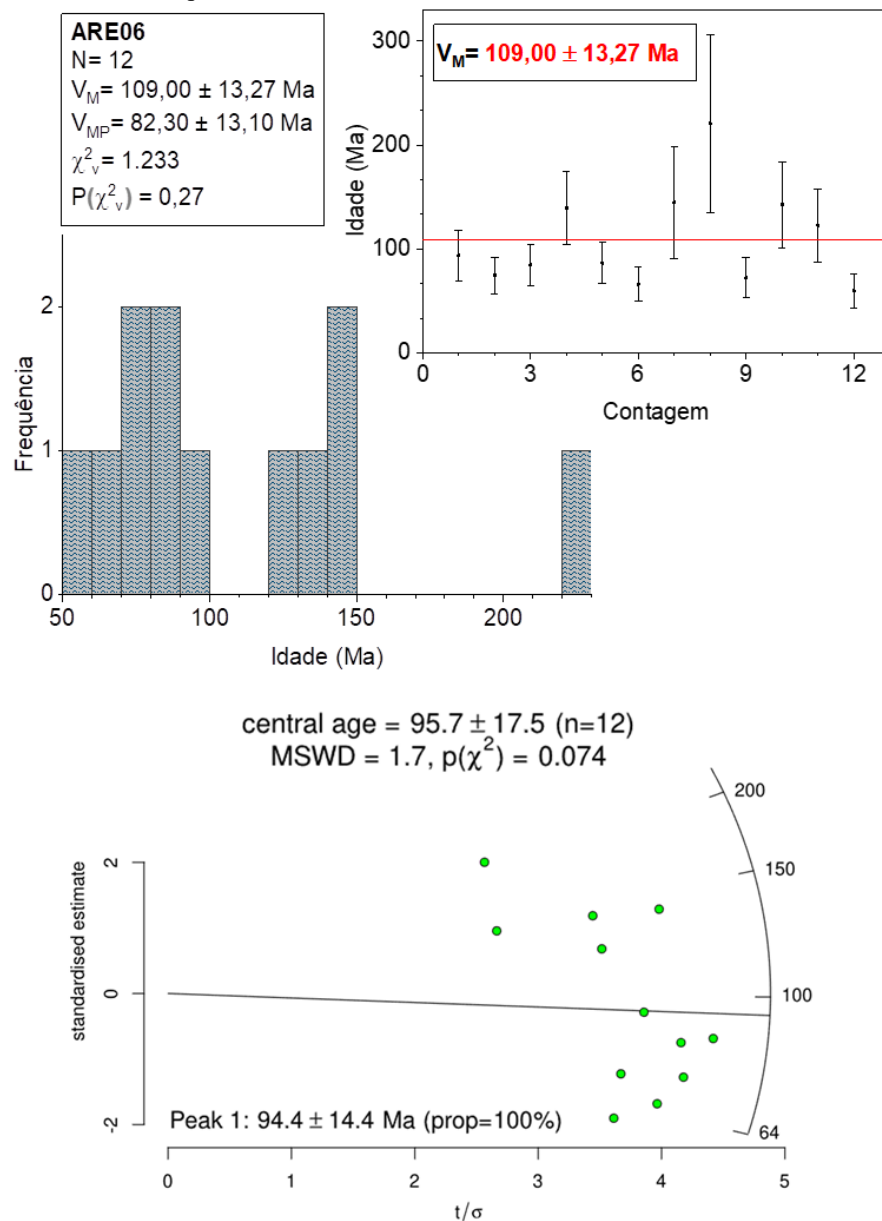
A distribuição de idades da amostra ARE04 é caracterizada por um intervalo de idades desde 0 a 220 Ma, sendo entre 70 e 100 Ma a faixa de idades mais povoada com 12 dados. A flutuação de idades tem V_M igual a $101,46 \pm 9,10$ Ma. Por outro lado, o V_{MP} dessa amostra foi $30,08 \pm 2,01$ Ma. As médias são incompatíveis devido ao peso dos desvios de cada idade

individual. O cálculo do χ^2_v resultou em 9,289 de tal forma que a $P(\chi^2_v)$ se deu menor que 0,001. Desta forma, as idades não constituem uma única população estatística.

A plotagem do diagrama radial indicou que essa distribuição de idades possui três picos principais e um valor atípico. Com proporções aproximadas de 17, 60 e 20% os picos estão centrados em $47,0 \pm 12,3$; $91,2 \pm 13,4$; $187,6 \pm 42,4$ Ma respectivamente.

Datação MTF por espectrometria de massa LA-ICP-MS da amostra ARE06: a amostra ARE06 teve apenas 12 grãos selecionados para datação MTF por espectrometria de massa, isso porque poucos grãos dessa amostra apresentaram traços em quantidades suficientes para aplicação da técnica. A figura 23 é a distribuição, flutuação e diagrama radial das idades obtidas para ARE06.

Figura 21: distribuição (esquerda superior), flutuação (direita superior) e diagrama radial (inferior) de 12 medidas de idade MTF via LA-ICP-MS da amostra ARE06 tipo apatita. N: número de medidas; VM: valor médio; VMP: valor médio ponderado; (χ^2_v): qui-quadrado reduzido; MSWD: quadrado médio dos desvios ponderados (mean square of weighted deviates); prop.: proporção; t/σ (no diagrama radial) é um parâmetro precisão da medida baseada no seu erro individual.

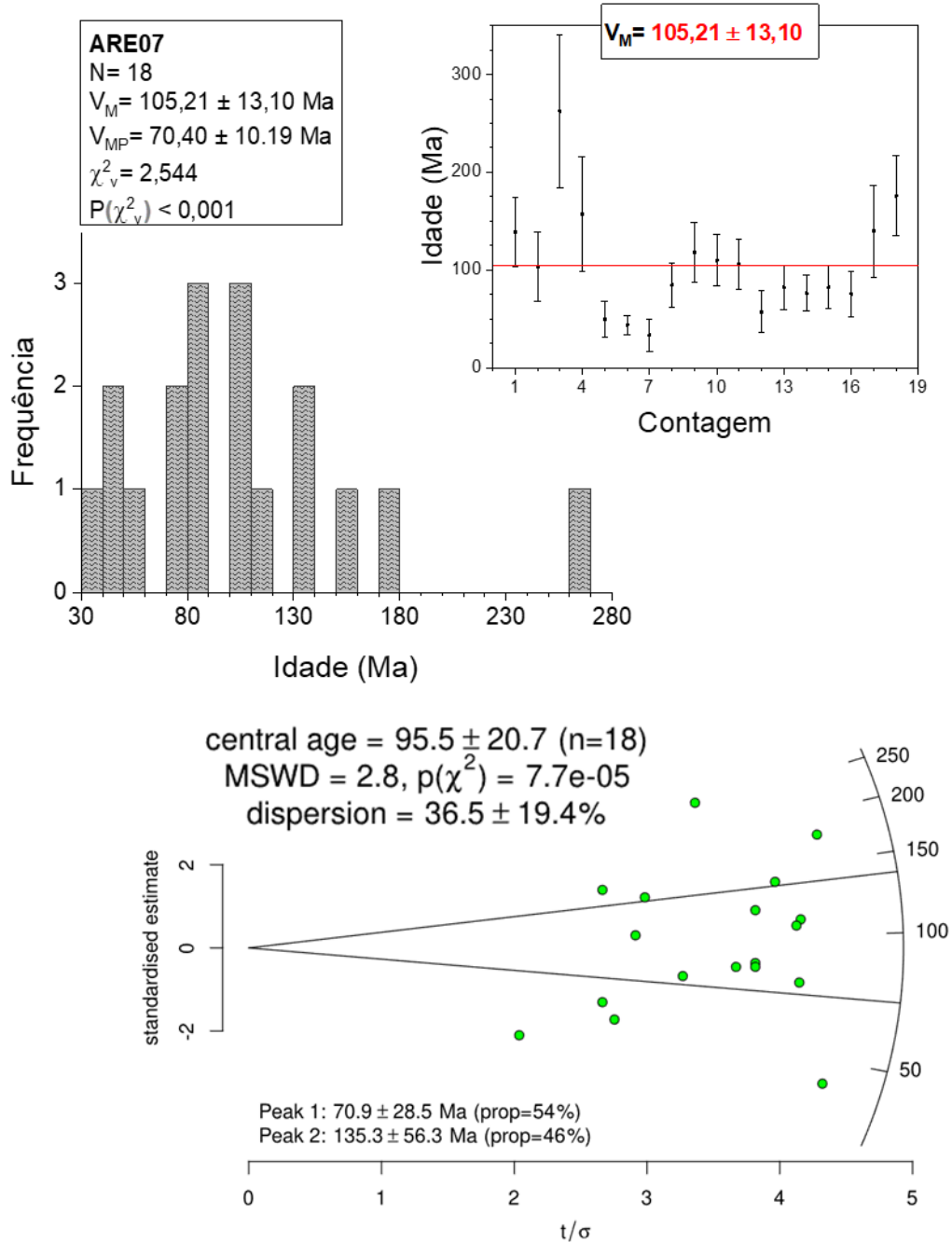


Fonte o autor.

A distribuição dos dados da amostra ARE06 contém 12 medidas de idade e é compreendida no intervalo entre 50 e 230 Ma. O conjunto mais numeroso dessa distribuição está localizado entre 50 e 90 Ma com metade dos dados totais. Já o padrão de flutuação dessa amostra possui valores de idade centralizados ao V_M de $109,00 \pm 13,27$ e o V_{MP} de $82,3 \pm 13,1$ Ma. Em relação ao cálculo do χ^2_v , a $P(\chi^2_v)$ obtida foi de 26%, no que implica que esse padrão de flutuação possui média composta por uma única população estatística.

Datação MTF por espectrometria de massa LA-ICP-MS da amostra ARE07:4a amostra ARE07 apresentou substrato com grãos do tipo apatita e do tipo zircão após processo de separação. Os resultados apresentados nesta seção são uma abordagem da obtenção de idades MTF via LA-ICP-MS dos grãos tipo apatita. A amostra ARE07 teve 18 grãos datados com a sistemática MTF por espectrometria de massa. A distribuição e flutuação com diagrama radial das 18 idades obtidas pode ser observada na figura 24.

Figura 22: distribuição (esquerda superior), flutuação (direita superior) e diagrama radial (inferior) de 18 medidas de idade MTF via LA-ICP-MS da amostra ARE07 tipo apatita. N: número de medidas; VM: valor médio; VMP: valor médio ponderado; (χ^2_v): qui-quadrado reduzido; MSWD: quadrado médio dos desvios ponderados (mean square of weighted deviates); prop.: proporção; t/σ (no diagrama radial) é um parâmetro precisão da medida baseada no seu erro individual.



Fonte o autor.

A distribuição das idades obtidas para amostra ARE07 é compreendida no intervalo entre 35 e 270 Ma. A flutuação das idades possui V_M de $105,21 \pm 13,10$, fixado pela reta vermelha. Já o V_{MP} foi calculado como $70,40 \pm 10,19$ Ma; médias compatíveis. Por outro lado, o cálculo de χ^2_v retornou uma $P(\chi^2_v) < 0,001$ e dessa forma as idades não constituem uma única população.

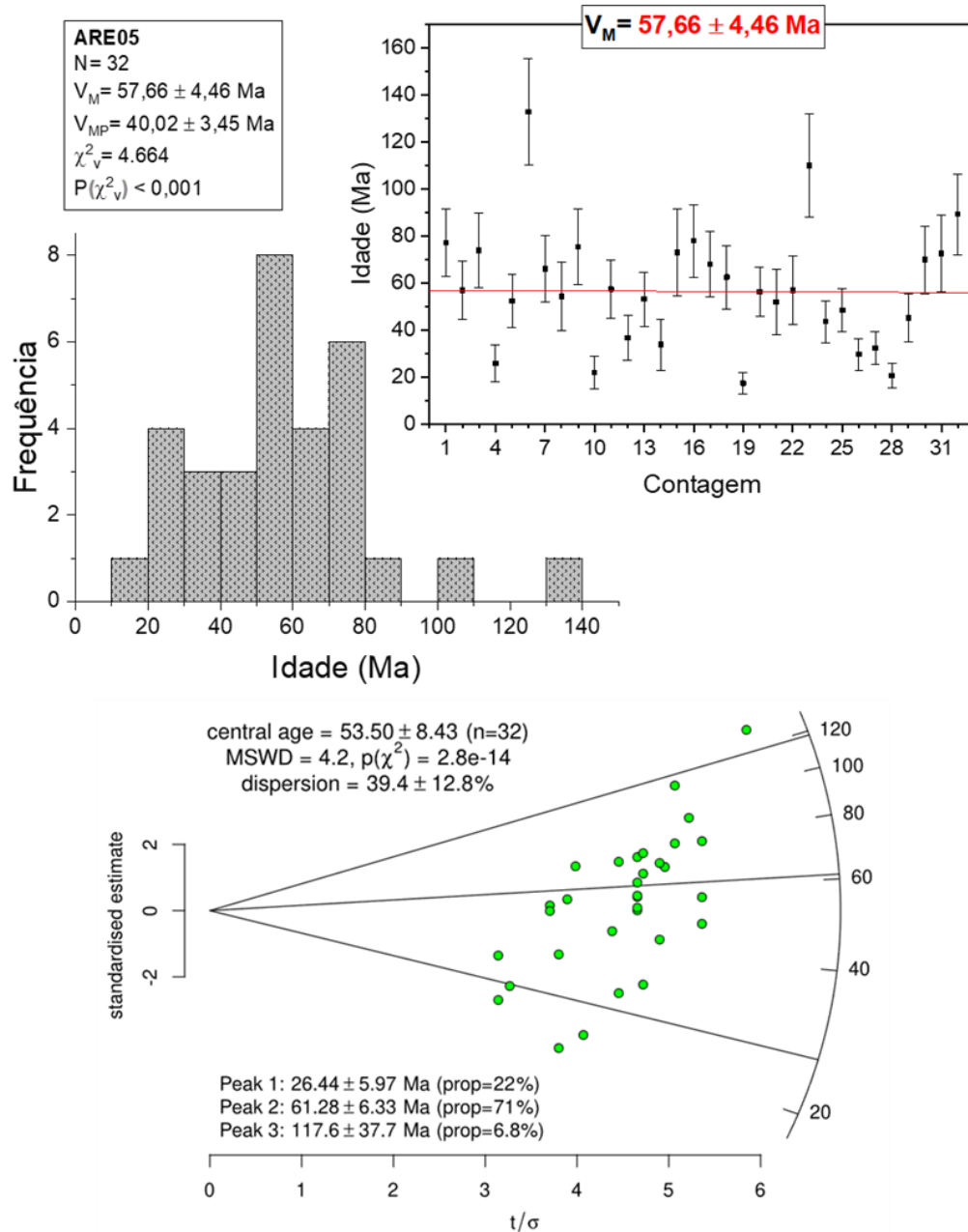
O diagrama radial da amostra ARE07 implica na aparição de dois picos no seu padrão de flutuação. O primeiro pico fixado em $70,9 \pm 28,5$ com proporção de 54% e o segundo com valor $135,5 \pm 56,3$ produzido pelas idades restantes.

4.3 DATAÇÃO MTF POR ESPECTROMETRIA DE MASSA LA-ICP-MS (AMOSTRAS DE ZIRCÃO)

Quatro amostras de zircão foram submetidas a datação MTF por espectrometria de massa (sistema LA-ICP-MS), qual sejam ARE05, ARE07, ARE14 e ARE17. Os resultados das datações podem ser vislumbrados no decorrer desta seção.

Datação MTF por espectrometria de massa LA-ICP-MS da amostra ARE05: a amostra ARE05 teve idade determinada com a realização de 32 medidas. Os resultados das idades correspondentes foram abordados em distribuição e flutuação com diagrama radial e estão apresentados na figura 25.

Figura 23: distribuição (esquerda superior), flutuação (direita superior) e diagrama radial (inferior) de 32 medidas de idade MTF via LA-ICP-MS da amostra ARE05 tipo zircão. N: número de medidas; VM: valor médio; VMP: valor médio ponderado; (χ^2_v): qui-quadrado reduzido; MSWD: quadrado médio dos desvios ponderados (mean square of weighted deviates); prop.: proporção; t/σ (no diagrama radial) é um parâmetro precisão da medida baseada no seu erro individual.



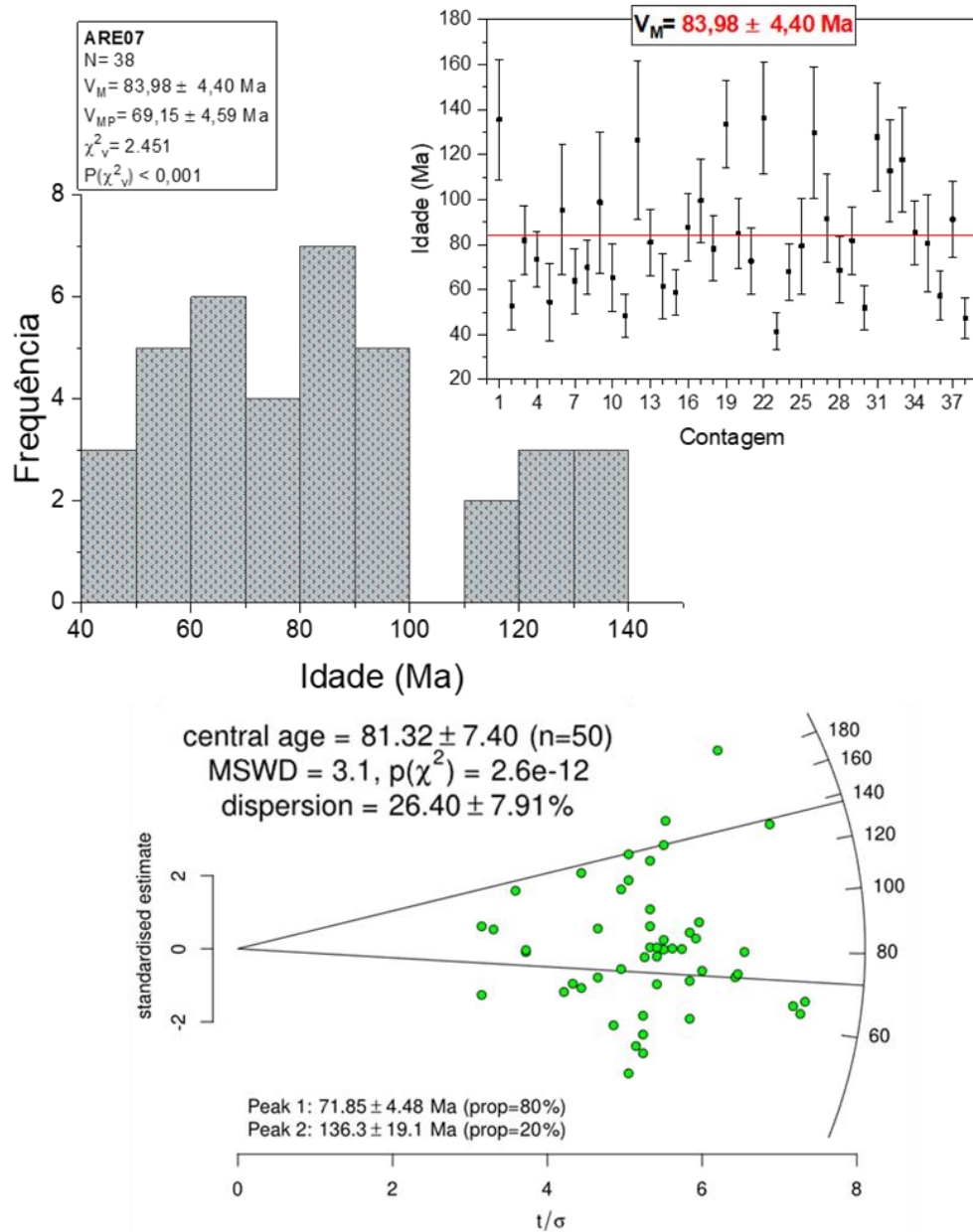
Fonte o autor.

A distribuição de idades da amostra ARE05 está compreendida no intervalo entre 10 e 140 Ma. Por outro lado, a flutuação das 32 idades possui V_M de $57,66 \pm 4,46$ Ma (reta vermelha) e V_{MP} de $40,02 \pm 3,45$ Ma. Apesar das médias serem consistentes entre si, o cálculo de qui-quadrado reduzido retornou $P(\chi^2_v) < 0,001$, isto é, a flutuação de idades da amostra ARE05 possui um valor médio composto por idades que não constituem uma única população. Em vez

disso, o diagrama radial apontou a presença de três picos de idade. Os picos de idade com proporção 22, 71 e 6,8% estão fixados em $26,44 \pm 5,97$; $61,28 \pm 6,33$; $117,60 \pm 37,70$ Ma respectivamente. Esse resultado corrobora com dado do teste de qui-quadrado reduzido de que a flutuação de idades da amostra ARE05 deva ser uma combinação de mais de uma população.

Datação MTF por espectrometria de massa LA-ICP-MS da amostra ARE07: amostra ARE07 apresentou substrato com grãos do tipo apatita e do tipo zircão após processo de separação. Os resultados apresentados nesta seção são uma abordagem da obtenção de idades MTF via LA-ICP-MS dos grãos tipo zircão. A distribuição das 38 idades aferidas para a amostra, juntamente com sua flutuação e diagrama radial está apresentada na figura 26.

