

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Termocronologia De Baixa Temperatura Aplicada À Zona De Cisalhamento Além  
Paraíba, Faixa Ribeira**

Trabalho de Formatura 24/28

JULIANA DE FÁTIMA GOMES PINHO

SÃO PAULO  
2024

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Termocronologia de Baixa Temperatura Aplicada à Zona de Cisalhamento Além  
Paraíba, Faixa Ribeira**

**JULIANA DE FÁTIMA GOMES PINHO**

Monografia apresentada à Comissão de Trabalho de Formatura (CTF) por meio da disciplina 0440500 - Trabalho de Formatura (2024) sob a orientação de:

Prof. Dr. Mauricio Parra Amézquita (Orientador)  
- Departamento de Mineralogia e Geotectônica (GMG) do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo (IGc-USP)

Prof. Dr. Marcos Egydio da Silva (Coorientador)  
- Departamento de Mineralogia e Geotectônica (GMG) do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo (IGc-USP)

SÃO PAULO  
2024

Dedico este trabalho aos meus pais, ao meu irmão, aos meus avós e ao Jhonny, com todo o meu amor e gratidão.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus e N. Sra. de Fátima, que sempre me guardaram e iluminaram meu caminho.

Agradeço aos meus pais, Regina e Rogério, vocês são minha base e inspiração, me ensinaram sobre amor, gentileza, perseverança e dedicação. Obrigada por me apoiarem em todas as minhas escolhas. Amo vocês.

Ao meu orientador, Maurício, muito obrigada pela oportunidade de aprender sobre o mundo da termocronologia. Agradeço imensamente a oportunidade de entrar no universo da pesquisa e pelo imenso conhecimento que adquiri com você ao longo destes 3 anos.

Ao meu coorientador, Marcos, agradeço pela possibilidade de trabalhar em um local tão lindo como a ZCAP. Obrigada pela companhia, conversas e todo o conhecimento passado ao longo dos trabalhos em toda a graduação.

Agradeço ao Laboratório de Termocronologia de Baixa Temperatura (CPGeo-LTC) do Instituto de Geociências (IGc) pelo espaço e equipamentos disponibilizados para as etapas de processamento de amostras e aquisição de dados AFT.

Agradeço ao Núcleo de Apoio à Pesquisa Geoanalítica do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, em especial ao técnico Vinícius, que auxiliou na aquisição dos dados de química mineral através do LA-ICP-MS.

Agradeço ao Dr. Cleber Soares, da Chronuscamp Research, pelo auxílio na aquisição e processamento dos dados LA-ICP-MS no Laboratório de Geoanalítica.

Em especial, agradeço às alunas de pós-graduação Ana Maria e Marlene, obrigada pela ajuda e companhia, em especial nessa reta final da minha graduação.

Ao meu irmão, Gui, obrigada pelos ótimos momentos de descontração, pelos filmes e pelas jogatinas. A minha irmã canina, Cacau, obrigada por alegrar os meus dias.

Aos meus avós, Ilda, Antônio e Rogério (*in memoriam*), agradeço por todos os momentos em família, almoços e risadas.

Ao meu amor, Jhonny, agradeço pelo companheirismo e suporte nestes últimos três anos. Obrigada por me animar quando eu estava desesperada, sempre estar ao meu lado e me mostrar que nada é impossível. Te amo.

Aos meus amigos: Dex, Grito, Zé, Xands, Brulée e Felipe; com vocês tenho as melhores lembranças. Agradeço por me acolherem e por todos os momentos que dividimos ao longo destes anos. Aos meus colegas de turma, obrigada pelas viagens de campo e trabalhos. A minha melhor amiga, Letícia, obrigada por me acompanhar e apoiar.

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo pelo auxílio financeiro disponibilizado através do projeto 2021/13819-4, que possibilitou minha entrada e especialização na área da termocronologia. Agradeço, também, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo apoio financeiro disponibilizado através da bolsa PIBIC, que possibilitou o desenvolvimento deste trabalho.



“A flecha não conhece o seu destino, mas o arqueiro sabe exatamente onde quer que ela chegue.”

*(H. Jackson Brown Jr.)*

## RESUMO

Pinho, J.F.G., 2024, Termocronologia de Baixa Temperatura Aplicada à Zona de Cisalhamento Além Paraíba, Faixa Ribeira [Trabalho de Conclusão de Curso], São Paulo, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 50 p.

A Zona de Cisalhamento Além Paraíba (ZCAP) é uma faixa tectônica dominada por milonitos, com cerca de 200 km de comprimento, até 5 km de largura e orientação ENE-WSW. Ela está situada na porção central da Faixa Ribeira e se formou no contexto tectônico do Orógeno Ribeira, durante as colisões associadas ao Ciclo Brasileiro. Embora a região tenha sido estudada desde 1975, a maioria das pesquisas geocronológicas focou no período de pico metamórfico e na idade de ativação da falha, deixando lacunas temporais na compreensão da evolução térmica mais recente. Neste estudo, foram empregados métodos de termocronologia de baixa temperatura, especificamente a técnica de traços de fissão em apatita, com o objetivo de identificar a história térmica abaixo de 120 °C. Foram determinadas idades TFA para cinco amostras: um Granada-Biotita Gnaiss milonítico (ALP-02) com idade  $41,8 \pm 2,4$  Ma; um Biotita-Plagioclásio Gnaiss (ALP-03) com idade  $37,6 \pm 3,8$  Ma; um Biotita-Plagioclásio Gnaiss tonalítico (ALP-04) com idade  $42,1 \pm 2,7$  Ma; um Milonito de composição granítica (ALP-06) com idade  $43,1 \pm 2,1$ ; e um Granada-Biotita Gnaiss granulítico (ALP-09) com idade  $53,8 \pm 2,5$  Ma. A distribuição espacial das amostras revelou informações importantes sobre a exumação da ZCAP. A amostra ALP-04, localizada no centro da zona de cisalhamento, e a ALP-09, situada no bloco sudeste, juntamente com as outras amostras no bloco noroeste, permitiram inferir que houve uma reativação da componente inversa da ZCAP. Essa reativação gerou um soerguimento diferencial entre os blocos da falha, com uma diferença temporal de aproximadamente 10 Ma, sendo que o bloco noroeste sofreu um soerguimento mais rápido. A história térmica reconstruída indicou um resfriamento entre 70 e 80 °C nos últimos 50 Ma, correspondendo a um processo de exumação e soerguimento de cerca de 2,8 a 3,2 km de rocha.