Figura 24: distribuição (esquerda superior), flutuação (direita superior) e diagrama radial (inferior) de 38 medidas de idade MTF via LA-ICP-MS da amostra ARE07 tipo zircão. N: número de medidas; VM: valor médio; VMP: valor médio ponderado; (χ^2_v): qui-quadrado reduzido; MSWD: quadrado médio dos desvios ponderados (mean square of weighted deviates); prop.: proporção; t/σ (no diagrama radial) é um parâmetro precisão da medida baseada no seu erro individual.



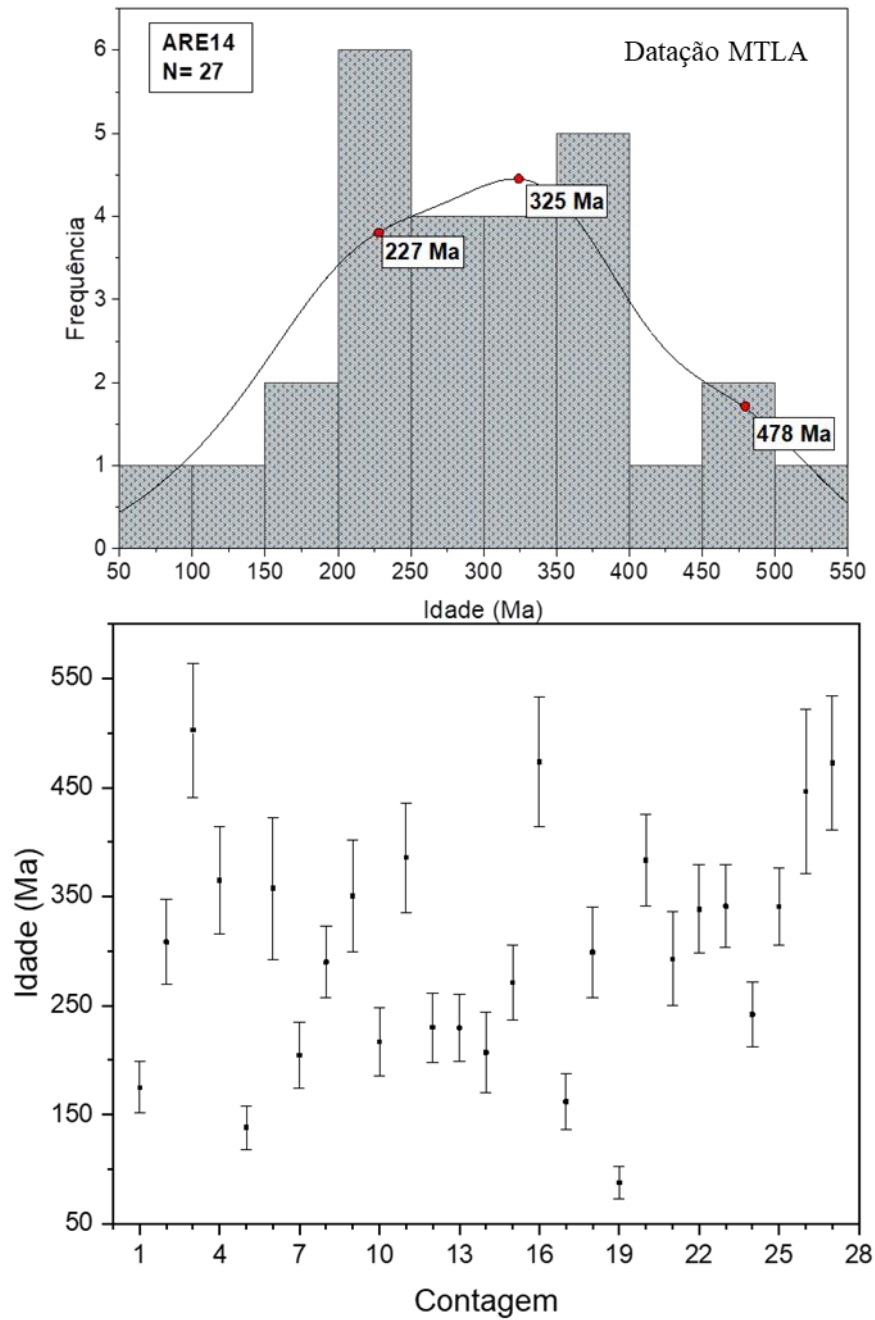
Fonte o autor.

A distribuição de idades é, para a amostra ARE07, caracterizada por um intervalo entre 40 e 140 Ma. A faixa mais povoada está situada entre 80 e 100 Ma com 12 idades. O V_M sobre qual os dados orbitam é de $83,98 \pm 4,40$ Ma e o V_{MP} é de $69,15 \pm 4,59$ Ma. As médias demonstram ser consistentes, apesar do cálculo do χ^2_v apontar $P(\chi^2_v) < 0,001$ de os dados terem uma relação de dependência entre si. Aliás, o diagrama radial das idades apresentou a formação

de dois picos com proporção de 80 e 20% em valores fixados em $71,85 \pm 4,48$ e $136,30 \pm 19,10$. Mas respectivamente, corroborando os resultados do teste de χ^2_v .

Datação MTF por espectrometria de massa LA-ICP-MS da amostra ARE014: a amostra ARE14 foi identificada como quartzito, quartzito arenito com inclusões de óxido de ferro. Por causa dessa característica, será adotada uma abordagem adequada para analisar os resultados obtidos para essa amostra. Essa abordagem será ligeiramente diferente em comparação com as ferramentas estatísticas utilizadas anteriormente. A amostra ARE14 teve 27 idades MTF determinadas via LA-ICP-MS. A distribuição das 27 idades, juntamente com sua flutuação está apresentada na figura 27.

Figura 25: distribuição (superior) e flutuação (inferior) de 27 medidas de idade MTF via LA-ICP-MS da amostra ARE14. N: número de medidas.



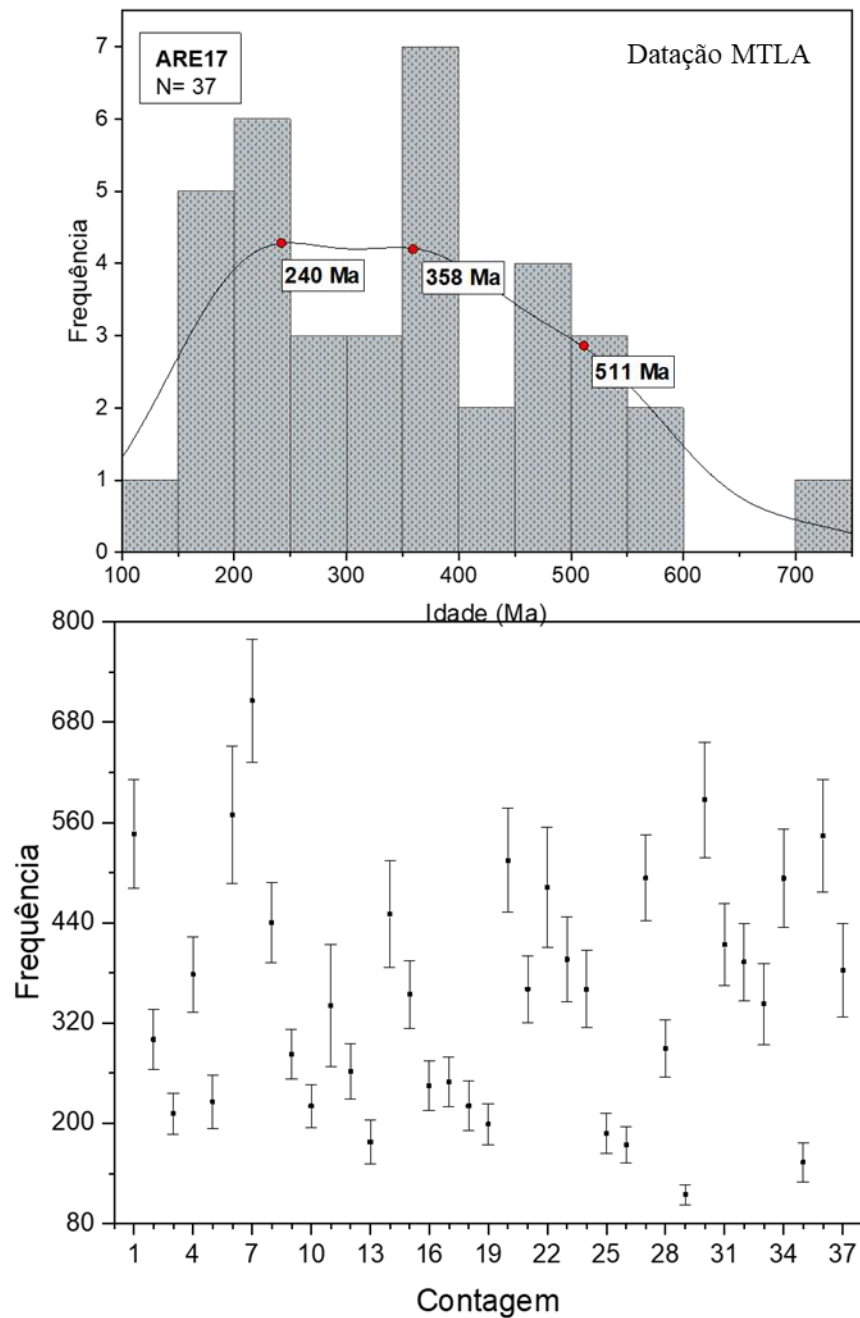
Fonte: o autor.

A distribuição das 27 idades da amostra ARE14 compreende um intervalo entre 50 e 550 Ma. Essa abrangência na distribuição de idades é típica para amostras provenientes de bacia. Para estimar os aspectos da função densidade de probabilidade dessa distribuição, foi utilizado a curva *Kernel Smooth distribution* com o uso do programa Origin 2019. Com isso, três picos ficam percebidos em 227 Ma, 325 Ma e 478 Ma. Esses picos são produtos da elevação da densidade de probabilidade local em relação ao conjunto das células da distribuição e

exprimem, portanto, as idades mais típicas para essa amostra. A flutuação, por sua vez, denota as idades individuais e seus respectivos desvios, não havendo populações principais.

Datação MTF por espectrometria de massa LA-ICP-MS da amostra ARE017: amostra ARE17, similarmente à amostra ARE14, foi identificada como sendo proveniente de rocha quartzo-arenítica. Devido a isso adotou-se uma abordagem equivalente para análise das 37 idades MTF determinadas via LA-ICP-MS. A distribuição e flutuação dessas idades estão apresentadas na figura 28.

Figura 26: distribuição (superior) e flutuação (inferior) de 37 medidas de idade MTF via LA-ICP-MS da amostra ARE17. N: número de medidas.



Fonte: o autor.

A distribuição de idades dessa amostra está compreendida no intervalo entre 100 e 700 Ma, um resultado típico para amostra de bacia. A função densidade de probabilidade para essa distribuição apontou três idades principais com valores observados em 240, 358 e 511 Ma. É possível dizer que essas idades estão relativamente próximas às idades obtidas para amostra ARE14, o que pode indicar uma aproximação entre suas informações cronológicas. A flutuação,

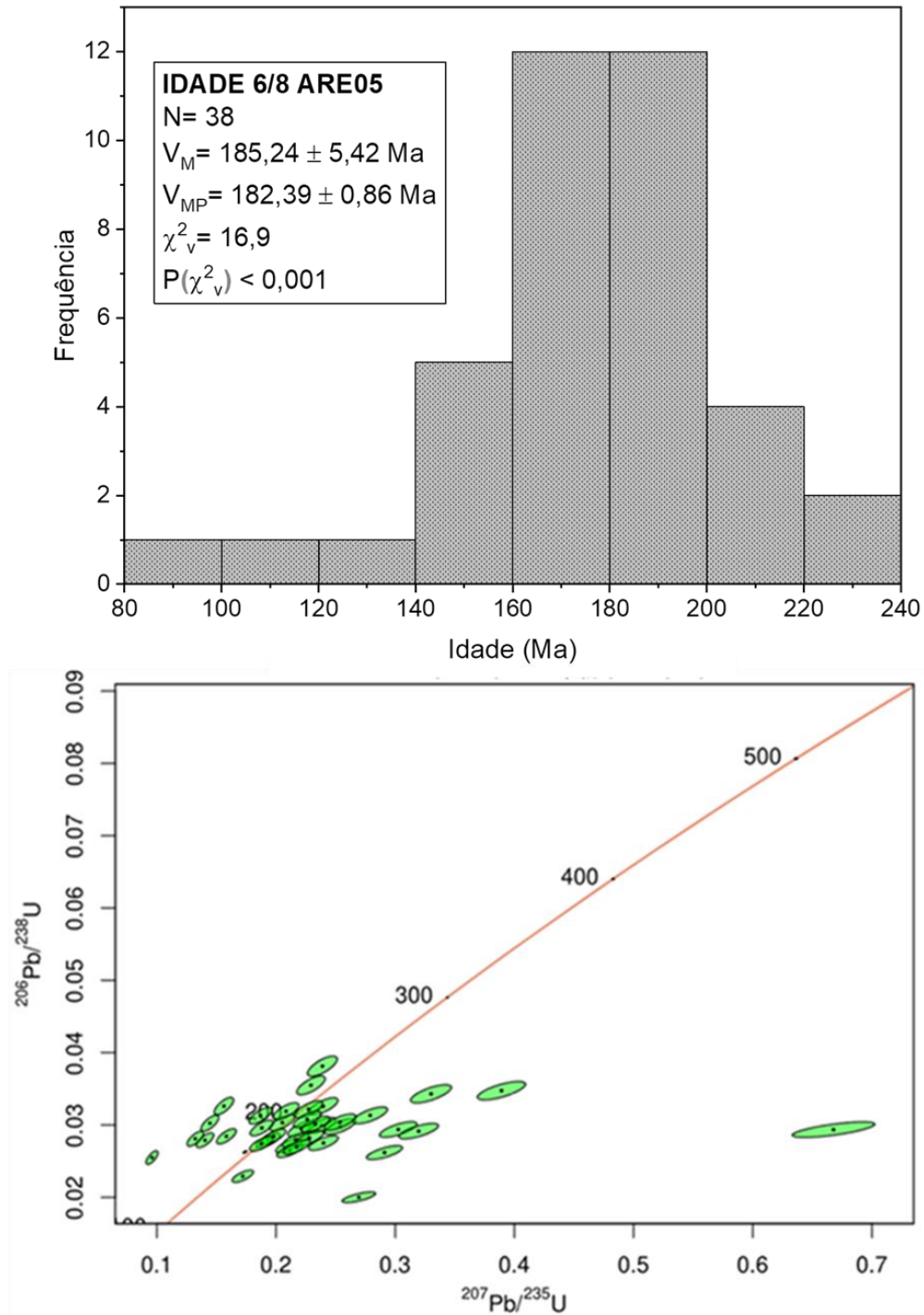
assim como para ARE14, denota as idades individuais e seus respectivos desvios, não havendo populações principais.

4.4 DATAÇÃO U-Pb POR ESPECTROMETRIA DE MASSA LA-ICP-MS (AMOSTRAS DE ZIRCÃO)

Datação U-Pb por espectrometria de massa LA-ICP-MS da amostra ARE05: a amostra ARE05 teve 38 idades aferidas através da metodologia de datação U-Pb via LA-ICP-MS. Devido ao fato de que a amostra apresentou espectro de idade relativamente jovem os geocronômetros definidos pelas razões isotópicas $7/5$ e $7/6$ foram descartados e se utilizou apenas as idades obtidas pelo geocronômetro contado pela razão $6/8$. Esse geocronômetro é mais preciso para amostras com idades menores do que pelo menos 500 milhões de anos. Devido a isso, se construiu uma distribuição a partir das idades obtidas por esse geocronômetro. A distribuição para essas idades é apresentada no canto superior da figura 29. Essa distribuição possui idades dentro do intervalo definido entre 120 e 260 Ma. A faixa de idades mais significativa, isto é, a que apresenta maior volume de dados é compreendida entre 180 e 200 Ma com 16 idades. O V_M foi de $187,24 \pm 3,37$, enquanto o V_{MP} foi de $186,37 \pm 4,98$ Ma. Esses valores médios são estatisticamente compatíveis entre si.

No canto inferior da figura 29 temos a curva de concórdia da amostra ARE05. Cada elipse (na cor verde) é uma relação entre as razões isotópicas cujo eixo principal apresenta o desvio. Amostras que apresentam os três geocronômetros concordantes tendem a manifestar elipses ao longo da curva em vermelho. Como pode ser visto, a curva de concórdia dessa amostra apresenta elipses aglomeradas sobre a curva ao redor do valor de 200 Ma. A maior parte das elipses, de fato, não converge para curva de concordância (em vermelho). Pode-se argumentar que esse padrão na posição das elipses sob a forma curva de concórdia é resultado de que os geocronômetros $7/5$ e $7/6$ não são os mais bem adequados para avaliar as informações cronológicas de amostras com espectros de idades dados como relativamente jovens, como é o caso.

Figura 29: idade 6/8 da amostra ARE05. Distribuição (superior) e diagrama de concórdia (inferior)

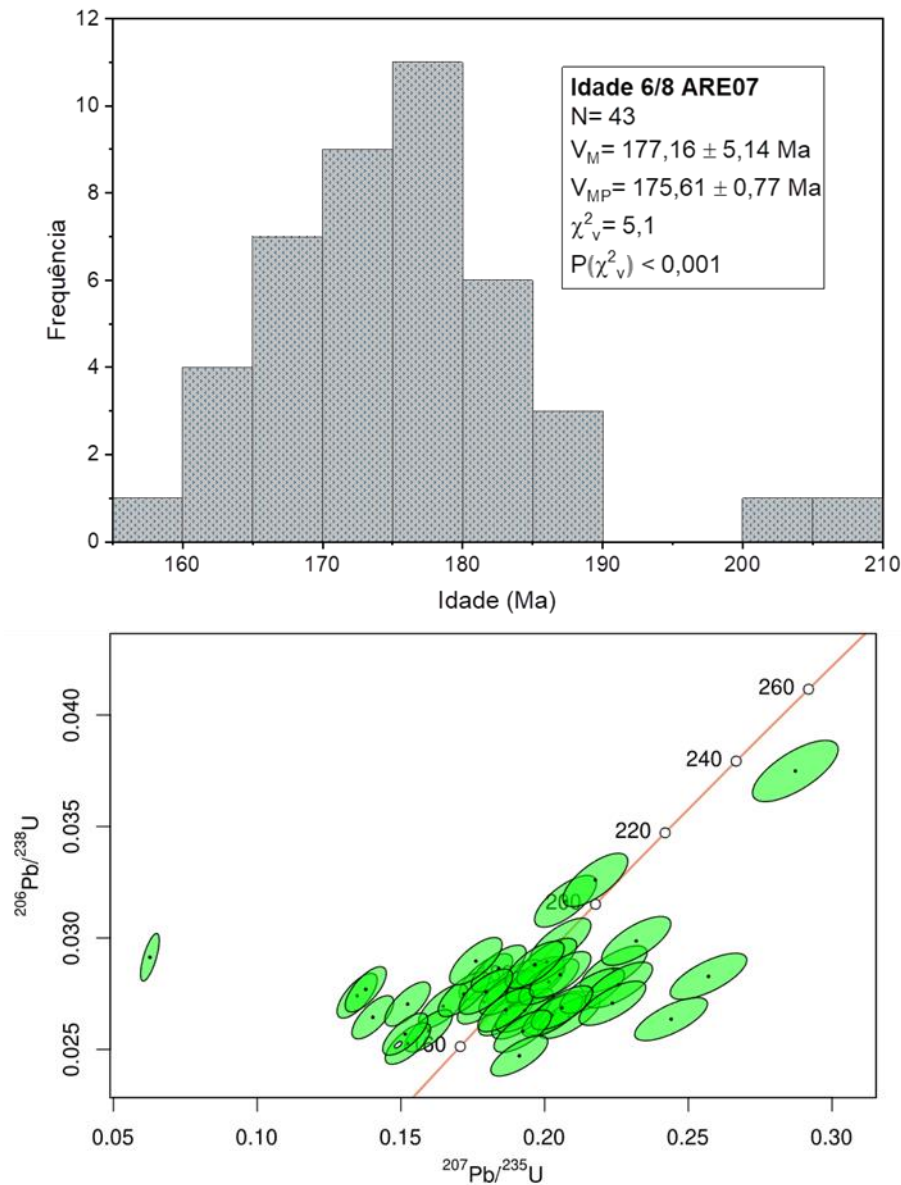


Fonte: o autor

Datação U-Pb por espectrometria de massa LA-ICP-MS da amostra ARE07: a amostra ARE07 teve 43 campos analisados via LA-ICP-MS e, com isso, suas razões isotópicas determinadas, para datação U-Pb. Distribuição e diagrama de concórdia na figura 30. Similarmente ao resultado anterior, a amostra ARE07 demonstrou um espectro de idades relativamente jovem, o que levou às mesmas condições de análise realizadas para a ARE05. O geocronômetro, portanto, utilizado foi contador da razão isotópica 6/8. As 43 medidas de idades da razão 6/8 foram reunidas e plotadas em forma distribuição que pode ser apreciada na parte superior da figura 30. Essa distribuição é caracterizada por conter seus graus de liberdade entre 155 e 210 Ma, sendo a faixa mais povoada entre 175 e 180 Ma com 11 idades. O valor médio observado foi de $175,77 \pm 1,45$, enquanto o valor médio ponderado foi de $173,79 \pm 2,35$. Esses valores médios são compatíveis entre si.