Palavras-chave: Termocronologia, Traços de fissão, Apatita, Zona de Cisalhamento Além Paraíba

## ABSTRACT

Pinho, J.F.G., 2024, Low-Temperature Thermochronology Applied to the Além Paraíba Shear Zone, Ribeira Belt [Undergraduate Thesis], São Paulo, Institute of Geosciences, University of São Paulo, 50 p.

The Além Paraíba Shear Zone (ZCAP) is a tectonic belt primarily composed of mylonites, approximately 200 km long, up to 5 km wide, and oriented ENE-WSW. It is located in the central portion of the Ribeira Belt and formed within the tectonic context of the Ribeira Orogen, during the collisions associated with the Brasiliano Cycle. Although the region has been studied since 1975, most geochronological research has focused on the peak metamorphism and the age of fault activation, leaving temporal gaps in the understanding of its more recent thermal evolution. In this study, low-temperature thermochronology methods were applied, specifically the apatite fission track technique, to investigate the thermal history below 120 °C. Fission track ages (TFA) were obtained for five samples: a Granada-Biotite Mylonitic Gneiss (ALP-02) with an age of  $41.8 \pm 2.4$  Ma; a Biotite-Plagioclase Gneiss (ALP-03) with an age of  $37.6 \pm 3.8$  Ma; a Biotite-Plagioclase Tonalitic Gneiss (ALP-04) with an age of  $42.1 \pm 2.7$  Ma; a Granitic Mylonite (ALP-06) with an age of  $43.1 \pm 2.1$  Ma; and a Granada-Biotite Granulitic Gneiss (ALP-09) with an age of  $53.8 \pm 2.5$  Ma. The spatial distribution of the samples provided important insights into the exhumation history of the ZCAP. Sample ALP-04, located at the center of the shear zone, and ALP-09, situated in the southeastern block, along with the other samples from the northwestern block, suggested reactivation of the reverse component of the ZCAP. This reactivation led to differential uplift between the fault blocks, with a temporal difference of approximately 10 Ma, with the northwestern block experiencing faster uplift. The reconstructed thermal history indicated cooling between 70 and 80 °C over the last 50 Ma, corresponding to exhumation and uplift of approximately 2.8 to 3.2 km of rock.

Keywords: Thermochronology, Fission Tracks, Apatite, Além Paraíba Shear Zone

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Mapa de localização da área de estudo, com destaque para as unidades litológicas presentes e a posição das amostras datadas.	2
Figura 2	Esquema representativo da hipótese de trabalho. Destaca-se a evolução durante o intervalo t0-t1 como um episódio de exumação regional e a evolução entre t1 e t2 como um episódio de reativação da zona de cisalhamento, com um soerguimento diferencial dos blocos.	3
Figura 3	Desenho esquemático do processo de formação e registro de traços de fissão a partir do modelo de pico de explosão de íons (Fleischer <i>et al.</i> , 1965). Fonte: (Reiners & Ehlers, 2018)	5
Figura 4	Esquema representativo da relação entre a superfície original do grão e a superfície após o ataque químico (Reiners & Ehlers, 2018).	6
Figura 5	Ilustração esquemática dos processos envolvidos no método EDM: (A) acumulação dos traços de fissão espontâneos com o decorrer do tempo, (B) montagem e polimento dos grãos de apatita, (C) corrosão química dos traços de fissão, (D) acoplamento de um detector externo de muscovita, (E) irradiação de nêutrons para a indução da fissão e (F) Contabilização dos traços induzidos e espontâneos. Fonte: Modificado de Reiners & Ehlers, 2018.	7
Figura 6	(A) Figura esquemática de traços de fissão revelados em um mineral, com destaque para os traços confinados; e (B) Fotografia da visão superior de um grão de apatita com traços expostos. Fonte: Modificado de Reiners & Ehlers, 2018.	9
Figura 7	Mapa das principais falhas da Província Mantiqueira. Em destaque a Zona de Cisalhamento Além Paraíba (ZCAP ou ZCRPS) e sua influência sobre o curso do rio Paraíba do Sul. Fonte: Modificado de Silva & Mello, 2011.	12
Figura 8	(A) Configuração tectônica da província Mantiqueira na América do Sul: PP – Cráton Paranapanema, SF - Cráton São Francisco, AM -	13

Cráton Amazonas, RP- Cráton Rio de la Plata, WA - Cráton Oeste Africano, AB - Cinturão Araçuaí, RB - Cinturão Ribeira, DFB - Cinturão Dom Feliciano. (B) Mapa tectônico simplificado da região, destacando a compartimentação tectônica do sudeste brasileiro. Fonte: Giraldo *et al.* (2019)

Figura 9	Mapa geológico esquemático da Zona de Cisalhamento Além Paraíba (ZCAP). As litologias presentes são: (1) Embasamento policíclico; (2) Complexo Juiz de Fora; (3) Enderbita; (4) Cinzigita; (5) Granitos Sin-tectônicos; (6) Complexo Paraíba do Sul; e (7) Rochas miloníticas. Fonte: Egydio-Silva <i>et al.</i> (2002).	14
Figura 10	(A,B) Porfiroclastos de plagioclásio estirados. Fonte da figura 10A: Giraldo <i>et al.</i> , 2019.	15
Figura 11	Estereogramas com as orientações preferenciais da foliação milonítica (A) e lineação milonítica (B). Fonte: Modificado de Giraldo <i>et al.</i> (2019)	16
Figura 12	(A) Mapa base do sistema de coordenadas da amostra ALP-04; e (B) Mosaico da amostra ALP-04.	21
Figura 13	Fotografia do grão #36 da amostra ALP-06.	21
Figura 14	Modelo calculado através da modelagem inversa no <i>software</i> HeFTy (Ketcham, 2005). Neles estão dispostos os envelopes com as possíveis trajetórias térmicas para a amostra ALP-03B.	25
Figura 15	Modelo calculado através da modelagem inversa no <i>software</i> HeFTy (Ketcham, 2005). Neles estão dispostos os envelopes com as possíveis trajetórias térmicas para a amostra ALP-04A.	26
Figura 16	Modelo calculado através da modelagem inversa no <i>software</i> HeFTy (Ketcham, 2005). Neles estão dispostos os envelopes com as possíveis trajetórias térmicas para a amostra ALP-09A.	26
Figura 17	<i>Radial-plot</i> criado através do <i>site</i> IsoplotR para a amostra ALP-03B.	27
Figura 18	<i>Radial-plot</i> criado através do <i>site</i> IsoplotR para a amostra ALP-04A.	27