Por outro lado, a curva de concórdia da amostra ARE07 apresentou um padrão de elipses parecido com o caso da amostra a ARE05. A maior parte das elipses sequer toca a curva de concórdia, apesar de flutuarem entorno do valor 180 Ma. Novamente, o principal argumento que pode justificar a relativa discordância entre os geocronômetros é que com a juventude dessa amostra os cronômetros 7/5 e 7/6 não são capazes de revelar com precisão as informações geocronológicas, bem como é o caso do cronômetro 6/8.

Figura 27 : idade 6/8 da amostra ARE07. Distribuição (superior) e diagrama de concórdia (inferior)

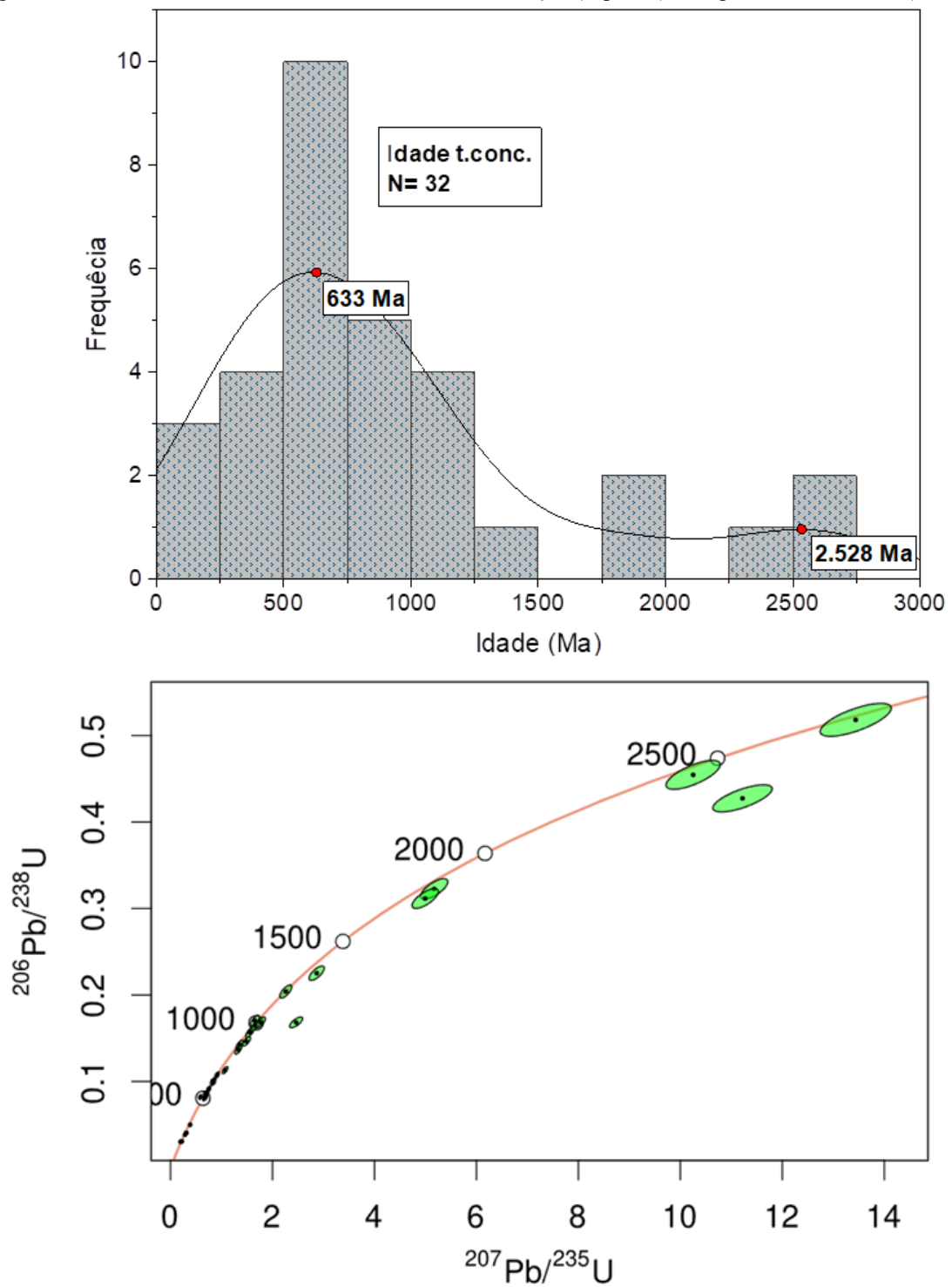


Fonte: o autor

Datação U-Pb por espectrometria de massa LA-ICP-MS da amostra ARE14: a seguir apresenta-se os resultados obtidos para amostra ARE14 com a aplicação da metodologia de datação U-Pb via LA-ICP-MS. 32 medidas foram aferidas para essa amostra. Na obtenção dessas medidas essa amostra apresentou idades maiores que os dois casos anteriores e todos os geocronômetros convergiram. Devido a isso a idade escolhida para esse caso foi a própria idade de concórdia. A distribuição das idades de concórdia foi plotada no canto superior da figura 31. Essa distribuição ocorre no intervalo de 0 a 2750 Ma. Essa ampla variedade de idades presente da distribuição da ARE14 se justifica pelo fato de essa amostra ser do tipo quartzito arenítico, ou seja, ARE14 é resultado de diversos produtos rochosos, portando característica sedimentar.

Por isso ela apresenta uma diversidade de idades, que as outras amostras, sejam ígneas ou metamórficas, não. Para estimar os aspectos da função densidade de probabilidade dessa distribuição, utilizou-se a curva *Kernel Smooth distribution*. Com isso, se verificou dois máximos locais para as idades obtidas fixados em 633 e 2.528 Ma, representados na distribuição pelos pontos vermelhos sobre a curva de *Kernel*. Por outro lado, a curva de concórdia é caracterizada por certo grau de convergência entre as razões isotópicas, com elipses distribuídas entre 0 e 2750 Ma. Esse é um exemplo mais próximo das amostras ditas “concordantes”. O que se percebe é que os geocronômetros se aproximam na qualidade informacional que eles portam quando as amostras apresentam espectro de idades mais antigas que os casos apresentados anteriormente.

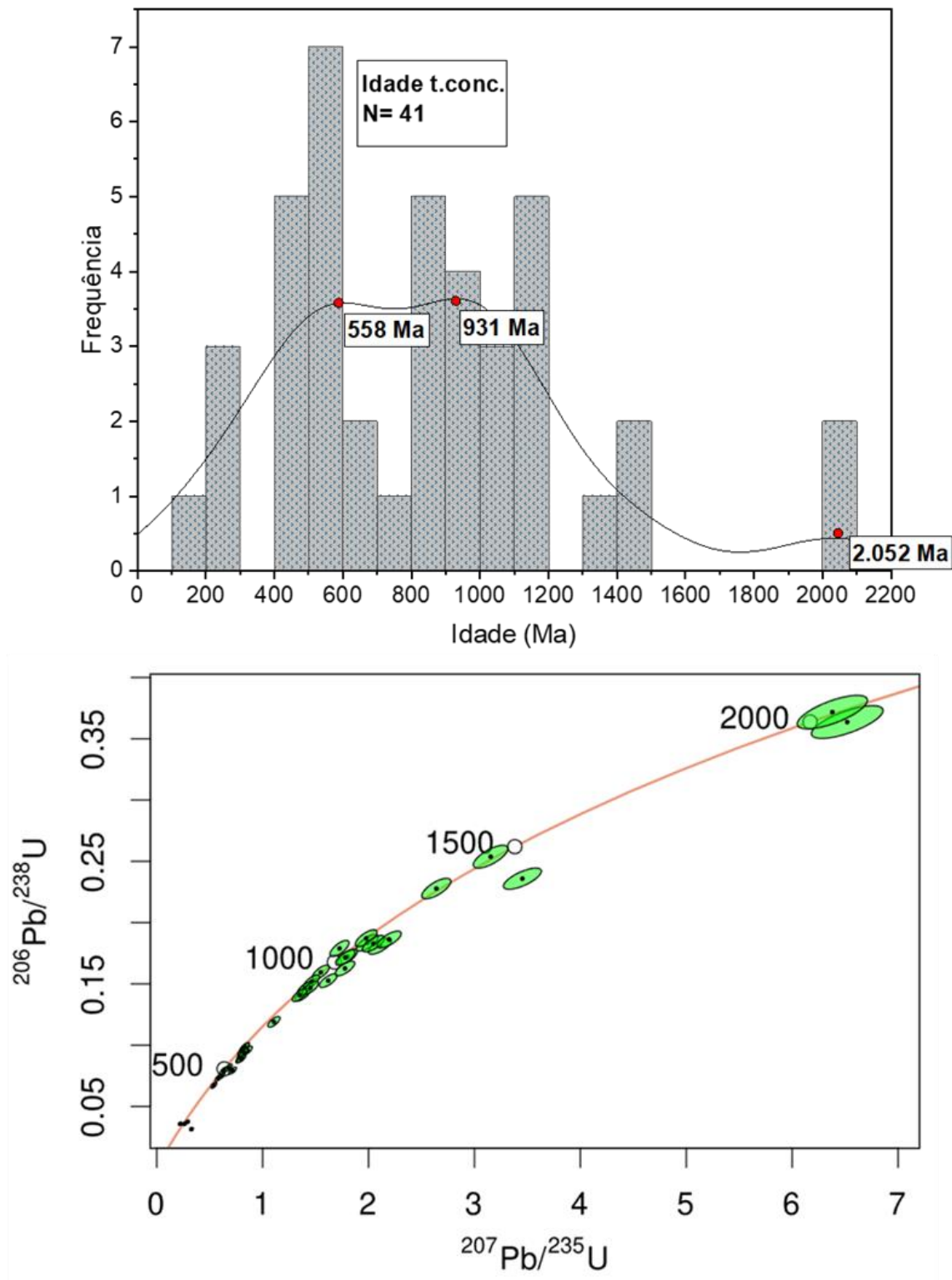
Figura 28: idade de concórdia da amostra ARE14. Distribuição (superior) e diagrama de concórdia (inferior)



Fonte: o autor

Datação U-Pb por espectrometria de massa LA-ICP-MS da amostra ARE17: 41 medidas isotópicas foram aferidas para a amostra ARE17 na aplicação do método de datação U-Pb via LA-ICP-MS. Os resultados foram similares ao caso da amostra ARE14, isto é, amostra a ARE17 apresentou um espectro de idade mais antigo que os espectros da ARE05 e da ARE07, de tal forma que as idades adotadas foram as idades de concórdia. A distribuição das 41 idades de concórdia está apresentada no canto superior da figura 32. A distribuição da amostra a ARE17 abrange idades desde 100 a 2.100 Ma. É importante ressaltar a origem arenítica dessa amostra que justifica a grande dispersão de idades dessa distribuição. Para estimar os aspectos da função densidade de probabilidade, fez-se mesmo procedimento de análise da distribuição da ARE14. Com isso se obteve três valores de máximo local fixados em 558, 931 e 2052 Ma. Contudo, a curva de concórdia apresentou concordância entre os geocronômetros e as elipses das razões isotópicas estão distribuídas sobre curva de concórdia desde os valores de 100 a 2100 Ma.

Figura 29: idade de concórdia da amostra ARE17. Distribuição (superior) e diagrama de concórdia (inferior)



Fonte o autor

4.5 ESTUDO DE HISTÓRIA TÉRMICA DAS AMOSTRAS ARE02 E ARE03

Duas amostras de apatita foram selecionadas para realização do estudo de História Térmica via Modelo de Annealing, uma vez tendo apresentado abundância suficiente de traços confinados que viabilizasse emprego da técnica. A amostra ARE02 teve 31 traços confinados contabilizados. Por outro lado, a amostra ARE03 manifestou 30. A seguir, a tabela 4 e 5 contém o número de traços confinados, o comprimento L e o ângulo Θ em relação ao eixo principal C do mineral para as amostras ARE02 e ARE03 respectivamente.

Tabela 4: comprimento e angulação em relação ao eixo C dos traços confinados na amostra ARE 02
 N = Número do Traço; L = Dimensão dos traços confinados (μm);
 Θ = Ângulo em relação ao eixo C da apatita ($^{\circ}$).

Nº	L	Θ	Nº	L	Θ
1	13,60	5,97	17	12,69	59,01
2	13,50	27,79	18	13,19	85,58
3	13,24	11,83	19	14,95	42,62
4	13,89	87,16	20	14,71	71,63
5	12,92	39,22	21	12,04	89,85
6	12,79	45,89	22	12,94	18,46
7	14,29	79,64	23	14,80	68,63
8	14,96	7,58	24	14,03	74,84
9	12,64	71,36	25	14,25	86,59
10	13,18	63,49	26	13,56	30,58
11	14,55	11,05	27	13,14	74,64
12	13,21	81,40	28	11,65	59,83
13	12,08	67,34	29	13,39	79,66
14	14,93	45,03	30	12,92	43,06
15	12,09	49,18	31	12,19	87,08
16	13,41	21,23			

Fonte: o autor.

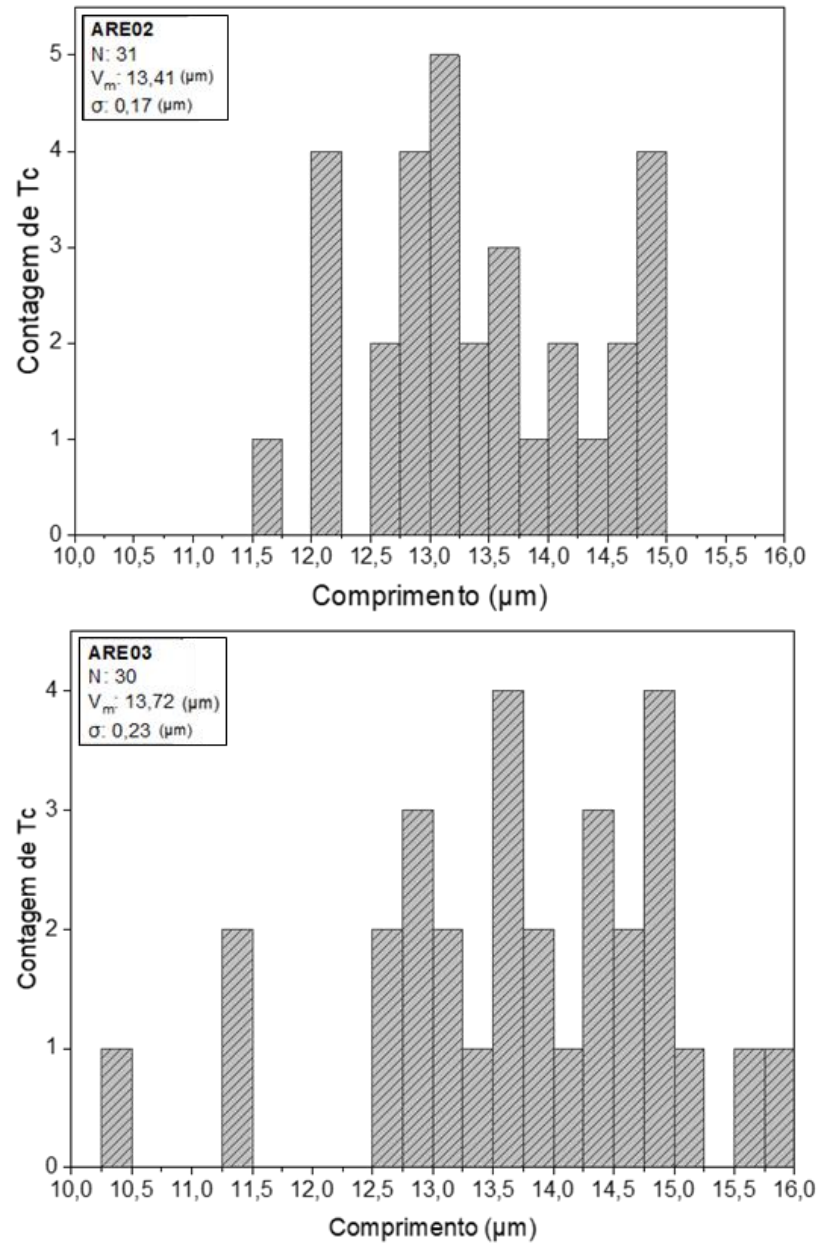
Tabela 5: comprimento e angulação em relação ao eixo C dos traços confinados na amostra ARE 03
 N = Número do Traço; L = Dimensão dos traços confinados (μm);
 Θ = Ângulo em relação ao eixo C da apatita ($^\circ$).

Nº	L	Θ	Nº	L	Θ
1	12,81	67,32	16	13,86	17,32
2	10,27	84,79	17	13,20	72,98
3	13,64	62,48	18	14,06	54,49
4	14,43	66,19	19	14,88	52,55
5	14,84	72,08	20	12,63	81,46
6	13,45	35,91	21	15,22	41,71
7	12,77	70,37	22	14,47	32,18
8	12,81	76,77	23	11,46	84,80
9	14,74	71,68	24	15,98	68,83
10	14,82	51,01	25	13,72	71,67
11	14,80	79,38	26	14,38	49,62
12	15,63	63,23	27	13,18	61,41
13	11,35	49,14	28	12,70	63,12
14	13,76	88,76	29	13,63	56,43
15	14,70	57,25	30	13,51	57,22

Fonte: o autor

A amostra ARE02 apresentou traços confinados com comprimento cujo V_M é de $13,41 \pm 0,17 \mu\text{m}$. A amostra ARE03 teve traços confinados com V_M de $13,72 \pm 0,23 \mu\text{m}$. Ambos os valores podem ser conferidos na figura 33 que é uma distribuição de comprimento de traços confinados para cada conjunto de dados (ARE02 na região superior e ARE03 na região inferior). A distribuição da amostra ARE02 é compreendida no intervalo de comprimentos entre 11,5 e 15 μm . No caso da ARE03, a distribuição é descrita por comprimentos entre 10,25 e 16 μm .

Figura 30: distribuição de comprimento de traços confinados da amostra ARE02 (superior) e ARE03 (inferior). N: número de traços; Tc: traço confinado; V_M : valor médio; σ : desvio padrão.

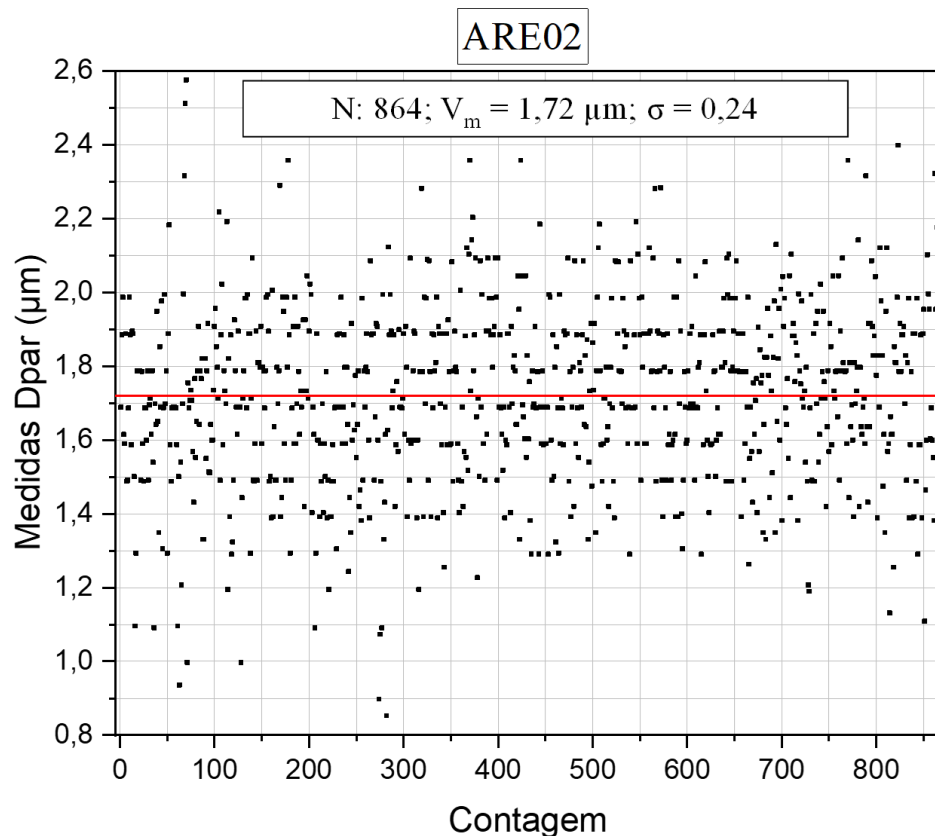


Fonte: o autor.

A idade de traço de fissão (FTA) obtida anteriormente para a amostra de apatita ARE02 via LA-ICP-MS foi de $103,13 \pm 8,20$ Ma. Essa idade também recebe o nome de “idade aparente”, uma vez que o apagamento de traços provocado pelo processo de *annealing* resulta em uma redução das densidades de traços que compõem o cálculo da idade. Por outro lado, a idade corrigida t_0 pode ser estimada a partir da relação que leva em consideração a proporcionalidade entre o recozimento (L/L_0 , onde L e L_0 são o comprimento médio dos traços com e sem annealing, respectivamente), e com isso a diminuição das densidades de traços, com a redução no comprimento dos traços confinados.