Figura 19	<i>Radial-plot</i> criado através do <i>site</i> IsoplotR para a amostra ALP-09A.	28
Figura 20	Modelo calculado através da modelagem inversa no <i>software</i> HeFTy (Ketcham, 2005). Neles estão dispostos os envelopes com as possíveis trajetórias térmicas para a amostra ALP-02.	29
Figura 21	Modelo calculado através da modelagem inversa no <i>software</i> HeFTy (Ketcham, 2005). Neles estão dispostos os envelopes com as possíveis trajetórias térmicas para a amostra ALP-04B.	30
Figura 22	Modelo calculado através da modelagem inversa no <i>software</i> HeFTy (Ketcham, 2005). Neles estão dispostos os envelopes com as possíveis trajetórias térmicas para a amostra ALP-06.	30
Figura 23	<i>Radial-plot</i> criado através do <i>site</i> IsoplotR para a amostra ALP-06.	31
Figura 24	<i>Radial-plot</i> criado através do <i>site</i> IsoplotR para a amostra ALP-02.	31
Figura 25	<i>Radial-plot</i> criado através do <i>site</i> IsoplotR para a amostra ALP-04B.	32
Figura 26	(A, B, C) Biplots relacionando a quantidade de LREE e a relação Sr/Y. Abreviações para os grupos: ALK = Rochas ígneas ricas em álcalis; IM = Granitóides máficos do tipo I e rochas ígneas máficas; LM = Rochas metamórficas e metassomáticas de baixo e médio grau; HM = Fusões parciais, leucosomas e rochas metamórficas de alto grau; S = Granitóides do tipo S e tipos I 'félsicos' de alto índice de saturação de alumínio (ASI); UM = Rochas ultramáficas incluindo carbonatitos, lherzolitos e piroxenitos .	33
Figura 27	Mapa geológico com a distribuição espacial das amostras e idades associadas.	34
Figura 28	Comparação entre os envelopes de trajetórias térmicas das amostras ALP-06 (azul) e ALP-09A (vermelho).	35
Figura 29	Modelo esquemático da posição das amostras em profundidade, conforme a história térmica modelada.	35

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1	Condições otimizadas de operação do laser utilizado na etapa de LA-ICP-MS.	22
Tabela 2	Condições otimizadas de operação do LA-ICP.	22
Tabela 3	Dados termocronológicos e idade central calculada através do método EDM.	24
Tabela 4	Dados termocronológicos e idade central calculada através do método LA-ICP-MS.	28

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. METAS E OBJETIVOS.....	3
3. FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1. Termocronologia de baixa temperatura - Traços de Fissão.....	4
3.1.1. A geração dos traços de fissão.....	4
3.1.2. A datação através dos traços de fissão: o método EDM.....	5
3.1.3. Alternativa de datação: o método LA-ICP-MS.....	10
3.2. Zona de cisalhamento Além Paraíba.....	11
3.2.1. Contexto tectônico.....	12
3.2.2. Litologias.....	14
3.2.3. Deformação e estruturas.....	15
3.2.4. Metamorfismo.....	16
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	17
4.1. Preparação e separação mineral das amostras.....	17
4.2. Montagem das amostras.....	18
4.3.1. Montagem e irradiação das amostras.....	18
4.3.2. Cálculo Zeta e Dosimetria.....	19
4.3.3. Contagem dos traços de fissão.....	19
4.3.4. Cálculo da idade AFT.....	20
4.4. Aquisição de dados termocronológicos - Método LA-ICP-MS.....	20
4.4.1. Montagem e referenciação das amostras.....	20
4.4.2. Contagem dos traços espontâneos.....	21
4.4.3. Ablação a laser e redução dos dados.....	22
4.4.4. Cálculo da idade AFT.....	23
4.5. Modelagem dos dados AFT.....	23
5. RESULTADOS.....	24
5.1. Idade AFT - EDM.....	24
5.2. Idade AFT - LA-ICP-MS.....	28
5.3. Geoquímica.....	32
6. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	34
7. CONCLUSÕES.....	36
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	37
APÊNDICE.....	40



## 1. INTRODUÇÃO

A termocronologia de baixa temperatura é uma técnica amplamente utilizada para investigar a história térmica de rochas e terrenos geológicos em faixas de temperatura inferiores a  $\sim 250^{\circ}\text{C}$  (Reiners & Brandon, 2006), fornecendo informações valiosas sobre a evolução tectônica das rochas nas camadas superiores da litosfera. Entre os diversos métodos disponíveis, o método de traços de fissão em apatita se destaca como o termocronômetro mais utilizado, devido à sua cinética bem compreendida e à temperatura de fechamento próxima a  $120^{\circ}\text{C}$  (Gallagher, 1998). Isso permite a análise de fenômenos responsáveis pelo resfriamento das rochas nas camadas superiores da crosta, entre 4 e 5 km de profundidade.

Desta forma, a termocronologia de baixa temperatura utilizando o método de traços de fissão em apatita pode ser aplicada em zonas de cisalhamento visando obter a(s) idade(s) do(s) evento(s) de resfriamento, bem como gerar modelos com as possíveis trajetórias térmicas da região e interpretar suas possíveis causas, sejam elas associadas a reativações da zona de cisalhamento, gerando circulação de fluidos e/ou exumação, e soerguimento.

Este estudo se concentra na Zona de Cisalhamento Além Paraíba (ZCAP), exposta na região da Faixa Ribeira e desenvolvida no contexto tectônico do Orógeno Ribeira, formado durante as colisões do Ciclo Brasileiro (Heilbron *et al.*, 2000). Desde 1975, quando Almeida *et al.* (1975) a denominou "Lineamento de Além-Paraíba", a região tem sido objeto de estudo. No entanto, os estudos se concentraram em desvendar a idade de ativação e pico metamórfico da ZCAP, não adentrando na história evolutiva recente. Giraldo *et al.* (2019) determinou, através de geocronologia isotópica por LA-ICP-MS de U-Pb em zircões e monazitas, que a idade do pico metamórfico em fácies granulito estaria ca.  $583,6 \pm 7,1$  Ma, a idade da deformação tectônica entre ca. 611 - 553 Ma e, por fim, que a ativação da zona teria ocorrido entre ca. 590 - 530 Ma.

Desta forma, aplicação da termocronologia de baixa temperatura por traços de fissão na ZCAP busca identificar sua história térmica em temperaturas inferiores a aproximadamente  $120^{\circ}\text{C}$ , visando uma compreensão mais detalhada da evolução das discontinuidades e suas relações com os ciclos tectônicos da região, além de possíveis reativações, preenchendo assim uma lacuna temporal ainda não explorada. A área de estudo foi determinada entre os municípios de Além Paraíba (MG) e Santo Antônio de Pádua (RJ) (figura 1).

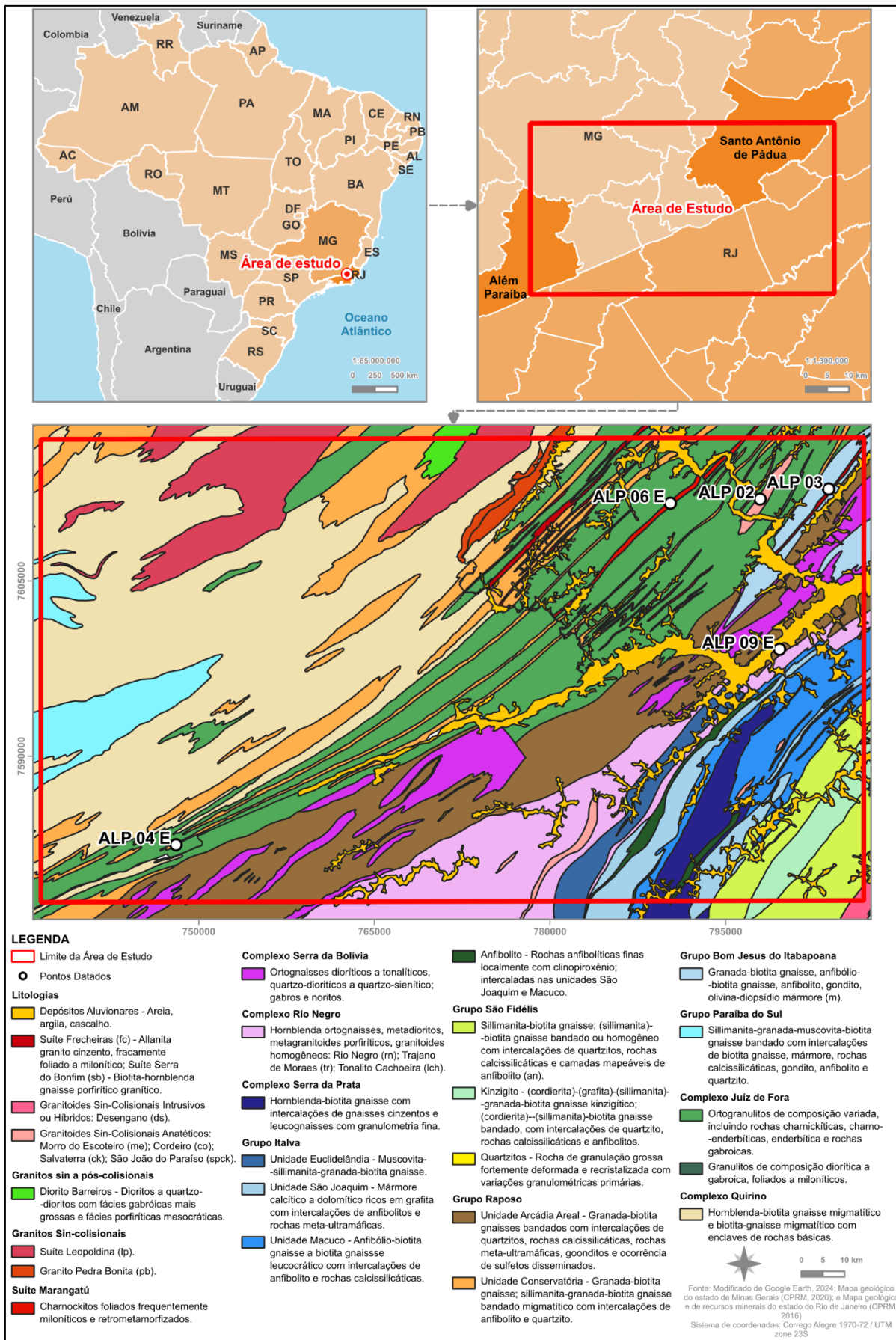


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo, com destaque para as unidades litológicas presentes e a posição das amostras datadas.

## 2. METAS E OBJETIVOS

Apesar dos estudos acerca das idades de ativação e metamorfismo da Zona de Cisalhamento Além Paraíba, a área ainda não apresenta respostas acerca de sua história evolutiva mais recente, incluindo a datação de eventos de resfriamento a baixas temperaturas e possíveis reativações neotectônicas.

Desta forma, os objetivos deste trabalho são:

- I. Obter idades de traços de fissão em apatita, assim como a distribuição de comprimento de traços em amostras coletadas sistematicamente na Zona de Cisalhamento Além Paraíba;
- II. Determinar o(s) evento(s) de resfriamento da ZCAP a temperaturas menores que 120°C, construindo a história térmica da região a partir da modelagem dos dados de traço de fissão em apatita;
- III. Identificar mecanismos de resfriamento (e.g., exumação, reativação, circulação de fluidos) em diferentes blocos das falhas associadas à zona de cisalhamento Além Paraíba.

Ao reconstruir a história térmica das amostras coletadas nos dois blocos da ZCAP, o objetivo é distinguir episódios de exumação regional, nos quais os dois blocos se deslocam e resfriam de maneira coesa, de episódios de reativação da ZCAP como uma falha com componente inversa. Estes últimos episódios resultariam em soerguimento e resfriamento diferencial entre os blocos, conforme ilustrado na figura 2 entre os tempos  $t_1$  e  $t_2$  (tempo presente).