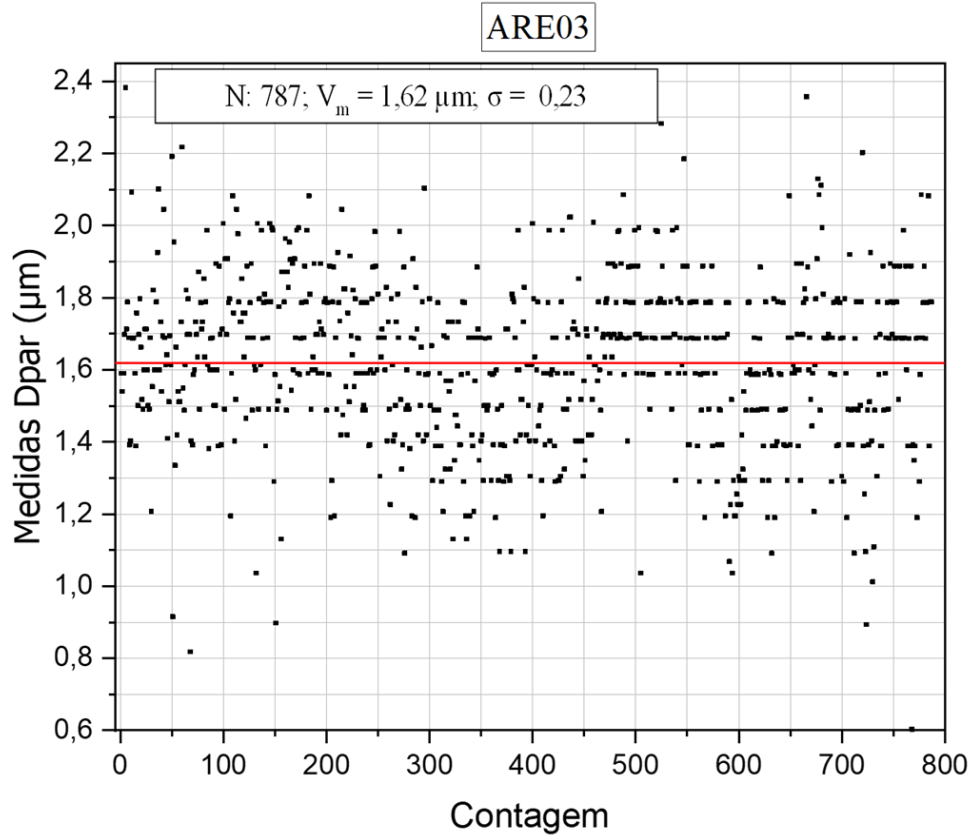
Quanto as medidas Dpar, nos grãos de apatita, apresenta-se a figura 31 (para ARE02) e a figura 32 (para ARE03). Essas são a flutuação dos comprimentos Dpar para obtenção de seu valor médio total (os valores médios para cada grão foram levados em consideração nos métodos procedimentais, mas não estão apresentados individualmente por este recurso gráfico). Cerca de 15 medidas foram feitas para cada grão para obter os valores médios individuais Dpar. O valor médio aritmético total da medida Dpar em ARE02 é de 1,72 μm , com desvio padrão de 0,24. A mostra ARE03 resultou como média aritmética total dessas medidas em 1,62 μm , com desvio padrão de 0,23. Essa medida é indispensável para os modelos de annealing que levam em consideração o conteúdo de cloro na composição da estrutura cristalina da apatita que tornam os traços mais ou menos resistentes ao apagamento.

Figura 31: flutuação das medidas Dpar em cada grão de apatita da amostra ARE02. N: número de medidas; Vm: valor médio aritmético; σ : desvio padrão. Linha em vermelho é a média.



Fonte: o autor

Figura 32: flutuação medida Dpar para cada grão da amostra de apatita ARE03. N: número de medidas; Vm: valor médio aritmético; σ : desvio padrão. Linha em vermelho é a média.



Fonte: o autor

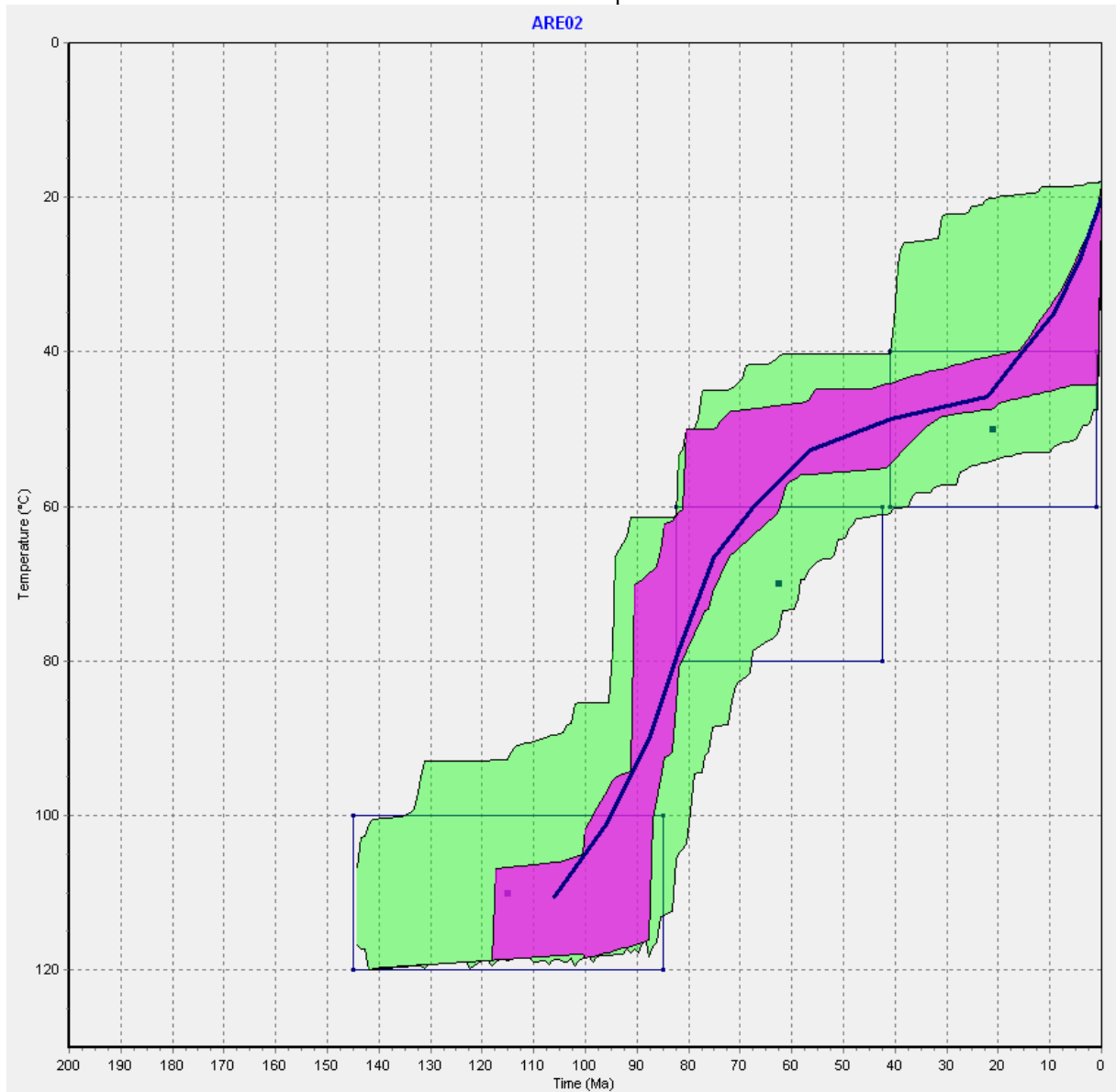
A amostra ARE02 apresentou um comprimento reduzido de traços confinados na ordem de 0,823, ou seja, os traços confinados da amostra ARE02 possuem em média 82,3% do comprimento total que é comum de se observar em amostra que não sofreram *annealing*. Com isso a idade corrigida da amostra ARE02 é 125 Ma.

As histórias térmicas foram construídas com o programa HeFTy. A busca por curvas compatíveis se iniciou com a proposição de uma caixa de Monte Carlo centralizada sobre o valor t_0 . Para o caso da amostra ARE02, 125 Ma com largura definida em ± 20 Ma. Nos limites de temperatura, se considerou que as amostras não passaram por eventos com temperaturas inferiores a 20° C e que a temperatura máxima que permite a retenção de traços por alguns milhões de anos para o caso da apatita é de 120° C. Esse pensamento, no limite das temperaturas foi reproduzido para as outras duas caixas iniciais, com mesma amplitude no eixo do tempo, posicionadas em $t_0/2$ e 0 - 2 desvios de 20 Ma. Algumas curvas foram encontradas. Com isso redesenhou-se os limites das caixas de Monte Carlo, por algumas vezes, para apreciação das curvas que apresentaram um padrão mais linear de resfriamento dado o padrão de distribuição de idades e o tipo das rochas. Por fim, se obteve a figura 34.

A curva em azul é o caminho médio ponderado formado pelas curvas em verde e em lilás. Essa curva sugere que a história térmica da amostra ARE02 se iniciou em 105 Ma atrás com temperatura entre 100 e 120° C e foi sofrendo resfriamento linear por 70 Ma até chegar a temperaturas entre 40 e 60° C em 45 Ma atrás. Os últimos 20 Ma são marcados por um resfriamento bem mais acelerado até a atualidade.

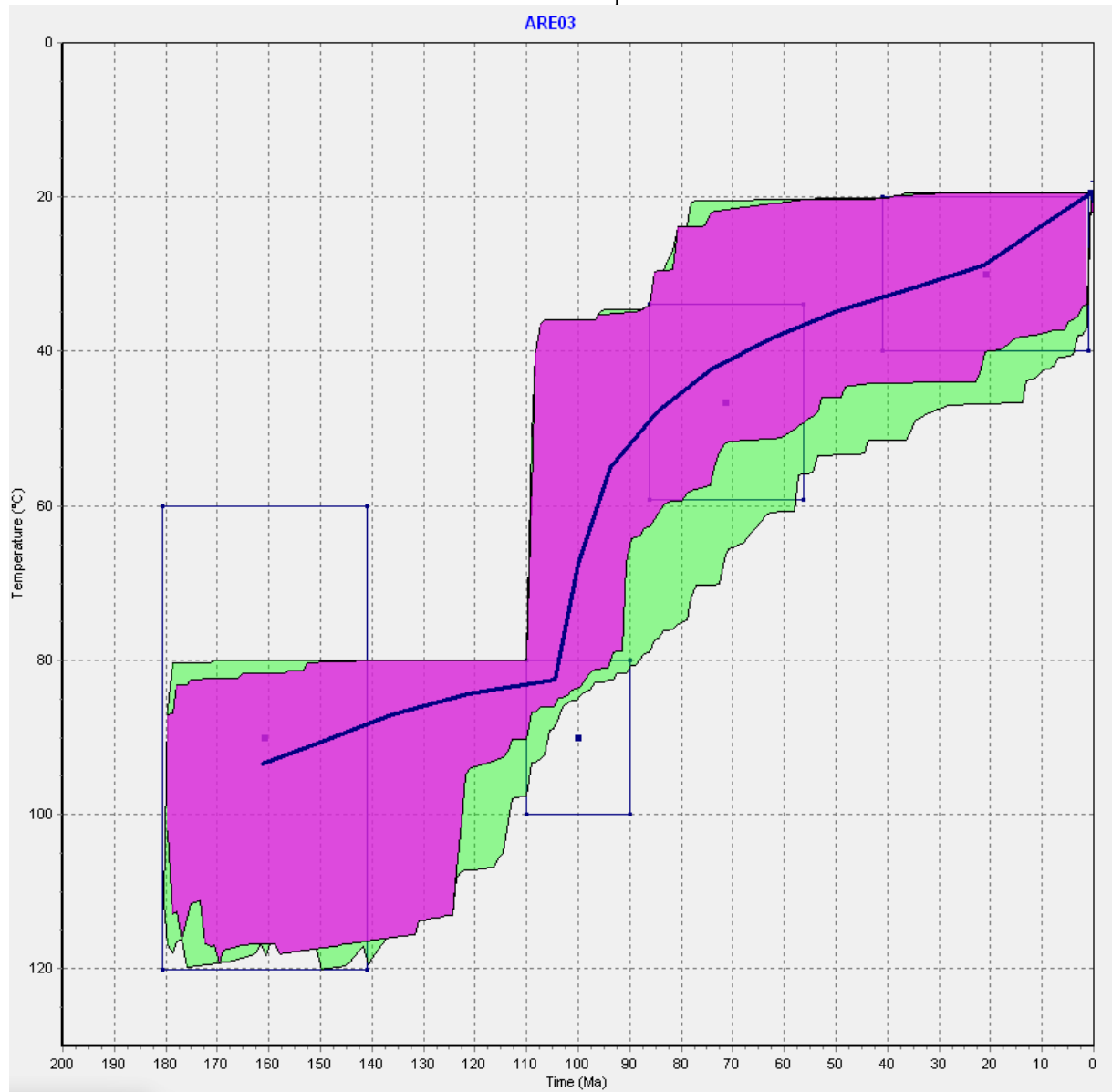
A obtenção da figura 35 seguiu os mesmos procedimentos realizados quanto à figura 34, ao estabelecer um t_0 de 161 Ma da amostra ARE03, idade estimada, considerando o comprimento reduzido observado de 0,841. O caminho médio ponderado na figura 35 sugere que a história térmica da amostra ARE03 se iniciou em 160 Ma atrás entre temperaturas de 80 a 120° C e sofre resfriamento relativamente lento até chegar em 105 Ma. A partir deste ponto a história térmica da amostra ARE03 se aproxima da história térmica da amostra ARE02, experimentando um resfriamento ligeiramente linear até os últimos 20 Ma com temperaturas entre 20 e 40° C. Os últimos 20 Ma é caracterizado por um resfriamento levemente acelerado como ocorre em maior intensidade à amostra ARE02.

Figura 33: História térmica da amostra ARE02. Temperature: temperatura; Time: tempo. Área da cor lilás representa as curvas de história térmica de maior compatibilidade com os dados observados da amostra ARE02. A área de cor verde representa curvas de menor compatibilidade, mas ainda aceitáveis de acordo com os dados observados. A curva azul é o caminho médio ponderado das curvas encontradas.



Fonte: o autor.

Figura 34: História térmica da amostra ARE03. Temperature: temperatura; Time: tempo. Área da cor lilás representa as curvas de história térmica de maior compatibilidade com os dados observados da amostra ARE03. A área de cor verde representa curvas de menor compatibilidade, mas ainda aceitáveis de acordo com os dados observados. A curva azul é o caminho médio ponderado das curvas encontradas.



Fonte: o autor.

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A tabela 4 é um esquema que relaciona a descrição rochosa das amostragens com as datações radiométricas realizadas neste estudo, em busca da síntese dos resultados obtidos para proposição de uma interpretação geral quanto aos produtos de cada método.

Tabela 6: resumo dos resultados das datações MDE, MTLA e U-Pb.

		Tipo de rocha e descrição	Idades Média MDE (Ma)	Idades Média MTLA (Ma)	Picos de idade, MTLA (Ma)	Picos de idade U-Pb (Ma)	Idade de concórdia (Ma)
ARE02	Apatita	ígnea	114 ± 2	103 ± 8	—	—	—
ARE03	Apatita	ígnea	110 ± 2	136 ± 14	—	—	—
ARE04	Apatita	ígnea	133 ± 9	101 ± 9	—	—	—
ARE05	Zircão	Rocha metamórfica de baixo grado flaser. Apresenta um plano de pseudotaquilito	—	58 ± 4	—	—	167 ± 1
ARE06	Apatita	Ígnea	—	109 ± 13	—	—	—
ARE07	Apatita e Zircão	Ígneas. Rochas plagioclaseo hidrotermal (perto das águas termais de Yura a aproximadamente 20 km da cidade de Yura-Arequipa, Peru). Diorito mais antigo que os plutões. Não apresentam transições de metamorfismo.	—	(apatita) 105 ± 13 (zircão) 84 ± 4	—	—	156 ± 1
ARE14	Zircão	quartzito, quartzito arenito com disseminações de óxido de ferro	—	—	227, 325 e 478	633 e 2.528	—
ARE17	Zircão	Formação Murco com depósitos eólicos. La estratificação é segada. Rocha quartzo-arenítica	—	—	240, 358 e 511	558, 931 e 2052	—

Fonte: o autor.

As datações MDE das amostras ARE02, ARE03 e ARE04 apresentaram idades compatíveis com as datações MTLA das mesmas. Esse resultado deve ser produto da boa aplicação das metodologias de datação MTF visto que ambas devem ser equivalentes e suas idades sistematicamente concordantes. Por outro lado, a aparição de mais de uma população quase sempre ocorreu no emprego das datações via MTLA, tanto para as amostras de apatita ígneas quanto para os zircões de mesmo tipo. Isso pode ser explicado levando em conta o próprio viés do emprego metodológico desse tipo de datação.

A princípio, as flutuações de idades obtidas das apatitas por MDE e por MTF via LA-ICP-MS parecem expressar resultados contraditórios, uma vez que o primeiro método resultou em flutuações com consistência interna, enquanto o segundo resultou em flutuações com populações não estatisticamente compatíveis. Essa aparente contradição ocorre dado que ambas

as metodologias têm o mesmo fim; o mesmo objeto. Diante disso, aquilo com que se tem aqui a ver é o resultado de uma investigação, de análise de dados, em busca de uma hipótese capaz de explicar, após tantas tentativas de correção procedimental que apontaram para esse mesmo fim: ambas as flutuações são válidas simultaneamente, mas elas não são a respeito de um mesmo objeto estatístico.

O que se pode verificar ao longo do tratamento de dados é que zircões das alíquotas deste estudo, que foram ablacionados pelo menos duas vezes em regiões distintas do grão, demonstraram grande variação nas concentrações de urânio entre cada uma das ablações. Não foi possível obter duas medidas ou mais de MTF via LA-ICP-MS em grãos de apatita, mas os resultados obtidos via essa metodologia nos zircões são confirmações da possibilidade de alta variação na concentração do urânio em um único grão. Alguns grãos de apatita podem chegar a 2.000 micrômetros quadrados em termos de superfície, enquanto a ablação feita para a obtenção das idades por espectrometria de massa reúne os conteúdos desse material em uma área circular proporcional a um diâmetro de 30 micrômetros. Esse dado não avalia a flutuação de urânio ao longo de todo o corpo do mineral, mas quando ele é considerado o dado que infere a idade geral do grão, se estabelece um determinado grau de viés metodológico. Isso tem razão de ser, pois a ablação completa do grão geralmente não é praticável na rotina laboratorial, devido à demanda de mais recursos e de tempo. Mesmo que o grão seja ablacionado duas vezes, em vez de apenas uma, na busca por verificar a flutuação da concentração de urânio, isso pode ser estatisticamente insuficiente e certamente o tempo de dedicação necessário para o tratamento de cada um dos grãos aumenta. Dessa forma, as idades individuais obtidas podem ser estatisticamente incompatíveis, uma vez que sua flutuação, apesar de estar carregada da informação geocronológica, está indissociavelmente sensibilizada pela alta variação na concentração de urânio nos grãos.

Por conseguinte, compreende-se que esta flutuação deve ser lida de forma que não a confunda com os objetos carregados pela flutuação levantada com o MDE. Isso porque (1) esse último método permite um ajuste mais refinado das áreas consideradas adequadas na superfície do grão para contagem de traços; (2) esse método trabalha com irradiação completa do mineral e tem o detector externo como um anteparo para os traços induzidos provenientes de todo o grão. Assim, suas idades geralmente são obtidas com uso de áreas próximas à totalidade das próprias dimensões superficiais do grão, que faz dessa metodologia mais insensível à variação na concentração de urânio.

Essa conclusão indica que não existem vantagens óbvias de uma metodologia sobre a outra. O método de traço de fissão via detector externo é uma metodologia que costuma levar

mais tempo de produtividade para obtenção de resultados em comparação ao método de traço de fissão via espectrometria de massa por ablação a laser, apesar de ela oferecer obtenção de idades individuais dos grãos mais apropriada para sua avaliação em casos de maior grau de variação na concentração de urânio. Contudo, as idades médias obtidas por MTF via LA-ICP-MS são bons indicadores geocronológicos, pois supõem as idades de todos os grãos em conjunto. A média mais adequada para a obtenção dessas idades é chamada “*pooled age*”, que consiste em considerar todos os grãos, e com isso cada uma de suas ablações, como sendo na verdade um único grão. Esse tratamento estatístico implica que todas essas ablações individuais podem ser reunidas como feitas em um único e enorme grão, método que contorna satisfatoriamente a sensibilidade da variação de urânio, ainda que suas flutuações de idades individuais possam compor populações estatisticamente não compatíveis, ao levar em conta as variações de urânio em cada área ablaçada para determinar o ^{238}U (Vermeesch, 2017; Seiler et al., 2023) e das idades fornecidas pelas datações com MDE. Todavia conforme pontua Vermeesch (2017) quando um conjunto de dados não atende ao teste de homogeneidade de idade, isso pode ser atribuído não necessariamente a razões geológicas, mas, em vez disso, a problemas estatísticos que envolvem o método TF utilizando LA-ICP-MS. Neste caso, a variação da concentração de urânio através da rede cristalina, que pode ocorrer por diversos processos físico-químicos que provocam abertura do sistema, não pode ser compreendida em sua totalidade com apenas uma única ablação.

Outro resultado relevante que se pode observar da tabela 6 é que as amostras de apatita, ARE02, ARE03 e ARE04, possuem idades compatíveis com a idade média entre elas, ao redor de 120 Ma. Resultado esperado para amostras ígneas coletadas sobre a mesma unidade litológica. Por outro lado, a datação MTLA da amostra de apatita ARE06 (109 ± 13 Ma) também é compatível com as idades obtidas nas amostras ARE 02, 03 e 04, que também corresponde a uma rocha ígnea. De acordo com as histórias térmicas das amostras ARE02 e ARE03 (figuras 33 e 34) pode-se inferir que as amostras ARE 04 e ARE 06 tenham uma história térmica similar, ou seja um esfriamento linear desde 110 Ma até aproximadamente 20 Ma tendo passado por um esfriamento mais rápido desde 20 Ma até a atualidade. Isso devido a que as amostras ARE 02, 03, 04 e 06 possuem idades compatíveis e todas elas corresponde a rochas ígneas que compõem a uma única unidade geológica.

No caso da amostra ARE 05 que corresponde a uma rocha metamórfica de baixo grau a idade MTLA no zircão é de 58 ± 4 Ma, isto indica que esta unidade geológica teria passado pela isoterma de ~ 240 °C neste tempo para logo esfriar até a temperatura ambiente atual. Já no caso da amostra ARE 7 que corresponde a uma rocha hidrotermal temos idades de MTLA tanto na

apatita quanto no zircão, sendo elas compatíveis em ambas isotermas de $\sim 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $\sim 240\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectivamente. Isso quer dizer que esta amostra teria sofrido um esfriamento rápido, passando por ambas isotermas, há $\sim 95\text{ Ma}$ no intervalo de tempo de aproximadamente um milhão de anos. Neste intervalo de tempo não há possibilidade de o zircão reter uma quantidade de traços suficiente para obter uma idade superior à da apatita.

Um resultado também muito interessante é que as idades U-Pb das amostras ARE05 e ARE07 são semelhantes e teriam passado pela isoterma de $\sim 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ há aproximadamente 160 Ma. Isto é, a amostra ARE05 teria esfriado de 900 a $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ no intervalo de tempo de $\sim 100\text{ Ma}$ enquanto a mostra ARE 07 este esfriamento teria sido no intervalo de $\sim 60\text{ Ma}$.

As amostras de zircão ARE14 e ARE17 possuem uma larga distribuição de idades que vão desde 60 Ma a 2,5 Ga. Desta forma, é razoável concluir que as idades mais jovens devem estar relacionadas aos processos tectônicos ocorridos nos Andes Peruanos em regiões adjacentes à região de Yura. As idades mais antigas ultrapassam a idade de formação dos Andes e devem ser produto de outras fontes, como do Cráton de São Francisco, pois nestas idades os continentes africano e sul-americano estavam juntos formando o Gondwana. É importante ressaltar que os picos principais de idades de $\sim 600\text{ Ma}$, 931 Ma são observados na Bacia do Paraná (Resende et al., 2020).

ANÁLISE TECTÔNICA

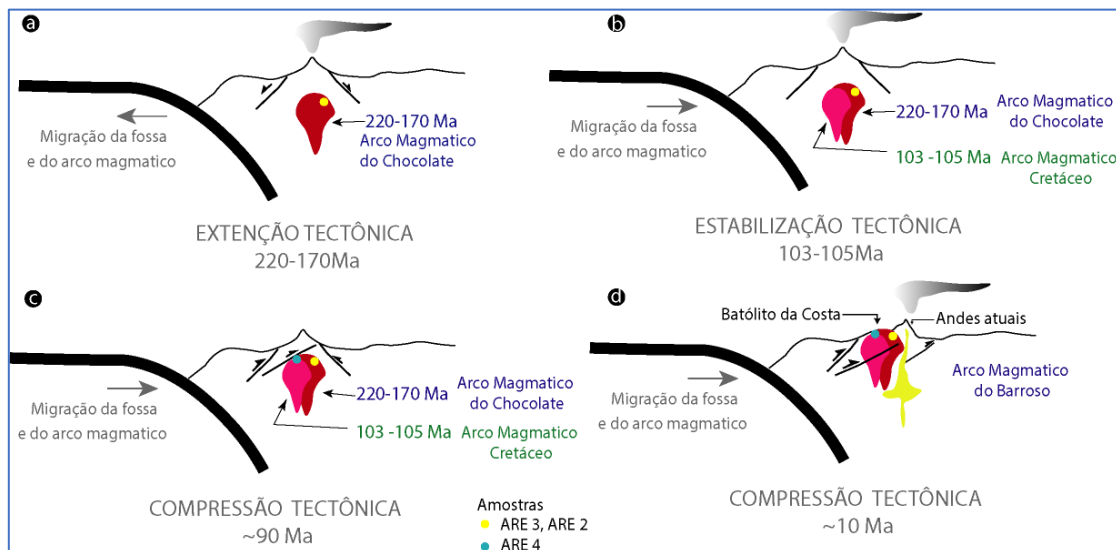
Pode-se observar que as idades U-Pb das amostras de zircão ARE05 e ARE07 estão no intervalo entre 156 e 167 Ma que coincide com a tectônica da região de Arequipa. O Batólito da Costa teria se formado entre 220 e 170 Ma com o funcionamento do Arco do Chocolate (Demouy et al., 2012, Gráfico 15-a), o qual mostra um “flare-up” na região que é compatível com o aquecimento das amostras ARE05 e ARE07 que muito provavelmente é parte de essa suíte magmática a qual foi afetada também pela falha normal da Cincha-Lluta (Demouy et al., 2012). Esta hipótese é fortalecida pelos resultados das idades MTLA das amostras ARE05 ($\sim 60\text{ Ma}$ no zircão) e ARE07 ($\sim 95\text{ Ma}$ no zircão e na apatita). É importante notar que esse período do Jurássico (200 – 150 Ma) é um período de extensão tectônica (Chavez et al., 2021) que afetou não só a bacia de Arequipa e sim também o Batólito da Costa (Chavez et al., 2021, Demouy et al., 2012). Então a idade U-P de $\sim 160\text{ Ma}$ (ARE05 e ARE07) é compatível com atividade magmática da área em estudo ao qual pode-se atribuir como responsável o Arco Mágmatco do Chocolate, ao mesmo tempo o arco magmático estava migrando na época para o Oeste (Mamani et al., 2010, Chavez et al., 2021).

As idades de 103 – 105 Ma (Idades aparentes das amostras ARE 2 e ARE 3) podem-se interpretar como o novo funcionamento do arco magmático na região, no qual, nesse período o arco migra novamente ao Noroeste, reativando dessa forma o magmatismo na região de Arequipa (Demouy et al., 2012; Chavez et al., 2021; gráfico 15-b). É equivalente dizer que estas rochas foram afetadas por um novo arco magmático que, no entanto, é incapaz de atingir um *reset* da história térmica dos granitos ARE 3 e ARE 2. Com isso as idades AFT são compatíveis com o funcionamento do arco magmático no 110 – 105 Ma (Arco magmático do Cretáceo).

Por outro lado, a idade de ~ 95 Ma da ARE04, é compatível com o início da compressão e a edificação dos Andes atuais que foi refletida na bacia de Arequipa (Chavez et al., 2021, Mamani et al., 2010; Gráfico 15-c) o que possivelmente é a primeira bacia de fore-land nos Andes, mas geologicamente a ARE 4 é a amostra que ficaria mais perto de uma falha polifásica que tinha funcionado desde o Cretáceo superior, que depois se reativou há ~ 60 Ma (idade da amostra ARE05 no zircão) com a edificação os Andes Centrais, tudo isso em uma tectônica de compressão (Gráfico 15-c).

As três amostras (ARE02, ARE03, ARE04 e ARE06), tem uma história térmica comum aos 10 Ma, o que é compatível com as exumações aceleradas nos Andes Centrais e também com a atividade do Arco Magmático do Barroso (Mamani et al., 2010; gráfico 15-d).

Figura 35: Modelo Geológico da evolução tectônica da região de Arequipa



Fonte: Elaborado por Cesar Anthony Chavez a partir dos dados desta tese.

6. CONCLUSÕES

A amostra padrão denominada Durango do México forneceu uma idade compatível com aquela determinada pela comunidade mundial de TF, $30,3 \pm 0,8$ Ma. Desta forma este resultado

mostra que o aluno atingiu habilidade suficiente para datar qualquer amostra através do MTF via o Método do Detector Externo.

Os resultados das idades obtidas nas amostras ARE02, ARE 03 e ARE 04 através do MDE e os resultados das idades obtidas nestas mesmas amostras via o LATF na apatita são compatíveis, o que viabiliza o uso deste método no laboratório de TF do nosso Grupo de Pesquisa DETRAN. Isto é, esta metodologia foi colocada em rotina através deste trabalho e pode ser utilizada daqui para frente já que o método LATF é muito mais rápido do que o método via o MDE. Por outro lado, estes resultados obtidos nas amostras de apatita são compatíveis tanto do ponto de vista estatístico como geológico.

As histórias térmicas obtidas nas amostras de apatita, a ARE 02 e a ARE 03 permitem observar como teria sido a sua evolução térmica e fornece uma ideia de como os Andes foram se formando através da subducção da placa tectônica de Nazca na placa Sula-americana. Isto é os Andes Peruanos, na parte sul, teria passado pela isoterma de 120 °C há 120 Ma e foi subindo em direção à superfície de forma, primeiro, relativamente mais lenta entre 160 e 105 Ma quando atinge uma temperatura de aproximadamente 85 °C. Após isto os Andes teriam subido mais rapidamente no intervalo de 105 Ma a 20 Ma onde a temperatura era de ~ 30 °C e finalmente nos últimos 20 Ma de anos teria subido ainda mais rapidamente coincidindo com a alta atividade vulcânica da região de Arequipa onde foram coletadas as amostras.

As idades simultâneas obtidas através do TFLA e U-Pb nas amostras de zircão ARE 5, ARE 7, ARE 14 e ARE 17 mostram que elas estavam em uma temperatura de aproximadamente 900 °C há 180 Ma e a uma temperatura de ~ 240 °C há ~ 70 Ma que é a idade média das idades das amostras ARE 05 e ARE 07. Estes resultados permitem observar que estas amostras pertencem a outra unidade que estava em temperaturas maiores do que as amostras ARE02, ARE 03 e ARE 04.

Os resultados obtidos simultaneamente através de TFLA e U-Pb nas amostras de zircão, a ARE 14 e a ARE 17 mostram um longo intervalo de idades entre 50 e 700 Ma e entre 60 Ma a 2.6 Ma, respectivamente. As idades mais novas até 60 Ma vem de fontes pertencentes aos Andes Peruanos, já as idades mais antigas no Proterozóico têm a suas fontes primárias muito provavelmente no continente Sul-Americano, no Craton de São Francisco, pois nestas idades os continentes africano e sul-americano estavam juntos formando o Gondwana.

De forma geral, estes dados inéditos tanto de idades via TFLA nos minerais apatita e zircão e ainda as idades U-Pb obtidas no zircão permitiram fazer uma interpretação geológica e tectônica abrangente, de tal forma que neste trabalho foi possível realizar um modelo geológico da evolução tectônica e do surgimento dos Andes centrais na região de Arequipa

7. REFERÊNCIAS

- AZEVEDO, M. C. DE. Caracterização cristalográfica e isotópica do mineral zircão através do método de traços de fissão, U-Pb e U-Th/He: geocronologia da província Borborema, RN, Brasil. 22 jul. 2021.
- BERNET, M. A field-based estimate of the zircon fission-track closure temperature. *Chemical Geology*, v. 259, n. 3–4, p. 181–189, 25 fev. 2009.
- BHANDARI, N. et al. Fission fragment tracks in apatite: recordable track lengths. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 13, n. 1, p. 191–199, 2 dez. 1971.
- BIGAZZI, G. et al. Fission track DSDI measurements in artificial glass under conditions free from fading and radiation. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, v. 53, n. 1, p. 67–70, 1 jan. 1991.
- BONILLA, A. et al. Apatite LA-ICP-MS U–Pb and fission-track geochronology of the Caño Viejita gabbro in E-Colombia: Evidence for Grenvillian intraplate rifting and Jurassic exhumation in the NW Amazonian Craton. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 98, p. 102438, 1 mar. 2020.
- BRUIJNE, C. H. DE. Denudation, intraplate tectonics and far field effects: an integrated apatite fission track study in central Spain. 2001.
- CARTER, A.; BRISTOW, C. S. Detrital zircon geochronology: enhancing the quality of sedimentary source information through improved methodology and combined U–Pb and fission-track techniques. *Basin Research*, v. 12, n. 1, p. 47–57, 18 mar. 2000.
- CHAMBERLAIN, K. R.; BOWRING, S. A. Apatite–feldspar U–Pb thermochronometer: a reliable, mid-range (~450°C), diffusion-controlled system. *Chemical Geology*, v. 172, n. 1–2, p. 173–200, 1 fev. 2001.
- CHEW, D. M.; DONELICK, R. A. Combined apatite fission track and U-Pb dating by LA-ICPMS and its application in apatite provenance analysis. 2012.
- FAURE, G. The U-Th-Pb methods of dating. *Principles of isotope geology*. 2 ed. New York, USA: John Wiley & Sons, p. 282-308. 1986.
- FENG, Y., LIANG, T., LINNEN, R., ZHANG, Z., ZHOU, Y., ZHANG, Z., & GAO, J. (2020). LA-ICP-MS dating of high-uranium columbite from no. 1 pegmatite at Dakalasu, the Chinese Altay orogen: Assessing effect of metamictization on age concordance. *Lithos*, 362, 105461.
- GUEDES, S. et al. Spontaneous-fission decay constant of ^{238}U measured by nuclear track techniques without neutron irradiation. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, v. 258, n. 1, p. 117–122, out. 2003.
- Hyper Physics, Radioactive decay series. Retrieved March 19, 2008. Disponível em: <<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Nuclear/radser.html>>. Acessado em 14 de julho de 2023.

IUNES, P.J. Aplicação da dosimetria de neutrons através de filmes finos de urânio natural e tório na datação pelo método dos traços de fissão. 1999. 76f. Tese (Doutorado em Física) — Instituto de Física Gleb Wataghin, UNICAMP, Campinas – SP, 1999.

IUNES, P.J. Datação com o método dos traços de fissão: estudo da dosimetria de nêutrons com filmes finos de urânio natural. 1990. 101f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Instituto de Física Gleb Wataghin, UNICAMP, Campinas – SP, 1990.

IUNES, P.J.; BIGAZZI, G.; HADLER N., J.C.; LAURENZI, M.A.; BALESTRIERI, M.L.; NORELLI, P.; OSÓRIO A., A.M.; GUEDES, S.; TELLO S., C.A.; PAULO, S.R.; 182 MOREIRA, P.A.F.P.; PALISSARI, R.; CURVO, E.A.C. U and Th thin film nêutron dosimetry for fission-track dating: application to the age standard Moldavite. *Radiation Measurements*, [S.I.], v. 39, p. 665-668, 2005.

IUNES, P.J.; BIGAZZI, G.; HADLER N., J.C.; TELLO S., C.A.; GUEDES, S.; PAULO, S.R.; BALESTRIERI, M.L.; NORELLI, P.; ODDONE, M.; OSÓRIO, A. M.; ZUÑIGA, A. The Th/U ratio in minerals by a fission-track technique: application to some reference samples in order to estimate the influence of Th in fission-track dating. *Radiation Measurements*, [S.I.], v. 35, p. 195-201, 2002b.

IUNES, P.J.; HADLER N., J.C.; BIGAZZI, G.; GUEDES, S.; ZUÑIGA G., A.; PAULO, S.R.; TELLO S., C.A. Uranium and thorium thin film calibrations by particle track techniques. *Journal of radioanalytical and nuclear chemistry*, [S.I.], v. 262, n. 2, p. 461-468, 2004.

IUNES, P.J.; HADLER N., J.C.; BIGAZZI, G.; TELLO S., C.A.; GUEDES, S.; PAULO, S.R. Durango apatite fission-track dating using length-based age corrections and neutron fluence measurements by thorium thin films and natural U-doped glasses calibrated through natural uranium thin films. *Chemical Geology*, [S.I.], v. 187, p. 201-211, 2002a.

IWANO, H.; DANHARA, T. A re-investigation of the geometry factors for fission-track dating of apatite, sphene and zircon. In: HAUTE, P.V.D.; CORTE, F. (Eds.). *Advances in Fission-Track Geochronology*. Netherlands: Kluwer Academic. p. 47-66. 1998.

JAFFEY, A. H. et al. Precision Measurement of Half-Lives and Specific Activities of ^{235}U and ^{238}U . *Physical Review C*, v. 4, n. 5, p. 1889, 1 nov. 1971.

JÄGER, Emilie; HUNZIKER, Johannes C. (Ed.). *Lectures in isotope geology*. Springer Science & Business Media, 2012.

JONCKHEERE, R.; RATSCHBACHER, L. (2015). Standardless fission-track dating of the Durango apatite age standard. *Chemical Geology*, 417, 44-57.

LEDERER, C.M.; SHIRLEY, V.S. *Table of Isotopes*. 7. ed. New York: Wiley-Interscience, 1523 p. 1978.

MORTON, A. C.; HALLSWORTH, C. R. Processes controlling the composition of heavy mineral assemblages in sandstones. *Sedimentary Geology*, v. 124, n. 1–4, p. 3–29, 1 mar. 1999.

RESENDE, R. S. [UNESP]. Aprimoramento da sistemática U-Pb através do método de traços de fissão e técnicas de caracterização: termocronologia da faixa Brasília e sua correlação com a bacia do Paraná. Aleph, p. xxxi, 227 f. : il., 18 set. 2015.

ROJAS-AGRAMONTE, Y. et al. Detrital and igneous zircon ages for supracrustal rocks of the Kyrgyz Tianshan and palaeogeographic implications. *Gondwana Research*, v. 26, n. 3–4, p. 957–974, 1 nov. 2014.

SANDERS, C. A. E. Tectonics and erosion. Competitive forces in a compressive orogen: a fission track study of the Romanian Carpathians. 1998.

SATO, K.; BASEI, M. A.S.; SIGA JR., O.; SPROESSER, W.M; PASSARELLI, C.R. Novas técnicas aplicadas ao Método U-Pb no CPGeo-IGc/USP: avanços na digestão química, espectrometria de massa (TIMS) e exemplos de aplicação integrada com SHRIMP. *REVISTA DO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS*, [S.I.], v. 8, n. 2, p. 77-99, 2008.

SCHOENE, B. U-Th-Pb Geochronology. *Treatise on Geochemistry*, 341-378, 2014.

SCHOENE, B.; BOWRING, S. A. Determining accurate temperature–time paths from U–Pb thermochronology: An example from the Kaapvaal craton, southern Africa. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 71, n. 1, p. 165–185, 1 jan. 2007.

Seiler Christian, Samuel C. Boone, Barry P. Kohn, Andrew J.W. Gleadow. A grain-by-grain comparison of apatite fission-track analysis by LA-ICP-MS and the External Detector Method. *Chemical Geology* 635 (2023) 121623. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2023.121623>

SILVA, L. G. A. DO E. A interação entre os eventos tectônicos e a evolução geomorfológica da Serra da Bocaina, Sudeste do Brasil. 17 mar. 2006.

SOARES, C. J.; Guedes, S.; Hadler, J. C.; Mertz-Kraus, R.; Zack, T.; Iunes, P. J. Novel calibration for LA-ICP-MS-based fission track thermochronology. *PHYSICS AND CHEMISTRY OF MINERALS*, 2013.

SONG, D. et al. Tectono-thermal evolution of the southwestern Alxa Tectonic Belt, NW China: Constrained by apatite U-Pb and fission track thermochronology. *Tectonophysics*, v. 722, p. 577–594, 2 jan. 2018.

TAGAMI, T. et al. Fission track dating using external detector method. *Memoirs of the Faculty of Science, Kyoto University, Series of Geology and Mineralogy*, v. 53, n. 1–2, p. 1–30, 1988.

TAGAMI, T.; O’SULLIVAN, P. B. Fundamentals of Fission-Track Thermochronology. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, v. 58, n. 1, p. 19–47, 1 jan. 2005.

TOGLIATTI, V. Distribuzioni dei ranges e distribuzione angolari delle tracce di fissioni fossili di U235 in mica. Em: *Boll. Geofis. Teor. Appl.* 7. ed. [s.l: s.n.]. p. 326–335.

TORQUATO, J. R.; KAWASHITA, K. VII - Metodologias de datação dos sistemas U,Th-Pb. In: Celso Dal Ré Carneiro. (Org.). *Geocronologia Nuclear*. São Paulo: Ed. UNICAMP, v. 9, p. 153-189, 1996.

VERMEESCH, P. Isotope Geology Part I: Radiometric Geochronology. London geochronology Centre, University College London., 2020.