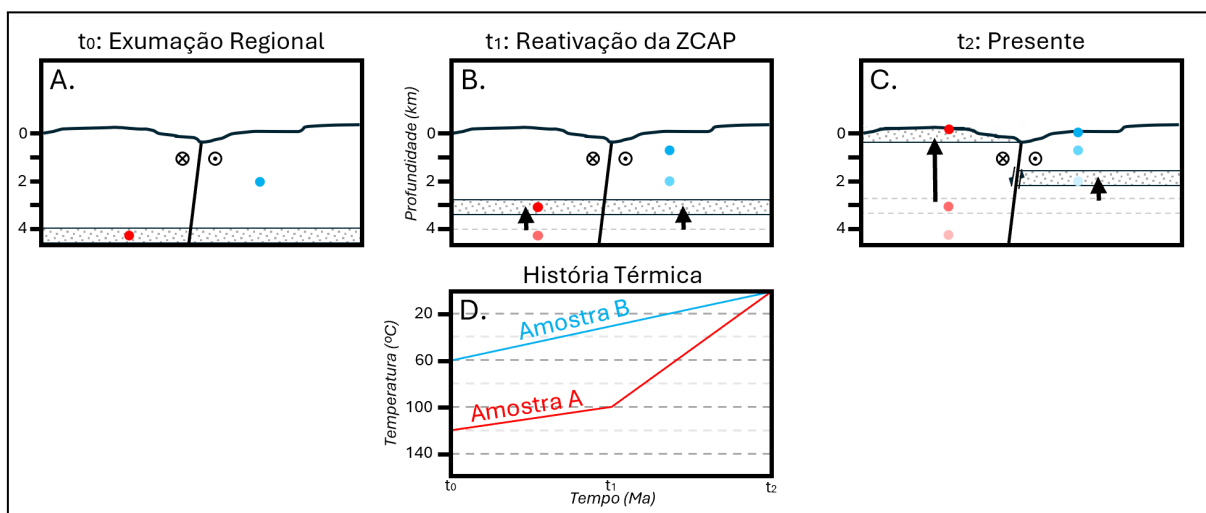


Figura 2. Esquema representativo da hipótese de trabalho. Destaca-se a evolução durante o intervalo  $t_0$ - $t_1$  como um episódio de exumação regional e a evolução entre  $t_1$  e  $t_2$  como um episódio de reativação da zona de cisalhamento, com um soerguimento diferencial dos blocos.

### 3. FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. Termocronologia de baixa temperatura - Traços de Fissão

A termocronologia de baixa temperatura empregando o método de traços de fissão em apatitas (TFA ou AFT em inglês) tem se consolidado como uma ferramenta essencial para a análise da história térmica e do resfriamento de ambientes geológicos, como margens continentais passivas, crátons, orógenos e falhas (Gallagher *et al.*, 1998; Malusa & Fitzgerald, 2019). Esse método é amplamente utilizado para datar processos de denudação e soerguimento, auxiliando na reconstrução e na compreensão da evolução do terreno. Além disso, possui um grande potencial para identificar zonas de reativação de falhas, analisando blocos distintos separados pelas mesmas e comparando suas histórias térmicas contrastantes, resultantes das diferenças na exumação (Stockli, 2005).

##### 3.1.1. A geração dos traços de fissão

Antes de detalhar o método de Traços de Fissão (TF ou FT em inglês), deve-se definir previamente o conceito de fissão nuclear. Este processo ocorre quando um isótopo instável pesado e radioativo, como o  $^{238}\text{U}$ , passa por um decaimento de seu núcleo, o qual se divide em um par de fragmentos de tamanho similar, enquanto libera nêutrons. Na natureza, a fissão nuclear ocorre espontaneamente a uma taxa conhecida empiricamente, que pode ser expressa como a constante de decaimento por traços de fissão ( $\lambda_f = \text{XXX E}^{-15} \text{ yr}^{-1}$ ) ou tempo de meia-vida (XX Ga). A primeira taxa reflete a probabilidade de um evento de fissão nuclear ocorrer espontaneamente ao longo de um período de um ano, enquanto a segunda taxa indica o tempo necessário para que metade dos átomos iniciais sofra o decaimento (Reiners & Ehlers, 2018). Além disso, em alguns isótopos, como o  $^{235}\text{U}$ , a fissão pode ser induzida artificialmente em um reator nuclear por meio do bombardeio com nêutrons, raios  $\gamma$  ou outras partículas de alta energia.

Cada reação de fissão nuclear é acompanhada pela liberação de nêutrons e energia, sendo que a maior parte dessa energia se manifesta como energia cinética dos fragmentos de fissão. Como resultado, os fragmentos são lançados em direções opostas, criando traços de dano na rede cristalina do mineral, conhecidos como traços de fissão. Estes traços são pequenos defeitos cristalinos, com comprimentos de 15-20  $\mu\text{m}$ , a depender da densidade do mineral hospedeiro, e diâmetro de algumas unidades angström ( $10^{-10}\text{m}$ ), formados pela desaceleração das partículas carregadas por meio de interações com a rede cristalina do mineral (Reiners & Ehlers, 2018).

Buscando determinar qual mecanismo e interação resulta no movimento dos átomos que gera os traços de fissão, Fleischer *et al.* (1975) determinou o modelo conhecido

como “pico de explosão de íons”, onde os deslocamentos eletrostáticos consistem no mecanismo principal. Neste modelo, a formação dos traços de fissão ocorreria em três etapas principais (figura 3):

- A. Em um primeiro momento, as partículas liberadas durante o decaimento dos átomos de urânio se movem rapidamente, retirando elétrons da rede cristalina ao longo de sua trajetória e resultando em um rastro de átomos ionizados positivamente;
- B. Em seguida, os átomos ionizados positivamente são deslocados de seus locais como consequência da repulsão de Coulomb, resultando em interstícios na rede cristalina;
- C. Por fim, a região afetada relaxa elasticamente, ocasionando uma deformação da rede circundante.

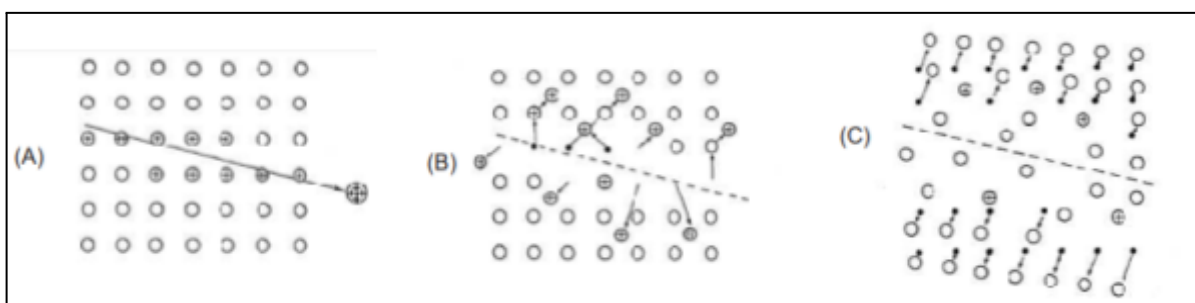


Figura 3. Desenho esquemático do processo de formação e registro de traços de fissão a partir do modelo de pico de explosão de íons (Fleischer *et al.*, 1965). Fonte: (Reiners & Ehlers, 2018)

O método de termocronologia baseado em traços de fissão se fundamenta no acúmulo de defeitos (*i.e.*, produto filho) na estrutura cristalina da apatita, que resulta do decaimento espontâneo por fissão nuclear do isótopo pai de urânio ( $^{238}\text{U}$ ). Desta forma, esse método é classificado como uma técnica de datação isotópica (Gallagher *et al.*, 1998).