Vermeesch, P. 2017. Statistics for LA-ICP-MS based fission track dating. *Chem Geol* 456:19–27

VETTER, J.; ACKERMANN, J.; NEUMANN, R.; NISTOR, L.; SCHOLZ, R. (AUTH.); VAN DEN HAUTE, P. Frans de Corte (eds.) *Advances in Fission-Track Geochronology: A selection of papers presented at the International Workshop on Fission-Track Dating, Ghent, Belgium, 1996.* Solid Earth Sciences Library 10. Springer Netherlands. 1998.

WAGNER, G.A.; HAUTE, P.V.D. *Fission-track dating.* Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, v. 6, p. 292. 1992.

WETHERILL, G.W. Discordant uranium-lead ages. *TRANSACTIONS, AMERICAN GEOPHYSICAL UNION, [S.I.]*, v. 37, p. 320-326, 1956.

WIEDENBECK, M., ALLE, P., CORFU, F., GRIFFIN, W.L., MEIER, M., OBERLI, F., VON QUADT, A., RODDICK, J.C., Spiegel, W. Three natural zircon standards for U–Th–Pb, Lu–Hf, trace element and REE analyses. *Geostandards Newsletter* 19, 1-23. 1995.

WILLIAMS, I. S. U–Th–Pb geochronology by ion microprobe. In: McKibben, M. A., Shanks III, W.C., Rydley, W.I. (Eds.), *Applications of Microanalytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes.* *Rev. Econ. Geol.* 7, 1 – 35, 1998.

APÊNDICE A (MDE EM AMOSTRAS DE APATITA)

MTF via detector externo - ARE02								MTF via detector externo - ARE02							
Cont.	Nº Grão	N _s	ρ _s	N _i	ρ _i	t (Ma)	Desvio (±1σ)	Cont.	Nº Grão	N _s	ρ _s	N _i	ρ _i	t (Ma)	Desvio (±1σ)
--	1	--	--	--	--	--	--	34	44	40	1,85	44	0,45	154,14	34,03
1	2	56	2,34	115	0,72	121,37	20,15	35	45	50	2,10	114	0,81	97,03	16,75
2	3	53	1,01	80	0,29	130,70	23,52	--	46	--	--	--	--	--	--
3	4	50	1,08	132	0,41	98,37	16,63	--	47	--	--	--	--	--	--
--	5	--	--	--	--	--	--	36	48	26	1,35	43	0,52	97,89	24,52
4	6	72	0,89	123	0,37	89,82	13,63	37	49	29	1,61	117	0,40	149,07	31,28
5	7	38	1,65	126	0,44	139,84	26,26	38	50	29	0,87	88	0,35	93,94	20,34
--	8	--	--	--	--	--	--	39	51	17	1,48	116	0,48	113,80	29,77
6	9	50	0,88	58	0,28	118,78	23,23	40	52	33	1,83	138	0,52	132,26	25,97
--	10	--	--	--	--	--	--	41	53	14	1,76	91	0,64	103,26	29,83
7	11	75	1,45	98	0,40	136,39	21,37	--	54	--	--	--	--	--	--
8	12	23	0,98	41	0,42	87,90	23,07	--	55	--	--	--	--	--	--
--	13	--	--	--	--	--	--	42	56	19	1,06	49	0,41	95,45	25,97
9	14	44	1,84	112	0,44	155,45	28,10	43	57	34	0,79	53	0,24	123,00	27,31
10	15	84	1,35	101	0,48	105,01	15,86	44	58	43	0,93	63	0,32	107,76	21,59
11	16	41	1,51	63	0,50	111,88	22,73	45	59	57	1,29	40	0,58	83,54	17,43
12	17	24	0,98	59	0,42	87,65	21,40	46	60	21	0,83	52	0,32	97,06	25,29
13	18	28	1,51	24	0,45	125,99	35,28	47	61	58	1,20	40	0,37	121,99	25,37
14	19	22	1,58	93	0,61	96,59	23,11	48	62	42	1,16	49	0,38	114,48	24,35
15	20	21	0,73	52	0,31	88,50	23,05	49	63	31	0,77	95	0,37	77,52	16,22
16	21	22	1,09	98	0,34	121,78	28,99	50	64	27	0,72	45	0,24	113,34	27,83
17	22	35	0,72	64	0,24	111,15	23,63	--	65	--	--	--	--	--	--
18	23	72	1,34	108	0,37	136,52	21,22	--	66	--	--	--	--	--	--
19	24	27	0,90	37	0,28	119,37	30,45	--	67	--	--	--	--	--	--
20	25	28	1,39	52	0,38	137,23	32,46	--	68	--	--	--	--	--	--
--	26	--	--	--	--	--	--	51	69	21	0,67	24	0,22	116,78	35,09
21	27	73	0,78	100	0,44	65,49	10,29	52	70	42	0,76	52	0,27	106,94	22,45
22	28	27	0,92	47	0,36	96,05	23,39	53	71	18	1,21	36	0,33	136,44	39,63
23	29	28	0,80	56	0,24	122,72	28,67	54	72	45	1,56	92	0,50	117,33	21,67
24	30	41	1,33	102	0,45	111,90	21,00	--	73	--	--	--	--	--	--
--	31	--	--	--	--	--	--	55	74	39	1,30	49	0,36	133,98	29,07
25	32	30	0,89	74	0,26	126,18	27,60	56	75	30	1,89	74	0,52	134,38	29,40
26	33	31	0,72	66	0,25	108,40	23,85	57	76	15	0,88	45	0,26	128,41	38,50
27	34	26	0,78	42	0,22	133,17	33,50	58	77	27	1,15	40	0,38	114,46	28,74
--	35	--	--	--	--	--	--	59	78	75	1,29	104	0,40	120,97	18,73
28	36	62	1,33	137	0,51	97,01	15,17	--	79	--	--	--	--	--	--
29	37	17	1,01	46	0,31	122,69	35,04	60	80	91	1,15	126	0,45	95,98	13,55
--	38	--	--	--	--	--	--	--	81	--	--	--	--	--	--
--	39	--	--	--	--	--	--	61	82	39	0,98	34	0,30	122,87	29,09
30	40	11	0,66	37	0,27	89,80	30,97	62	83	25	0,99	18	0,33	110,45	34,32
31	41	40	1,53	80	0,47	121,62	23,87	63	84	29	1,05	55	0,34	113,66	26,33
32	42	36	1,00	105	0,34	109,36	21,41	--	85	--	--	--	--	--	--
33	43	36	0,92	41	0,31	111,10	25,62	--	86	--	--	--	--	--	--

Tabela 7: medidas do MDE e idades correspondentes para amostra ARE02. Esta tabela contém informações sobre a contagem, número do grão (posição na matriz), medidas de traços fosseis e induzidos, com suas respectivas densidades (10⁶/cm²) e as idades aparentes correspondentes calculadas a partir da equação da idade para o MDE. Aqui fica representado os grãos que puderam ser datados e os grãos que, por insuficiência e alguma medida, não puderam ter idades determinadas. Nesse caso o símbolo “--” informa os grãos que não seleccionados para datação. Ns: número de traços fósseis; Ni: número de traços induzidos; ρs: densidade de traços fósseis; t: idade aparente MDE. Fonte: o autor.

MTF via detector externo - ARE03								MTF via detector externo - ARE03							
Cont.	Nº Grão	N _s	ρ _s	N _i	ρ _i	t (Ma)	Desvio (±1σ)	Cont.	Nº Grão	N _s	ρ _s	N _i	ρ _i	t (Ma)	Desvio (±1σ)
1	1	20	0,46	53	0,20	83,54	22,08	33	43	63	0,60	46	0,18	120,60	23,70
--	2	--	--	--	--	--	--	34	44	33	1,53	123	0,55	103,39	20,53
2	3	41	0,66	72	0,29	84,04	16,66	35	45	73	1,11	50	0,31	131,44	24,49
3	4	38	0,53	43	0,17	119,88	26,96	36	46	51	1,03	68	0,28	137,61	25,86
4	5	38	0,46	60	0,20	84,55	17,73	37	47	44	0,60	58	0,20	113,99	23,07
--	6	--	--	--	--	--	--	38	48	40	1,49	44	0,40	139,19	30,73
5	7	26	0,99	66	0,34	109,40	25,57	39	49	62	0,66	34	0,27	90,94	19,62
--	8	--	--	--	--	--	--	--	50	--	--	--	--	--	--
6	9	20	0,57	44	0,17	126,19	34,27	40	51	31	0,87	50	0,26	125,96	29,07
7	10	25	0,87	21	0,29	110,59	32,92	41	52	30	0,52	28	0,17	116,65	30,88
8	11	27	0,72	47	0,22	121,28	29,54	42	53	45	0,91	56	0,37	92,34	18,72
9	12	25	1,05	38	0,29	133,91	34,75	43	54	66	1,08	58	0,33	121,89	22,28
10	13	70	0,44	54	0,15	111,10	20,43	44	55	60	1,04	50	0,25	152,51	29,60
11	14	39	0,78	47	0,25	117,48	25,72	45	56	12	0,69	65	0,33	78,15	24,68
12	15	54	1,00	83	0,34	109,10	19,39	46	57	74	0,84	47	0,26	123,48	23,36
13	16	42	1,11	40	0,30	136,19	30,40	--	58	--	--	--	--	--	--
--	17	--	--	--	--	--	--	47	59	40	0,58	35	0,19	115,87	27,07
14	18	228	1,60	213	0,57	105,76	10,62	48	60	60	0,56	61	0,24	87,09	16,08
15	19	26	1,12	105	0,36	117,24	25,95	--	61	--	--	--	--	--	--
--	20	--	--	--	--	--	--	49	62	53	0,77	54	0,22	128,59	25,20
--	21	--	--	--	--	--	--	50	63	23	1,02	56	0,31	122,22	30,52
16	22	23	0,39	32	0,15	100,03	27,53	51	64	23	0,77	49	0,27	105,41	26,85
17	23	65	0,54	54	0,19	107,97	20,17	52	65	78	0,95	32	0,29	120,88	25,67
--	24	--	--	--	--	--	--	53	66	81	0,67	57	0,23	107,87	18,96
--	25	--	--	--	--	--	--	--	67	--	--	--	--	--	--
18	26	64	1,10	55	0,37	111,25	20,76	54	68	59	0,78	58	0,32	90,09	16,90
19	27	86	1,14	73	0,37	115,44	18,74	55	69	23	0,79	76	0,25	117,70	28,26
20	28	54	1,39	138	0,72	71,77	11,74	56	70	26	1,02	54	0,30	126,77	30,53
21	29	96	1,28	73	0,51	94,10	14,92	57	71	31	0,65	64	0,29	83,04	18,36
22	30	19	0,75	81	0,33	85,36	21,93	--	72	--	--	--	--	--	--
23	31	46	1,05	56	0,27	143,14	28,85	--	73	--	--	--	--	--	--
--	32	--	--	--	--	--	--	58	74	91	0,75	48	0,28	98,93	17,93
24	33	74	0,72	108	0,26	103,88	16,02	59	75	19	1,13	72	0,47	91,03	23,66
25	34	105	0,77	73	0,21	135,89	21,15	60	76	55	1,60	51	0,46	130,37	25,68
26	35	55	1,66	48	0,46	133,58	26,73	61	77	38	1,11	127	0,53	79,30	14,88
27	36	55	1,00	45	0,27	135,84	27,64	62	78	44	0,69	69	0,34	74,98	14,66
28	37	45	1,06	76	0,32	122,16	23,30	63	79	50	1,18	61	0,34	130,14	25,17
29	38	41	0,86	43	0,31	105,25	23,22	64	80	53	1,01	65	0,37	101,52	19,06
30	39	92	0,76	98	0,27	106,28	15,80	--	81	--	--	--	--	--	--
--	40	--	--	--	--	--	--	65	82	71	0,65	59	0,23	103,33	18,50
31	41	29	0,78	64	0,31	94,64	21,40	--	83	--	--	--	--	--	--
32	42	27	0,61	46	0,26	87,95	21,50	66	84	31	0,99	85	0,46	80,13	17,00

Tabela 8: medidas do MDE e idades correspondentes para amostra ARE03. Esta tabela contém informações sobre a contagem, número do grão (posição na matriz), medidas de traços fosseis e induzidos, com suas respectivas densidades (10⁶/cm²) e as idades aparentes correspondentes calculadas a partir da equação da idade para o MDE. Aqui fica representado os grãos que puderam ser datados e os grãos que, por insuficiência e alguma medida, não puderam ter idades determinadas. Nesse caso o símbolo “--” informa os grãos que não selecionados para datação. Ns: número de traços fosseis; Ni: número de traços induzidos; ps: densidade de traços fosseis; t: idade aparente MDE. Fonte: o autor.

MTF via detector externo - ARE04								MTF via detector externo - ARE04							
Cont.	Nº Grão	N _s	ρ _s	N _i	ρ _i	t (Ma)	Desvio (±1σ)	Cont.	Nº Grão	N _s	ρ _s	N _i	ρ _i	t (Ma)	Desvio (±1σ)
--	1	--	--	--	--	--	--	--	36	--	--	--	--	--	--
--	2	--	--	--	--	--	--	--	37	--	--	--	--	--	--
--	3	--	--	--	--	--	--	19	38	48	1,00	57	0,29	130,83	25,97
1	4	23	1,44	108	1,08	49,94	11,58	20	39	64	1,33	116	0,29	170,90	27,16
2	5	111	3,47	117	1,17	110,72	15,09	21	40	50	1,56	146	0,37	159,27	26,58
3	6	19	1,19	42	0,42	105,63	29,40	--	41	--	--	--	--	--	--
--	7	--	--	--	--	--	--	--	42	--	--	--	--	--	--
--	8	--	--	--	--	--	--	--	43	--	--	--	--	--	--
--	9	--	--	--	--	--	--	--	44	--	--	--	--	--	--
4	10	31	1,94	299	0,75	96,90	18,54	--	45	--	--	--	--	--	--
5	11	27	0,84	81	0,20	155,07	34,81	--	46	--	--	--	--	--	--
--	12	--	--	--	--	--	--	22	47	40	0,83	82	0,21	151,33	29,58
--	13	--	--	--	--	--	--	--	48	--	--	--	--	--	--
--	14	--	--	--	--	--	--	--	49	--	--	--	--	--	--
--	15	--	--	--	--	--	--	--	50	--	--	--	--	--	--
--	16	--	--	--	--	--	--	--	51	--	--	--	--	--	--
--	17	--	--	--	--	--	--	--	52	--	--	--	--	--	--
--	18	--	--	--	--	--	--	--	53	--	--	--	--	--	--
--	19	--	--	--	--	--	--	23	54	34	1,06	31	0,62	64,23	16,08
6	20	41	1,28	30	0,37	130,59	31,65	--	55	--	--	--	--	--	--
7	21	37	0,77	68	0,17	168,58	34,85	--	56	--	--	--	--	--	--
8	22	50	1,04	53	0,27	146,39	29,23	24	57	33	1,03	137	0,34	112,43	22,09
9	23	29	0,91	89	0,22	151,63	32,78	25	58	49	1,02	81	0,20	187,15	34,39
10	24	47	1,47	53	0,53	103,55	21,01	26	59	41	0,85	50	0,25	127,43	27,15
11	25	39	1,22	83	0,21	217,53	42,79	--	60	--	--	--	--	--	--
12	26	114	2,38	255	0,64	138,83	16,25	--	61	--	--	--	--	--	--
13	27	32	1,00	61	0,61	61,46	13,56	27	62	143	2,23	167	0,56	149,45	17,68
--	28	--	--	--	--	--	--	28	63	61	1,27	53	0,27	178,16	33,93
14	29	62	1,29	89	0,89	54,44	9,17	--	64	--	--	--	--	--	--
15	30	26	0,81	29	0,29	104,68	28,47	--	65	--	--	--	--	--	--
16	31	33	1,03	57	0,57	67,79	14,98	--	66	--	--	--	--	--	--
--	32	--	--	--	--	--	--	--	67	--	--	--	--	--	--
--	33	--	--	--	--	--	--	29	68	151	4,72	272	1,36	129,39	13,76
17	34	18	1,13	77	0,19	216,47	57,09	--	69	--	--	--	--	--	--
18	35	32	1,00	51	0,17	217,86	49,62								

Tabela 9: medidas do MDE e idades correspondentes para amostra ARE04. Esta tabela contém informações sobre a contagem, número do grão (posição na matriz), medidas de traços fosseis e induzidos, com suas respectivas densidades (10%/cm²) e as idades aparentes correspondentes calculadas a partir da equação da idade para o MDE. Aqui fica representado os grãos que puderam ser datados e os grãos que, por insuficiência e alguma medida, não puderam ter idades determinadas. Nesse caso o símbolo “--” informa os grãos que não selecionados para datação. Ns: número de traços fósseis; Ni: número de traços induzidos; ps: densidade de traços fósseis; t: idade aparente MDE. Fonte: o autor.

MTF via detector externo - Durango						
Cont.	N _s	ρ _s	N _i	ρ _i	t (Ma)	Desvio (±1σ)
1	23	0,23	117	1,17	33,00	7,66
2	18	0,18	116	1,16	26,06	6,70
3	21	0,21	123	1,23	28,67	6,88
4	22	0,22	118	1,18	31,30	7,39
5	20	0,20	109	1,09	30,81	7,61
6	17	0,17	112	1,12	25,50	6,73
7	26	0,26	121	1,21	36,06	7,95
8	22	0,22	105	1,05	35,17	8,38
9	31	0,31	144	1,44	36,13	7,32
10	22	0,22	114	1,14	32,40	7,67
11	21	0,21	110	1,1	32,05	7,75
12	22	0,22	124	1,24	29,79	7,01
13	23	0,23	123	1,23	31,40	7,26
14	30	0,30	141	1,41	35,71	7,34
15	24	0,24	118	1,18	34,14	7,78
16	25	0,25	137	1,37	30,64	6,79
17	26	0,26	130	1,3	33,57	7,35
18	22	0,22	120	1,2	30,78	7,26
19	24	0,24	129	1,29	31,24	7,07
20	18	0,18	101	1,01	29,93	7,76
21	22	0,22	104	1,04	35,51	8,47
22	19	0,19	131	1,31	24,36	6,07
23	21	0,21	122	1,22	28,91	6,94
24	18	0,18	108	1,08	27,99	7,23
25	17	0,17	128	1,28	22,31	5,84
26	20	0,20	113	1,13	29,72	7,32
27	23	0,23	133	1,33	29,04	6,67
28	22	0,22	147	1,47	25,14	5,85
29	25	0,25	139	1,39	30,20	6,69
30	28	0,28	145	1,45	32,42	6,83
31	20	0,20	139	1,39	24,17	5,87
32	24	0,24	141	1,41	28,58	6,43
33	21	0,21	131	1,31	26,92	6,43
34	25	0,25	124	1,24	33,84	7,56
35	23	0,23	135	1,35	28,61	6,57
36	20	0,20	129	1,29	26,04	6,36
37	24	0,24	118	1,18	34,14	7,78
38	21	0,21	133	1,33	26,52	6,33
39	22	0,22	125	1,25	29,55	6,95
40	21	0,21	112	1,12	31,48	7,61

Tabela 10: medidas do MDE e idades correspondentes para amostra Durango. Esta tabela contém informações sobre os campos selecionados para medidas de traços fósseis e induzidos, com suas respectivas densidades (10⁶/cm²) e as idades aparentes correspondentes calculadas a partir da equação da idade para o MDE. Essas medidas foram realizadas em uma amostra Durango de grão único. Ns: número de traços fósseis; Ni: número de traços induzidos; ρs: densidade de traços fósseis; t: idade aparente MDE; σ: desvio individual. Fonte: o autor.

APÊNDICE B (MTLA EM AMOSTRAS DE APATITA)

MTF via LA-ICP-MS - ARE02						
Nº Grão	N _s	ρ _s	Uppm	E[Uppm]	t (Ma)	Desvio t (±1σ)
2	56	2,34	57,62	0,86	51,75	12,54
4	50	1,08	14,69	0,22	93,24	23,01
6	72	0,89	12,92	0,19	87,70	20,53
11	75	1,45	23,05	0,35	80,01	18,63
12	23	0,98	19,60	0,29	63,86	18,55
15	84	1,35	11,76	0,18	144,93	33,30
17	24	0,98	18,51	0,28	67,39	19,36
19	22	1,58	9,68	0,15	205,87	60,50
21	22	1,09	10,04	0,15	137,73	40,47
22	35	0,72	9,95	0,15	91,71	24,17
23	72	1,34	9,83	0,15	172,09	40,28
25	28	1,39	11,93	0,18	147,27	40,76
27	73	0,78	20,21	0,30	49,00	11,45
29	28	0,80	15,63	0,23	65,45	18,12
30	41	1,33	9,37	0,14	179,62	45,90
32	30	0,89	15,92	0,24	71,41	19,46
33	31	0,72	8,66	0,13	105,16	28,44
36	62	1,33	42,56	0,64	39,86	9,52
41	40	1,53	10,04	0,15	192,19	49,34
42	36	1,00	14,30	0,21	88,62	23,22
43	36	0,92	10,47	0,16	111,54	29,23
44	40	1,85	35,12	0,53	67,14	17,23
45	50	2,10	22,12	0,33	120,61	29,76
56	19	1,06	9,94	0,15	134,50	41,14
59	57	1,29	16,21	0,24	100,95	24,41
68	30	0,85	20,92	0,31	51,93	14,15
69	21	0,67	11,89	0,18	72,07	21,44
70	42	0,76	6,59	0,10	146,17	37,18
74	39	1,30	9,58	0,14	171,36	44,20
76	15	0,88	8,39	0,13	132,33	43,40
78	75	1,29	34,60	0,52	47,65	11,10
80	91	1,15	28,24	0,42	51,88	11,82
82	39	0,98	20,75	0,31	60,44	15,59

Tabela 11: medidas do MTLA e idades correspondentes para amostra ARE02. Esta tabela indica os grãos selecionados para ablação, densidade de traços fósseis ($10^6/\text{cm}^2$) e a quantidade de urânio em ppm. N_s: número de traços fósseis; Uppm: quantidade de urânio em partes por milhão; ρ_s: densidade de traços fósseis; E[Uppm]: desvio de Uppm t: idade aparente MTLA. Fonte: o autor.