### 3.1.2. A datação através dos traços de fissão: o método EDM

Os métodos de datação isotópica são baseados na radioatividade e requerem o conhecimento das concentrações dos isótopos pai e filho, bem como da taxa de desintegração do isótopo pai. Com esses dados, é possível estimar uma idade, que representa uma aproximação do momento em que o produto filho começou a se acumular efetivamente no mineral. Na datação por traços de fissão, é necessário medir as concentrações do isótopo pai (*i.e.*,  $^{238}\text{U}$ ) e do produto filho. A concentração do produto filho — os traços de fissão espontâneos — é calculada a partir da estimativa da densidade de traços utilizando microscopia óptica (Donelick *et al.*, 2005). Já o isótopo pai ( $^{238}\text{U}$ ) pode ser

medido de duas maneiras: por espectrometria de massas (Cogné *et al.*, 2020) ou induzindo fissão nuclear no  $^{235}\text{U}$  presente nos minerais, utilizando um reator nuclear e registrando a densidade de traços induzidos em um material colado previamente aos grãos, denominado "detector externo" (Gleadow, 1981; Donelick *et al.*, 2005).

Buscando possibilitar a contabilização dos traços de fissão e o cálculo da densidade, são necessários alguns processos de exposição e ampliação desses rastros de decaimento. Os TFs apresentam comprimentos e larguras na escala de  $\mu\text{m}$  e angström, respectivamente, desta forma a exposição dos traços é uma etapa crucial para possibilitar a análise por microscopia óptica. A ampliação dos TFs é realizada por meio de corrosão química, um método eficaz devido à menor resistência das regiões desordenadas ao longo dos trajetos de fissão. Isso significa que o traço de fissão que atinge a superfície do grão se dissolve mais rapidamente do que o material ao seu redor.

As condições de reagente, temperatura e tempo de ataque químico foram determinadas pelo protocolo estabelecido por Donelick *et al.* (2005). Durante a corrosão, dois processos atuam em conjunto, o primeiro é a dissolução química ao longo dos traços de fissão ( $V_T$ ) e o segundo é a corrosão geral na superfície do grão ( $V_G$ ) (Fleischer & Price, 1963). No geral, a taxa de corrosão  $V_T$  é maior que a taxa de corrosão  $V_G$  e, juntas, ambas definem a geometria final dos traços de fissão (figura 4).

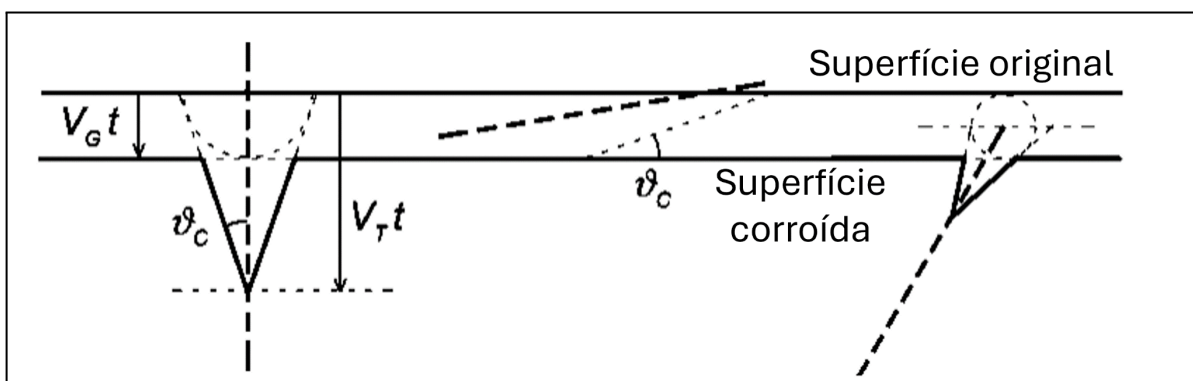


Figura 4. Esquema representativo da relação entre a superfície original do grão e a superfície após o ataque químico (Reiners & Ehlers, 2018).

Após a exposição dos traços de fissão, os grãos de apatita podem ser submetidos à análise para a quantificação dos isótopos pai e produto filho. O protocolo mais comum empregado nas datações através dos traços de fissão é o Método do Detector Externo (*external detector method* - EDM) (Gleadow, 1981; Donelick *et al.*, 2005). Neste método, a relação entre os isótopos  $^{238}\text{U}$  (*i.e.*, pai) e  $^{235}\text{U}$  (*i.e.*, filho) é determinada através da contabilização dos traços de fissão espontâneos, que são provenientes da fissão do isótopo pai, e dos traços induzidos, que são provenientes da fissão do produto filho através da irradiação em um reator nuclear de nêutrons térmicos.

A contagem dos traços de fissão espontâneos pode ser realizada no próprio grão mineral, após o processo de corrosão. Já para a quantificação do isótopo pai, os traços de fissão induzidos são gravados em um detector externo com baixa concentração de U (e.g., uma lâmina de muscovita), que é acoplado à superfície interna do mineral. Esse detector serve como superfície de gravação dos traços de fissão induzidos durante a irradiação de nêutrons termalizados (*i.e.*, com baixa energia cinética) em um reator nuclear (figura 5). Essa irradiação induz a produção de novos traços de fissão do isótopo físsil  $^{235}\text{U}$ , desta forma, ao ser a abundância entre  $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$  uma constante, pode-se estimar o teor de  $^{238}\text{U}$ .

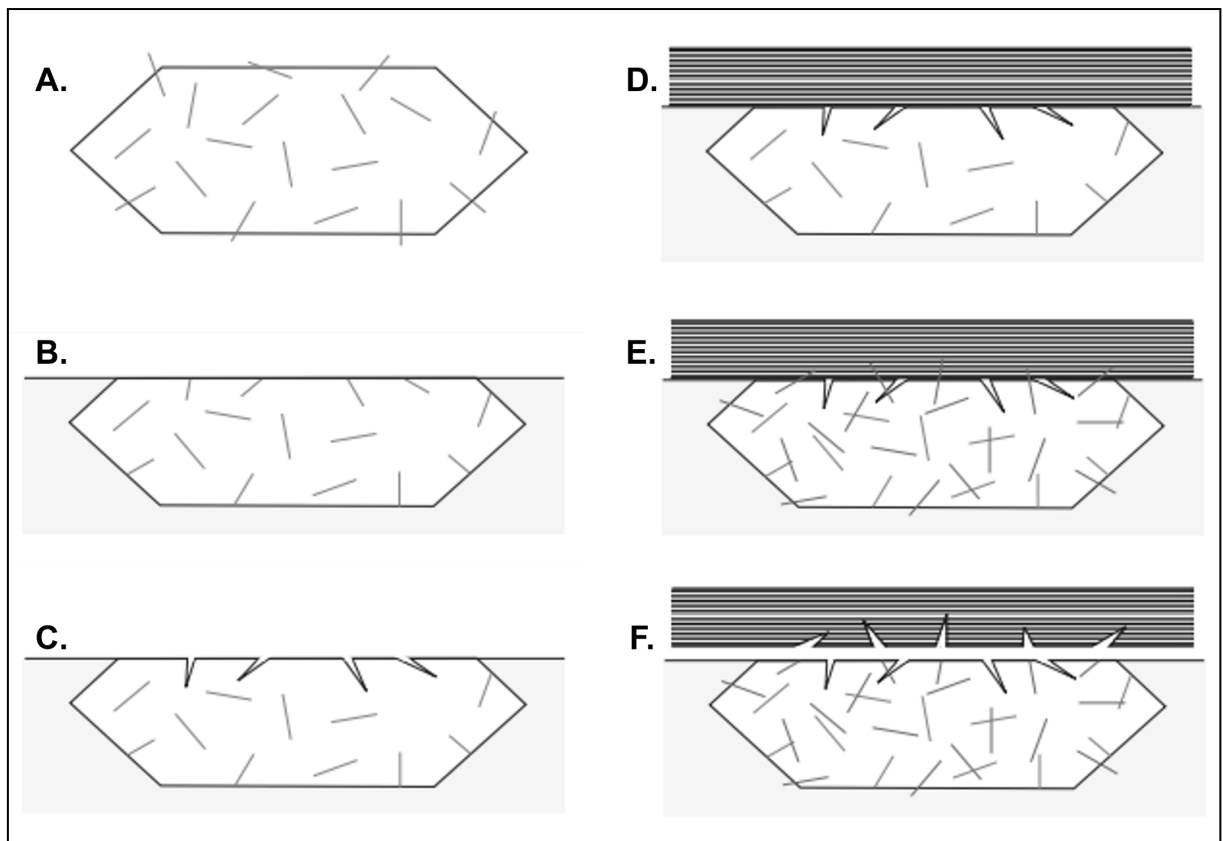


Figura 5. Ilustração esquemática dos processos envolvidos no método EDM: (A) acumulação dos traços de fissão espontâneos com o decorrer do tempo, (B) montagem e polimento dos grãos de apatita, (C) corrosão química dos traços de fissão, (D) acoplamento de um detector externo de muscovita, (E) irradiação de nêutrons para a indução da fissão e (F) Contabilização dos traços induzidos e espontâneos. Fonte: Modificado de Reiners & Ehlers, 2018.

Após a irradiação das amostras, são determinadas as densidades dos traços de fissão espontâneos e induzidos. Neste método, os grãos de uma população são datados individualmente (*i.e.*, *single-grain age*), o que exige a contagem dos traços no grão corroído quimicamente e na área correspondente do detector externo. As principais medições de densidade de traços realizadas nas amostras são: (I)  $\rho_s$ , que diz respeito aos traços espontâneos presentes em uma superfície interna polida e exposta do grão mineral; e (II)  $\rho_I$ , que está associada aos traços induzidos no detector externo. Essas densidades podem ser



calculadas, utilizando os dados de aproximadamente 20 grãos, por meio das fórmulas 1a e 1b:

$$(a) \rho_s = \frac{\sum N_{sj}}{\sum A_j} \quad (b) \rho_l = \frac{\sum N_{lj}}{\sum A_j}$$

Fórmula 1. (a) Densidade traço/cm<sup>2</sup> no grão mineral ( $\rho_s$ ); e (b) densidade traço/cm<sup>2</sup> no detector de muscovita ( $\rho_l$ )

onde  $N_{sj}$  é a quantidade de traços de fissão espontâneos na área  $A_j$  do grão J, enquanto  $N_{lj}$  é o número de traços induzidos na mesma área, mas agora na impressão presente no detector de muscovita (Green, 1981). Por meio destas contagens é possível determinar a idade de traços de fissão em grãos individuais e seu erro associado a partir das fórmulas 2a, 2b, respectivamente.

$$(a) t_i = \frac{1}{\lambda_d} \ln \left( 1 + \lambda_d \zeta g P_d \frac{P_{s,i}}{P_{i,i}} \right) \quad (b) \sigma_i = \left[ \frac{1}{N_{s,i}} + \frac{1}{N_{i,i}} + \frac{1}{N_d} + \left( \frac{\sigma_\zeta}{\zeta} \right)^2 \right]^{1/2}$$

Fórmula 2. (a) Idade AFT; e (b) erro da idade AFT.

No entanto, os processos de exposição e contagem da densidade dos traços por si só não são suficientes para a interpretação de dados termocronológicos, uma vez que os defeitos no retículo cristalino são termicamente semi-estáveis. Ou seja, os traços de fissão podem se encurtar devido à reorganização da estrutura cristalina dos grãos em função da história térmica. Durante esse processo, os traços de fissão se encurtam progressivamente a partir das extremidades em direção ao centro, resultando na perda do registro da geração do produto filho.

Estudos cinéticos realizados em laboratórios e calibrados com amostras de histórias térmicas conhecidas (Ketcham, 2007) demonstraram que o encurtamento dos traços ocorre em faixas de temperatura conhecidas como “zona de apagamento parcial” (ZAP). Nesta faixa, a temperatura é suficiente para causar o encurtamento parcial dos traços, mas não total. A ZAP está delimitada pela temperatura que provoca o encurtamento total dos traços (mais alta) e pela temperatura que preserva completamente os traços (mais baixa) (Donelick *et al.*, 2005)

Desta forma, é necessário o conhecimento dos fatores que podem reduzir a estabilidade dos traços. Um dos processo predominante para o apagamento dos traços de fissão é o “*thermal annealing*” (Fleischer *et al.*, 1975), neste, a permanência em faixas de temperatura elevada por tempo contínuo estimula a reorganização do retículo cristalino. Visando compreender este reaquecimento, são analisados os traços de fissão confinados (Laslett *et al.*, 1987), ou seja, traços que estão posicionados inteiramente dentro do grão



mineral e em uma posição horizontal (*i.e.*, paralela ao eixo cristalográfico c), exibindo todo o seu comprimento (figura 6 A, B). Dentre estes traços confinados, são medidos aqueles horizontais e revelados por outros traços, nos quais é possível obter as suas dimensões exatas por meio da microscopia óptica. Outro elemento que pode fornecer informações acerca do *thermal annealing* é o Dpar, medida do diâmetro paralelo ao eixo c do grão de um traço de fissão exposto (Donelick, 1993). No geral, são medidos 4 ou mais valores de Dpar para cada grão, resultando em uma média aritmética final.