MTF via LA-ICP-MS - ARE03						
Nº Grão	N _s	ρ _s	Uppm	E[Uppm]	t (Ma)	Desvio t (±1σ)
4	10	0,63	9,17	0,14	86,63	32,52
5	12	0,75	12,70	0,19	75,14	26,48
6	10	0,63	15,33	0,23	51,96	19,50
10	8	0,50	6,21	0,09	102,21	41,63
11	12	0,75	4,05	0,06	232,71	82,02
12	17	3,40	74,53	1,12	58,13	18,36
13	10	0,63	5,09	0,08	155,20	58,26
14	25	0,78	14,81	0,22	67,19	19,11
15	7	0,44	11,15	0,17	50,05	21,45
16	31	1,94	33,02	0,50	74,68	20,20
17	20	1,25	12,18	0,18	130,00	39,20
19	55	3,44	57,53	0,86	76,03	18,48
21	38	2,38	7,48	0,11	393,92	102,13
23	12	0,75	12,41	0,19	76,91	27,11
24	39	2,44	8,64	0,13	351,54	90,68
27	38	1,19	21,16	0,32	71,44	18,52
28	40	1,25	14,46	0,22	109,72	28,17
29	58	1,21	10,17	0,15	150,27	36,23
30	42	1,31	6,08	0,09	270,36	68,77
31	22	0,69	9,60	0,14	90,98	26,74
32	33	1,03	9,61	0,14	135,95	36,28
34	37	1,16	14,75	0,22	99,59	25,96
35	38	1,19	7,12	0,11	210,12	54,48
37	33	1,03	7,73	0,12	168,52	44,97
39	31	0,97	7,65	0,11	160,14	43,31
40	24	0,75	11,74	0,18	81,29	23,36
44	49	1,02	8,13	0,12	158,85	39,33
46	47	1,47	19,09	0,29	97,73	24,37
47	35	1,09	9,11	0,14	151,80	40,01
48	36	1,13	7,22	0,11	196,32	51,45
49	21	1,31	14,12	0,21	117,86	35,06
50	16	1,00	5,45	0,08	230,85	74,23
54	29	0,91	8,83	0,13	129,99	35,69
55	32	1,00	19,19	0,29	66,36	17,82
57	9	1,13	22,83088	0,34	62,77	24,47

Tabela 12: medidas do MTLA e idades correspondentes para amostra ARE03. Esta tabela indica os grãos selecionados para ablação, densidade de traços fósseis ($10^6/\text{cm}^2$) e a quantidade de urânio em ppm. N_s: número de traços fósseis; Uppm: quantidade de urânio em partes por milhão; ρ_s: densidade de traços fósseis; E[Uppm]: desvio de Uppm t: idade aparente MTLA. Fonte: o autor.

MTF via LA-ICP-MS - ARE04						
Nº Grão	N _s	ρ _s	Uppm	E[Uppm]	t (Ma)	Desvio t (±1σ)
4	23	1,44	12,83	0,19	141,85	41,20
5	111	3,47	20,67	0,31	211,34	47,21
6	19	1,19	11,59	0,17	129,79	39,69
9	14	0,88	146,68	2,20	7,63	2,56
10	31	1,94	65,98	0,99	37,48	10,14
11	27	0,84	17,01	0,26	63,20	17,64
12	66	1,38	15,03	0,23	116,06	27,48
14	61	1,91	37,83	0,57	64,18	15,36
20	41	1,28	8,45	0,13	191,19	48,85
21	37	0,77	7,83	0,12	124,84	32,54
22	50	1,04	11,62	0,17	113,71	28,06
23	29	0,91	11,28	0,17	102,00	28,01
24	47	1,47	51,30	0,77	36,54	9,11
25	39	1,22	8,90	0,13	173,00	44,63
26	114	2,38	65,32	0,98	46,37	10,33
27	32	1,00	17,22	0,26	73,89	19,85
29	62	1,29	20,70	0,31	79,36	18,95
30	26	0,81	11,83	0,18	87,34	24,61
31	33	1,03	16,63	0,25	78,88	21,05
32	93	1,94	54,78	0,82	45,11	10,25
34	18	1,13	21,17	0,32	67,65	21,01
35	32	1,00	12,89	0,19	98,52	26,46
38	48	1,00	17,39	0,26	73,20	18,19
39	64	1,33	17,39	0,26	97,40	23,16
40	50	1,56	23,04	0,35	86,24	21,28
47	40	0,83	10,69	0,16	99,04	25,42
48	99	2,06	11,90	0,18	218,16	49,27
54	34	1,06	17,59	0,26	76,87	20,38
57	33	1,03	15,19	0,23	86,30	23,03
58	49	1,02	14,25	0,21	91,02	22,54
59	41	0,85	10,64	0,16	101,98	26,06
62	143	2,23	12,94	0,19	217,37	47,57
63	61	1,27	10,00	0,15	160,70	38,47
68	151	4,72	116,95	1,75	51,44	11,21

Tabela 13: medidas do MTLA e idades correspondentes para amostra ARE04. Esta tabela indica os grãos selecionados para ablação, densidade de traços fósseis ($10^6/\text{cm}^2$) e a quantidade de urânio em ppm. Ns: número de traços fósseis; Uppm: quantidade de urânio em partes por milhão; ρs: densidade de traços fósseis; E[Uppm]: desvio de Uppm t: idade aparente MTLA. Fonte: o autor.

MTF via LA-ICP-MS - ARE06						
Nº Grão	N _s	ρ _s	Uppm	E[Uppm]	t (Ma)	Desvio t (±1σ)
16	38	1,19	16,07	0,24	93,89	24,34
19	61	1,27	21,71	0,33	74,48	17,83
24	59	0,92	13,88	0,21	84,43	20,31
25	45	0,94	8,50	0,13	139,67	35,09
26	97	2,02	29,69	0,45	86,55	19,59
33	44	0,92	17,65	0,26	66,15	16,69
35	10	0,63	5,47	0,08	144,66	54,30
37	9	0,56	3,21	0,05	220,61	86,01
41	30	0,94	16,48	0,25	72,41	19,73
47	23	0,72	6,38	0,10	142,69	41,45
48	25	0,78	8,07	0,12	122,71	34,90
49	28	0,88	18,67	0,28	59,72	16,53

Tabela 14: medidas do MTLA e idades correspondentes para amostra ARE06. Esta tabela indica os grãos selecionados para ablação, densidade de traços fósseis ($10^6/\text{cm}^2$) e a quantidade de urânio em ppm. N_s: número de traços fósseis; Uppm: quantidade de urânio em partes por milhão; ρ_s: densidade de traços fósseis; E[Uppm]: desvio de Uppm t: idade aparente MTLA.
Fonte: o autor.

MTF via LA-ICP-MS - ARE07						
Nº Grão	N _s	ρ _s	Uppm	E[Uppm]	t (Ma)	Desvio t (±1σ)
1	44	0,92	8,37	0,13	138,75	35,00
3	13	0,81	10,01	0,15	103,11	35,39
5	21	0,66	3,13	0,05	262,59	78,13
8	10	0,63	5,04	0,08	156,88	58,89
9	11	1,38	35,27	0,53	49,71	18,05
10	79	1,23	36,09	0,54	43,63	10,10
11	5	0,31	12,04	0,18	33,13	16,26
18	36	1,13	16,94	0,25	84,43	22,13
20	36	0,75	8,07	0,12	117,84	30,88
23	59	0,92	10,68	0,16	109,59	26,36
24	56	1,17	13,99	0,21	105,84	25,66
26	10	0,63	13,99	0,21	56,92	21,37
28	30	0,94	14,54	0,22	82,03	22,35
29	58	1,21	20,23	0,30	76,01	18,33
33	36	1,13	17,35	0,26	82,46	21,61
37	19	0,59	10,00	0,15	75,52	23,10
38	14	0,88	7,93	0,12	139,65	46,81
41	73	1,14	8,20	0,12	175,69	41,05

Tabela 15: medidas do MTLA e idades correspondentes para amostra ARE07. Esta tabela indica os grãos selecionados para ablação, densidade de traços fósseis ($10^6/\text{cm}^2$) e a quantidade de urânio em ppm. Ns: número de traços fósseis; Uppm: quantidade de urânio em partes por milhão; ps: densidade de traços fósseis; E[Uppm]: desvio de Uppm t: idade aparente MTLA. Fonte: o autor.

APÊNDICE C (MTLA EM AMOSTRAS DE ZIRCÃO)

MTF via LA-ICP-MS - ARE05						
Nº Grão	N _s	ρ _s	Uppm	E[Uppm]	t (Ma)	Desvio t (±1σ)
4	41	10,25	310,95	4,66	77,17	14,39
10	28	7,00	287,76	4,32	57,04	12,25
16	28	7,00	221,98	3,33	73,84	15,86
18	12	3,00	271,37	4,07	25,98	7,95
19	28	7,00	314,02	4,71	52,28	11,23
21	53	13,25	232,64	3,49	132,75	22,71
22	29	7,25	257,00	3,85	66,10	14,00
24	16	4,00	172,42	2,59	54,40	14,69
25	29	7,25	225,28	3,38	75,35	15,96
27	11	2,75	292,62	4,39	22,09	7,03
28	28	7,00	285,58	4,28	57,47	12,34
29	17	4,25	270,88	4,06	36,84	9,69
32	28	7,00	308,74	4,63	53,18	11,42
33	11	2,75	190,62	2,86	33,89	10,79
34	19	4,75	152,26	2,28	73,05	18,34
35	35	8,75	262,88	3,94	77,91	15,38
38	33	8,25	283,91	4,26	68,07	13,73
39	28	7,00	262,15	3,93	62,58	13,44
40	17	4,25	571,09	8,57	17,50	4,60
42	41	10,25	427,04	6,41	56,28	10,50
44	16	4,00	180,33	2,70	52,03	14,05
45	18	4,50	185,25	2,78	56,95	14,63
46	35	8,75	185,75	2,79	109,99	21,71
47	32	8,00	430,25	6,45	43,64	8,91
48	41	10,25	496,47	7,45	48,44	9,03
49	25	6,25	492,60	7,39	29,81	6,69
50	29	7,25	523,90	7,86	32,51	6,89
51	20	5,00	567,15	8,51	20,73	5,09
52	24	6,00	311,03	4,67	45,27	10,33
53	32	8,00	267,85	4,02	69,96	14,28
54	25	6,25	201,37	3,02	72,68	16,32
56	38	9,50	248,95	3,73	89,25	17,10

Tabela 16: medidas do MTLA e idades correspondentes para amostra ARE05. Esta tabela indica os grãos selecionados para ablação, densidade de traços fósseis (10⁶/cm²) e a quantidade de urânio em ppm. N_s: número de traços fósseis; Uppm: quantidade de urânio em partes por milhão; ρ_s: densidade de traços fósseis; E[Uppm]: desvio de Uppm t: idade aparente MTLA.

Fonte: o autor.

MTF via LA-ICP-MS - ARE07 (tipo zircão)						
Nº Grão	N _s	ρ _s	Uppm	E[Uppm]	t (Ma)	Desvio t (±1σ)
1	26	6,50	111,74	1,68	135,56	26,85
2	24	6,00	266,52	4,00	52,80	10,88
4	29	7,25	207,27	3,11	81,85	15,37
5	37	9,25	294,75	4,42	73,49	12,25
6	10	2,50	107,69	1,62	54,44	17,28
7	11	2,75	67,39	1,01	95,40	28,88
8	20	5,00	183,56	2,75	63,83	14,38
9	35	8,75	293,11	4,40	69,92	11,98
10	10	2,50	59,15	0,89	98,77	31,35
11	19	4,75	170,76	2,56	65,18	15,06
12	27	6,75	326,84	4,90	48,45	9,42
13	13	3,25	59,92	0,90	126,47	35,25
14	31	7,75	224,01	3,36	80,97	14,71
15	18	4,50	171,80	2,58	61,39	14,57
16	35	8,75	350,41	5,26	58,54	10,03
18	35	8,75	233,44	3,50	87,67	15,02
20	29	7,25	170,25	2,55	99,52	18,68
21	30	7,50	224,57	3,37	78,18	14,43
22	49	12,25	214,03	3,21	133,40	19,41
24	31	7,75	213,49	3,20	84,93	15,43
25	25	6,25	201,46	3,02	72,65	14,67
28	31	7,75	132,67	1,99	136,12	24,73
29	26	6,50	368,76	5,53	41,38	8,19
31	30	7,50	258,60	3,88	67,94	12,54
32	14	3,50	103,25	1,55	79,34	21,32
33	20	5,00	89,92	1,35	129,64	29,21
35	22	5,50	140,50	2,11	91,54	19,68
36	22	5,50	187,74	2,82	68,62	14,75
37	30	7,50	214,54	3,22	81,80	15,10
38	28	7,00	316,26	4,74	51,92	9,92
39	29	7,25	132,36	1,99	127,72	23,98
40	25	6,25	129,28	1,94	112,86	22,79
41	26	6,50	128,80	1,93	117,76	23,32
42	36	9,00	247,03	3,71	85,23	14,40
43	14	3,50	101,79	1,53	80,47	21,62
44	28	7,00	286,47	4,30	57,29	10,94
46	29	7,25	185,82	2,79	91,23	17,13
47	28	7,00	348,80	5,23	47,09	8,99

Tabela 17: medidas do MTLA e idades correspondentes para amostra ARE07 tipo zircão. Esta tabela indica os grãos selecionados para ablação, densidade de traços fósseis ($10^6/\text{cm}^2$) e a quantidade de urânio em ppm. N_s: número de traços fósseis; Uppm: quantidade de urânio em partes por milhão; ρ_s: densidade de traços fósseis; E[Uppm]: desvio de Uppm; t: idade aparente MTLA. Fonte: o autor.

MTF via LA-ICP-MS - ARE14						
Nº Grão	N _s	ρ _s	Uppm	E[Uppm]	t (Ma)	Desvio t (±1σ)
3	57	14,25	189,13	2,84	175,04	23,68
4	65	16,25	121,14	1,82	308,42	39,19
23	70	17,50	78,85	1,18	502,58	61,65
25	57	14,25	89,45	1,34	364,67	49,34
26	50	12,50	210,71	3,16	138,21	19,91
27	31	7,75	49,64	0,74	357,60	64,98
32	48	12,00	136,04	2,04	204,46	30,04
38	85	21,25	168,71	2,53	290,01	32,46
40	49	12,25	80,09	1,20	350,49	50,99
41	50	12,50	133,38	2,00	217,01	31,27
44	62	15,50	91,81	1,38	385,81	50,14
51	55	13,75	138,35	2,08	229,90	31,64
55	60	15,00	151,11	2,27	229,64	30,31
56	32	8,00	89,50	1,34	207,14	37,06
58	65	16,25	138,19	2,07	271,14	34,45
67	66	16,50	79,09	1,19	473,48	59,73
68	40	10,00	143,46	2,15	162,10	26,02
77	55	13,75	105,80	1,59	299,03	41,16
79	36	9,00	239,51	3,59	87,89	14,85
85	90	22,50	134,17	2,01	383,31	41,76
86	48	12,00	94,32	1,41	292,86	43,03
87	73	18,25	123,68	1,86	338,47	40,70
93	88	22,00	147,86	2,22	341,20	37,57
96	72	18,00	171,88	2,58	242,02	29,29
97	100	25,00	168,29	2,52	340,67	35,34
101	36	9,00	45,87	0,69	446,22	75,38
108	90	22,50	59,06	0,89	840,01	91,52
111	62	15,50	74,48	1,12	472,37	61,39

Tabela 18: medidas do MTLA e idades correspondentes para amostra ARE14. Esta tabela indica os grãos selecionados para ablação, densidade de traços fósseis ($10^6/\text{cm}^2$) e a quantidade de urânio em ppm. N_s: número de traços fósseis; Uppm: quantidade de urânio em partes por milhão; ρ_s: densidade de traços fósseis; E[Uppm]: desvio de Uppm t: idade aparente MTLA.

Fonte: o autor.

MTF via LA-ICP-MS - ARE17						
Nº Grão	N _s	ρ _s	Uppm	E[Uppm]	t (Ma)	Desvio t (±1σ)
1	75	18,75	77,40	1,16	546,62	64,89
4	72	18,00	137,87	2,07	300,37	36,35
5	78	19,50	213,69	3,21	211,40	24,64
6	75	18,75	113,38	1,70	378,14	44,89
7	53	13,25	135,84	2,04	225,72	31,62
9	50	12,50	49,46	0,74	569,34	82,03
11	100	25,00	78,95	1,18	705,68	73,20
15	91	22,75	117,71	1,77	439,81	47,67
20	100	25,00	203,70	3,06	282,73	29,33
21	80	20,00	209,91	3,15	220,57	25,40
22	22	5,50	37,03	0,56	340,59	73,22
24	64	16,00	140,86	2,11	262,10	33,55
29	48	12,00	156,99	2,35	177,54	26,09
30	52	13,00	65,66	0,98	450,17	63,65
31	80	20,00	129,35	1,94	354,22	40,79
33	74	18,50	174,56	2,62	244,88	29,26
34	75	18,75	173,54	2,60	249,55	29,63
35	57	14,25	149,38	2,24	220,83	29,88
36	70	17,50	204,10	3,06	198,82	24,39
37	73	18,25	80,20	1,20	514,78	61,90
38	88	22,00	139,70	2,10	360,58	39,70
44	47	11,75	55,23	0,83	482,53	71,63
46	64	16,00	92,26	1,38	395,98	50,69
47	64	16,00	101,63	1,52	360,50	46,15
55	66	16,50	203,62	3,05	188,06	23,72
57	66	16,50	219,74	3,30	174,45	22,01
64	100	25,00	114,81	1,72	493,41	51,18
65	76	19,00	151,02	2,27	289,68	34,17
66	98	24,50	498,49	7,48	114,72	12,01
67	77	19,25	73,73	1,11	587,31	68,86
78	75	18,75	103,38	1,55	413,57	49,10
74	78	19,50	113,39	1,70	392,80	45,77
77	52	13,00	86,92	1,30	342,92	48,48
78	74	18,50	85,03	1,28	493,04	58,90
80	44	11,00	166,99	2,50	153,29	23,49
81	69	17,25	71,61	1,07	543,67	67,14
86	48	12,00	71,61	1,07	383,05	56,29

Tabela 19: medidas do MTLA e idades correspondentes para amostra ARE17. Esta tabela indica os grãos seleccionados para ablação, densidade de traços fósseis ($10^6/\text{cm}^2$) e a quantidade de urânio em ppm. Ns: número de traços fósseis; Uppm: quantidade de urânio em partes por milhão; ρs: densidade de traços fósseis; E[Uppm]: desvio de Uppm t: idade aparente MTLA. Fonte: o autor.

APÊNDICE D (U-Pb EM AMOSTRAS DE ZIRCÃO)

Razões Isotópicas U-Pb - ARE05					Idades 75, 68, 76 e Conc. - ARE05								
Nº Grão	238/206	E[238/206]	207/206	E[207/206]	Nº Grão	t.75	E[t.75]	t.68	E[t.68]	t.76	E[t.76]	t.conc	E[t.conc]
4	49,971	0,750	0,0977	0,00147	4,00	242,29	8,96	127,73	3,72	1580,11	55,00	102,62	3,39
10	35,851	0,538	0,0365	0,00055	10,00	133,42	5,20	177,35	5,14	0,00	55,61	154,49	4,61
16	36,871	0,553	0,0564	0,00085	16,00	194,17	7,35	172,51	5,00	466,36	65,12	171,31	5,04
18	37,742	0,566	0,0579	0,00087	18,00	194,88	7,37	168,58	4,89	526,64	64,45	166,47	4,92
19	33,060	0,496	0,0347	0,00052	19,00	137,04	5,33	192,10	5,56	0,00	52,78	158,29	4,82
21	26,225	0,393	0,0455	0,00068	21,00	217,53	8,14	241,24	6,96	0,00	69,22	234,87	6,70
22	33,571	0,504	0,0618	0,00093	22,00	229,69	8,55	189,22	5,48	667,37	62,94	184,56	5,51
24	32,965	0,494	0,0491	0,00074	24,00	189,50	7,19	192,65	5,58	150,51	68,90	192,30	5,54
25	35,756	0,536	0,0562	0,00084	25,00	199,00	7,51	177,82	5,16	458,20	65,21	176,79	5,19
27	28,782	0,432	0,0813	0,00122	27,00	333,75	11,83	220,17	6,36	1227,09	57,73	195,55	6,18
28	36,347	0,545	0,0632	0,00095	28,00	218,24	8,16	174,96	5,07	715,31	62,45	169,08	5,08
29	30,661	0,460	0,0348	0,00052	29,00	147,42	5,71	206,89	5,99	0,00	52,93	169,72	5,15
32	30,701	0,461	0,0534	0,00080	32,00	218,04	8,16	206,62	5,98	343,17	66,54	206,92	6,01
33	31,960	0,479	0,0434	0,00065	33,00	174,05	6,65	198,61	5,75	0,00	66,02	191,57	5,51
34	31,087	0,466	0,0513	0,00077	34,00	208,00	7,82	204,10	5,91	252,41	67,63	204,37	5,90
35	33,791	0,507	0,0461	0,00069	35,00	174,94	6,68	188,01	5,45	1,81	70,84	185,56	5,34
38	34,038	0,511	0,0747	0,00112	38,00	268,39	9,81	186,66	5,41	1060,16	59,16	170,23	5,29
38b	39,226	0,588	0,0273	0,00041	38b	93,03	3,70	162,28	4,71	0,00	41,58	99,92	3,54
39	38,194	0,573	0,0807	0,00121	39,00	259,36	9,52	166,61	4,84	1212,11	57,86	146,46	4,63
40	33,399	0,501	0,0577	0,00087	40,00	216,84	8,12	190,18	5,51	517,12	64,55	188,51	5,55
41	34,064	0,511	0,1650	0,00248	41,00	519,35	16,90	186,52	5,40	2507,30	49,45	126,02	4,53
42	35,888	0,538	0,0504	0,00076	42,00	179,59	6,84	177,17	5,14	211,57	68,13	177,32	5,13
44	35,469	0,532	0,0587	0,00088	44,00	208,66	7,84	179,23	5,20	555,52	64,13	176,77	5,23
45	33,900	0,509	0,0544	0,00082	45,00	203,03	7,65	187,41	5,43	388,50	66,01	187,23	5,47
45b	37,091	0,556	0,0585	0,00088	45b	199,79	7,54	171,50	4,98	548,39	64,21	169,07	5,00
46	35,196	0,528	0,0506	0,00076	46,00	183,40	6,98	180,60	5,24	219,59	68,03	180,78	5,23
47	36,519	0,548	0,0497	0,00075	47,00	174,62	6,67	174,15	5,05	181,08	68,51	174,18	5,04
48	31,914	0,479	0,0646	0,00097	48,00	249,86	9,21	198,89	5,76	760,54	61,99	191,87	5,77
49	33,201	0,498	0,0561	0,00084	49,00	212,71	7,98	191,30	5,54	456,99	65,22	190,49	5,58
49b	28,177	0,423	0,0469	0,00070	49b	209,65	7,88	224,81	6,50	42,48	70,30	221,69	6,34
50	34,304	0,515	0,0796	0,00119	50,00	281,63	10,23	185,23	5,37	1185,33	58,08	164,53	5,18
50b	29,147	0,437	0,0698	0,00105	50b	289,59	10,48	217,46	6,29	921,49	60,43	205,17	6,27
51	35,582	0,534	0,0341	0,00051	51,00	126,10	4,93	178,67	5,18	0,00	51,98	145,93	4,48
52	43,638	0,655	0,0545	0,00082	52,00	161,22	6,20	146,06	4,25	390,24	65,99	145,38	4,27
53	35,162	0,527	0,0404	0,00061	53,00	149,25	5,77	180,78	5,24	0,00	61,51	169,09	4,92
54	32,895	0,493	0,0605	0,00091	54,00	229,53	8,54	193,05	5,59	621,98	63,42	189,46	5,63
56	32,483	0,487	0,0533	0,00080	56,00	207,06	7,79	195,46	5,66	341,25	66,56	195,66	5,69
56b	31,345	0,470	0,0474	0,00071	56b	192,17	7,28	202,45	5,86	67,67	69,97	200,74	5,77

Tabela 20: razões isotópicas (à esquerda) 238/206 e 207/206 e idades (à direita) 75, 76, 68 e de Concórdia da amostra ARE05. Grãos com números acompanhados da letra “b” indica uma segunda ablação no mesmo grão.

Razões Isotópicas U-Pb – ARE07					Idades 75, 68, 76 e Conc. U-Pb - ARE07								
Nº Grão	238/206	E[238/206]	207/206	E[207/206]	Nº Grão	t.75	E[t.75]	t.68	E[t.68]	t.76	E[t.76]	t.conc	E[t.conc]
1	35,39	0,53	0,046	0,00069	1	167,67	6,43	179,64	5,21	1,80702	70,84	177,52	5,11
1b	31,60	0,47	0,048	0,00071	1b	191,27	7,25	200,85	5,81	74,66002	69,87	199,31	5,73
2	37,12	0,56	0,044	0,00067	2	154,79	5,97	171,35	4,97	0,00015	67,54	167,68	4,84
4	33,56	0,50	0,050	0,00075	4	189,73	7,20	189,27	5,48	195,48536	68,33	189,30	5,47
5	35,72	0,54	0,049	0,00074	5	176,41	6,73	178,00	5,16	155,09903	68,84	177,85	5,14
6	37,55	0,56	0,055	0,00083	6	188,13	7,14	169,43	4,92	429,81281	65,53	168,63	4,95
7	38,71	0,58	0,045	0,00067	7	150,39	5,81	164,43	4,77	0,00015	68,26	161,64	4,67
8	37,61	0,56	0,051	0,00076	8	173,83	6,64	169,18	4,91	237,58461	67,81	169,38	4,92
9	37,83	0,57	0,053	0,00079	9	178,00	6,79	168,21	4,88	310,07395	66,93	168,28	4,90
10	37,93	0,57	0,067	0,00101	10	221,70	8,28	167,74	4,87	841,91121	61,19	158,65	4,83
11	36,85	0,55	0,048	0,00072	11	167,13	6,41	172,61	5,01	90,26243	69,67	171,95	4,96
11b	34,32	0,51	0,016	0,00023	11b	61,74	2,49	185,13	5,37	0,00015	23,77	36,89	2,37
12	35,74	0,54	0,051	0,00077	12	182,49	6,94	177,91	5,16	242,25285	67,75	178,13	5,16
13	37,82	0,57	0,038	0,00058	13	133,26	5,19	168,25	4,88	0,00015	58,59	153,20	4,51
14	34,96	0,52	0,057	0,00085	14	205,25	7,73	181,79	5,27	484,08568	64,92	180,48	5,31
15	30,67	0,46	0,048	0,00073	15	199,95	7,55	206,82	5,98	119,71635	69,29	205,85	5,92
16	37,37	0,56	0,052	0,00079	16	179,21	6,83	170,21	4,94	299,65038	67,05	170,34	4,96
18	37,79	0,57	0,057	0,00086	18	192,31	7,28	168,38	4,89	497,23468	64,77	166,71	4,92
20	37,69	0,57	0,055	0,00083	20	187,44	7,12	168,82	4,90	428,99574	65,54	168,02	4,93
21	33,48	0,50	0,056	0,00084	21	211,74	7,95	189,71	5,50	464,43682	65,14	188,79	5,54
22	36,19	0,54	0,057	0,00085	22	199,01	7,51	175,73	5,10	484,70888	64,91	174,33	5,13
24	36,39	0,55	0,045	0,00068	24	161,06	6,19	174,76	5,07	0,00015	69,10	172,11	4,96
25	36,48	0,55	0,036	0,00054	25	128,39	5,01	174,32	5,06	0,00015	54,32	148,95	4,49
28	36,94	0,55	0,060	0,00090	28	204,89	7,71	172,20	5,00	599,91748	63,65	168,83	5,02
29	26,67	0,40	0,056	0,00083	29	256,38	9,42	237,25	6,85	435,18252	65,47	237,42	6,90
31	34,93	0,52	0,047	0,00070	31	171,50	6,56	181,97	5,27	29,47418	70,47	180,24	5,19
32	36,30	0,54	0,049	0,00074	32	174,00	6,65	175,19	5,08	157,86120	68,80	175,09	5,06
33	36,11	0,54	0,036	0,00054	33	131,06	5,11	176,11	5,11	0,00015	54,95	151,92	4,56
33b	36,99	0,55	0,041	0,00061	33b	143,97	5,58	171,97	4,99	0,00015	62,25	162,40	4,72
35	35,56	0,53	0,051	0,00076	35	182,38	6,94	178,80	5,18	229,00221	67,91	179,00	5,19
36	37,22	0,56	0,056	0,00083	36	190,23	7,21	170,93	4,96	436,99854	65,45	170,07	4,99
37	35,67	0,53	0,052	0,00078	37	186,37	7,08	178,26	5,17	290,44163	67,16	178,46	5,19
38	38,74	0,58	0,054	0,00081	38	178,66	6,81	164,31	4,77	373,07950	66,18	163,97	4,80
39	37,35	0,56	0,051	0,00076	39	173,61	6,63	170,35	4,94	218,23682	68,05	170,52	4,94
40	39,58	0,59	0,044	0,00066	40	144,08	5,58	160,84	4,67	0,00015	66,67	157,02	4,54
41	34,57	0,52	0,050	0,00076	41	185,75	7,06	183,82	5,33	210,30435	68,14	183,95	5,32
42	35,27	0,53	0,053	0,00079	42	189,73	7,20	180,21	5,22	309,84852	66,93	180,38	5,25
42b	34,72	0,52	0,050	0,00074	42b	182,24	6,94	183,02	5,31	172,11818	68,62	182,96	5,29
43	35,36	0,53	0,066	0,00099	43	232,26	8,63	179,76	5,21	803,76728	61,56	171,56	5,19
44	38,93	0,58	0,043	0,00064	44	143,25	5,56	163,49	4,75	0,00015	65,17	158,16	4,58
46	36,24	0,54	0,047	0,00071	46	167,70	6,43	175,46	5,09	59,57193	70,07	174,37	5,03
47	34,53	0,52	0,044	0,00066	47	164,69	6,32	184,04	5,33	0,00015	67,17	179,32	5,17
47b	40,46	0,61	0,056	0,00084	47b	177,65	6,78	157,39	4,57	456,62419	65,23	156,13	4,60

Tabela 21: razões isotópicas (à esquerda) 238/206 e 207/206 e idades (à direita) 75, 76, 68 e de Concórdia da amostra ARE07. Grãos com números acompanhados da letra “b” indica uma segunda ablação no mesmo grão. Fonte: o autor.

Razões Isotópicas U-Pb - ARE14					Idades 75, 68, 76 e Conc. U-Pb - ARE14								
Nº Grão	238/206	E[238/206]	207/206	E[207/206]	Nº Grão	t.75	E[t.75]	t.68	E[t.68]	t.76	E[t.76]	t.conc	E[t.conc]
3	9,95	0,15	0,05968	0,00090	3	611,86	19,11	617,54	17,31	590,87	63,75	615,61	16,59
4	5,87	0,09	0,07051	0,00106	4	991,51	26,32	1013,95	27,58	942,18	60,24	1000,55	24,41
23	32,86	0,49	0,04624	0,00069	23	179,98	6,86	193,27	5,6	8,84	70,75	190,76	5,48
23b	32,62	0,49	0,05255	0,00079	23b	203,58	7,67	194,65	5,64	308,36	66,95	194,93	5,66
25	11,56	0,17	0,06003	0,00090	25	548,32	17,62	535,04	15,09	603,86	63,61	538,11	14,91
25b	12,18	0,18	0,05173	0,00078	25b	467,83	15,59	508,62	14,38	272,34	67,38	492,11	13,33
26	25,92	0,39	0,05322	0,00080	26	252,99	9,31	243,98	7,04	337,36	66,6	244,56	7,06
27	4,90	0,07	0,08038	0,00121	27	1200,22	29,27	1197,29	32,12	1205,51	57,91	1199,21	28,19
32	8,84	0,13	0,06863	0,00103	32	738,94	21,83	691,15	19,27	886,62	60,76	702,48	19,38
38	3,10	0,05	0,11631	0,00174	38	1848,16	35,38	1802,94	46,24	1899,45	52,85	1843,58	36,19
40	12,30	0,18	0,05978	0,00090	40	520,53	16,93	503,77	14,25	594,74	63,71	507,11	14,16
41	6,38	0,10	0,07206	0,00108	41	953,45	25,71	939,05	25,69	986,84	59,83	946,04	24,03
44	6,08	0,09	0,07362	0,00110	44	996,4	26,39	981,1	26,76	1030,22	59,43	988,9	24,86
51	11,57	0,17	0,05745	0,00086	51	529,34	17,15	534,33	15,08	507,9	64,65	532,88	14,6
55	10,09	0,15	0,06185	0,00093	55	621,69	19,33	609,06	17,09	667,95	62,94	612,6	16,73
56	5,94	0,09	0,07622	0,00114	56	1033,83	26,97	1002,86	27,3	1099,94	58,81	1018,13	25,72
58	6,83	0,10	0,07388	0,00111	58	926,79	25,27	881,04	24,21	1037,29	59,37	898,38	23,69
67	19,98	0,30	0,05559	0,00083	67	329,53	11,7	314,76	9,03	435,2	65,47	315,98	9,07
68	12,01	0,18	0,06072	0,00091	68	537	17,34	515,7	14,57	628,53	63,35	519,78	14,53
77	3,21	0,05	0,11637	0,00175	77	1819,84	35,18	1750,33	45,06	1900,36	52,84	1810,29	36,55
79	24,74	0,37	0,05584	0,00084	79	275,02	10,02	255,46	7,36	444,94	65,36	255,86	7,42
79b	24,68	0,37	0,05486	0,00082	79b	271,38	9,9	256,09	7,38	405,46	65,81	256,71	7,43
85	2,34	0,04	0,19049	0,00286	85	2541,47	38,76	2293,69	56,74	2745,64	48,34	2540,26	43,49
86	9,32	0,14	0,06155	0,00092	86	657	20,11	656,83	18,36	657,58	63,04	656,89	17,63
87	10,95	0,16	0,05953	0,00089	87	567,83	18,08	563,45	15,86	585,43	63,81	564,66	15,47
93	12,41	0,19	0,06041	0,00091	93	521,36	16,95	499,71	14,14	617,35	63,47	503,61	14,12
96	5,94	0,09	0,10621	0,00159	96	1261,73	30,03	1003,21	27,31	1734,45	53,92	1002,08	31,39
97	2,20	0,03	0,16363	0,00245	97	2456,58	38,46	2413,11	59,18	2492,77	49,52	2459,65	38,82
101	1,93	0,03	0,18820	0,00282	101	2709,17	39,29	2687,01	64,6	2725,74	48,42	2711,77	39,07
108	7,01	0,11	0,06900	0,00103	108	870,11	24,3	859,31	23,65	897,72	60,66	864,1	22,33
108b	7,32	0,11	0,07061	0,00106	108b	858,93	24,1	825,85	22,79	945,3	60,21	838,1	22,18
111	4,44	0,07	0,09235	0,00139	111	1372,64	31,29	1308,56	34,82	1473,81	55,78	1349,21	31,83

Tabela 22: razões isotópicas (à esquerda) 238/206 e 207/206 e idades (à direita) 75, 76, 68 e de Concórdia da amostra ARE14. Grãos com números acompanhados da letra “b” indica uma segunda ablação no mesmo grão. Fonte: o autor.

Razões Isotópicas U-Pb - ARE17					Idades 75, 68, 76 e Conc. U-Pb - ARE17								
Nº Grão	238/206	E[238/206]	207/206	E[207/206]	Nº Grão	t.75	E[t.75]	t.68	E[t.68]	t.76	E[t.76]	t.conc	E[t.conc]
1	6,27	0,09	0,070	0,0011	1	950,42	25,66	954,20	26,08	941,66	60,24	952,19	23,82
1b	5,59	0,08	0,070	0,0010	1b	1017,55	26,72	1060,15	28,74	926,99	60,38	1032,35	24,68
4	10,93	0,16	0,063	0,0010	4	596,77	18,76	564,55	15,89	721,19	62,39	570,70	15,94
5	5,81	0,09	0,076	0,0011	5	1045,73	27,14	1023,75	27,83	1091,92	58,88	1035,25	25,84
6	6,55	0,10	0,077	0,0012	6	978,07	26,10	916,49	25,12	1119,04	58,65	939,21	24,87
7	5,45	0,08	0,079	0,0012	7	1111,74	28,09	1086,17	29,39	1162,10	58,28	1100,38	27,06
9	14,87	0,22	0,058	0,0009	9	437,77	14,79	419,69	11,95	534,05	64,37	422,20	11,96
11	11,28	0,17	0,064	0,0010	11	589,55	18,59	547,44	15,43	755,16	62,05	553,71	15,63
15	8,40	0,13	0,067	0,0010	15	756,63	22,18	724,89	20,16	851,62	61,10	734,54	19,87
15b	10,23	0,15	0,061	0,0009	15b	610,91	19,09	601,28	16,88	646,79	63,16	604,02	16,49
20	13,30	0,20	0,059	0,0009	20	485,61	16,05	467,34	13,25	572,80	63,94	470,44	13,23
21	6,84	0,10	0,069	0,0010	21	888,75	24,62	879,22	24,16	912,52	60,52	883,59	22,70
22	5,53	0,08	0,085	0,0013	22	1151,92	28,64	1072,10	29,04	1305,40	57,09	1107,70	28,55
24	26,69	0,40	0,056	0,0008	24	259,82	9,53	237,12	6,84	469,94	65,08	236,96	6,91
29	6,59	0,10	0,070	0,0010	29	914,90	25,07	911,16	24,98	923,93	60,41	912,99	23,19
30	10,15	0,15	0,061	0,0009	30	615,67	19,19	605,60	16,99	652,88	63,09	608,48	16,60
31	12,63	0,19	0,058	0,0009	31	495,87	16,31	491,32	13,91	516,95	64,55	492,38	13,67
33	12,62	0,19	0,066	0,0010	33	548,63	17,62	491,77	13,92	792,33	61,68	495,43	14,28
34	11,22	0,17	0,065	0,0010	34	596,35	18,75	550,45	15,51	775,03	61,85	556,86	15,76
35	31,67	0,48	0,075	0,0011	35	288,05	10,43	200,41	5,80	1077,61	59,01	182,75	5,68
36	27,83	0,42	0,045	0,0007	36	203,07	7,65	227,60	6,57	0,00	68,06	220,81	6,32
37	10,53	0,16	0,062	0,0009	37	601,12	18,86	584,78	16,44	663,22	62,99	588,92	16,20
38	6,15	0,09	0,079	0,0012	38	1037,07	27,01	971,01	26,50	1179,07	58,13	997,40	26,14
44	2,75	0,04	0,130	0,0020	44	2047,85	36,60	1998,00	50,51	2098,42	51,64	2046,09	37,47
46	13,66	0,20	0,058	0,0009	46	465,54	15,53	455,37	12,93	516,04	64,56	457,31	12,81
47	5,83	0,09	0,075	0,0011	47	1038,66	27,04	1020,76	27,75	1076,52	59,02	1030,23	25,67
48	3,94	0,06	0,090	0,0014	48	1445,25	32,05	1457,43	38,35	1427,37	56,13	1447,71	31,27
53	4,39	0,07	0,084	0,0013	53	1311,08	30,61	1321,76	35,13	1293,64	57,19	1313,91	29,59
55	10,45	0,16	0,065	0,0010	55	629,01	19,49	589,13	16,55	775,14	61,85	596,52	16,68
57	27,94	0,42	0,053	0,0008	57	235,93	8,75	226,66	6,55	329,32	66,70	227,13	6,57
64	5,34	0,08	0,077	0,0011	64	1108,35	28,04	1106,98	29,90	1111,03	58,72	1107,81	26,69
65	7,09	0,11	0,071	0,0011	65	879,35	24,46	850,37	23,42	953,00	60,14	861,86	22,61
66	10,62	0,16	0,063	0,0010	66	609,62	19,06	580,27	16,31	720,26	62,40	586,44	16,30
67	5,47	0,08	0,081	0,0012	67	1130,92	28,36	1081,93	29,28	1226,23	57,74	1106,98	27,72
78	12,26	0,18	0,060	0,0009	78	525,13	17,05	505,61	14,30	610,94	63,54	509,34	14,24
74	2,69	0,04	0,125	0,0019	74	2027,98	36,49	2034,77	51,30	2021,08	52,10	2028,01	36,38
77	4,24	0,06	0,106	0,0016	77	1515,85	32,73	1364,10	36,14	1734,74	53,92	1446,15	36,20
78	6,83	0,10	0,069	0,0010	78	889,72	24,64	881,14	24,21	911,09	60,53	885,10	22,72
80	6,81	0,10	0,072	0,0011	80	910,59	25,00	883,29	24,27	977,41	59,91	894,82	23,25
81	5,37	0,08	0,086	0,0013	81	1178,75	28,99	1100,00	29,73	1326,33	56,92	1136,90	29,03
86	7,10	0,11	0,070	0,0010	86	867,75	24,26	849,87	23,41	913,70	60,50	857,41	22,31

Tabela 23: razões isotópicas (à esquerda) 238/206 e 207/206 e idades (à direita) 75, 76, 68 e de Concórdia da amostra ARE17. Grãos com números acompanhados da letra “b” indica uma segunda ablação no mesmo grão. Fonte: o autor.