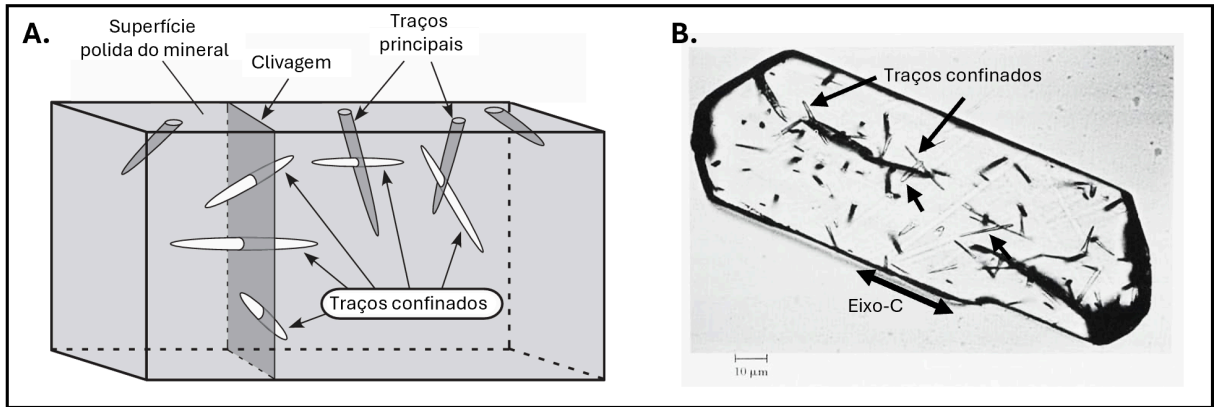


Figura 6. (A) Figura esquemática de traços de fissão revelados em um mineral, com destaque para os traços confinados; e (B) Fotografia da visão superior de um grão de apatita com traços expostos. Fonte: Modificado de Reiners & Ehlers, 2018.

Por fim, após a contagem dos traços de fissão, o cálculo das densidades (traços/cm<sup>2</sup>) e a determinação da idade AFT (*fission-track age*), as idades e a distribuição dos comprimentos de traços, junto com informações geológicas robustas que informem sobre parte da trajetória térmica, são modeladas em *softwares* como o Hefty ou QTqt (Ketcham, 2005, 2024; Gallagher, 2012). Estes programas incorporam modelos cinéticos de apagamento de traços de fissão (Laslett *et al.*, 1987, Ketcham *et al.*, 2007), permitindo a obtenção de possíveis trajetórias térmicas para a região por meio da exploração do espaço tempo-temperatura, utilizando abordagens estatísticas distintas.

Deve-se ressaltar que, para a datação de grãos individuais (*i.e.*, *single-grain age*), é fundamental avaliar a validade dos dados obtidos. Para isso, foi desenvolvido um procedimento estatístico denominado teste de  $\chi^2$  (Green, 1981)(fórmula 3). Esse teste deve ser realizado com um nível crítico de aproximadamente 5% e (n-1) graus de liberdade, onde n representa o número de grãos contados (Reiners & Ehlers, 2018).

$$\chi^2 = \sum \left\{ \frac{(N_{sj} - P_{sj})^2}{P_{sj}} \right\} + \sum \left\{ \frac{(N_{lj} - P_{lj})^2}{P_{lj}} \right\}$$

Fórmula 3. (a) Idade AFT; e (b) erro da idade AFT.

Se a amostra atender a esse critério, isso indica que ela pode ser tratada pela estatística de Poisson e a relação  $\rho_s/\rho_f$  fornece a melhor estimativa de idade. Caso contrário, os dados estarão sujeitos a variações extra-Poissonianas, que podem estar associadas a fatores como (Green, 1981, Reiners & Ehlers, 2018):

- Revelação incompleta dos traços de fissão espontâneos;
- Contagem imprecisa dos traços;
- Contato incompleto entre os cristais e os detectores externos;
- Heterogeneidade de urânio dentro do grão medido;
- Datação de amostras com variabilidade relacionada a múltiplos componentes de idade (e.g., rochas sedimentares, rochas detríticas, cinzas vulcânicas retrabalhadas).

### 3.1.3. Alternativa de datação: o método LA-ICP-MS

O método *Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry* (LA-ICP-MS) tem se tornado cada vez mais utilizado na datação por traços de fissão (AFT). Isso se deve às várias vantagens que oferece em relação ao método de datação clássico EDM. Entre os principais benefícios estão a maior agilidade na obtenção de dados, a possibilidade de aquisição simultânea de dados adicionais (e.g., idade U-Pb e abundância de elementos traço) e a eliminação da necessidade de irradiação das amostras, o que evita atrasos associados ao manuseio de materiais radioativos.

O método de traços de fissão em apatitas por LA-ICP-MS baseia-se na relação entre a densidade de traços de fissão espontâneos presentes no grão de interesse e o conteúdo de urânio ( $^{238}\text{U}$ ) medido na mesma área de contagem através de LA-ICP-MS (Hasebe *et al.*, 2004). Assim, os procedimentos iniciais deste método são semelhantes aos do método EDM, pois requerem a preparação das pastilhas com grãos, incluindo polimento e ataque químico, que expõe os TFs espontâneos. Após a preparação das amostras, os traços de fissão são contados manualmente e as lâminas são referenciadas a um sistema de coordenadas.

Após as etapas iniciais, chega-se ao ponto que distingue os métodos de datação discutidos: a determinação do conteúdo de urânio na amostra é realizada através da ablação da mesma com um feixe focalizado de laser de alta potência em um único ponto de ablação com diâmetro de 20 a 30  $\mu\text{m}$  ou em um *scan* rasterizado (Malusà & Fitzgerald,

2019), processo que resulta na vaporização do sólido. No LA-ICP-MS, os vapores gerados são direcionados para um plasma, onde são ionizados e conduzidos a um analisador de massa, resultando na quantificação da concentração de  $^{238}\text{U}$ . Para garantir que a análise ocorra exatamente na mesma área onde os traços de fissão espontâneos foram contados, as coordenadas dos grãos analisados devem ser transferidas para o software que controla a célula de ablação a laser (Malusà & Fitzgerald, 2019). Além disso, é importante tomar cuidado com a profundidade de ablação. De acordo com Hasebe *et al.* (2009), os traços na superfície da apatita se originam a partir de 5,5 a 8,5  $\mu\text{m}$  da superfície, portanto, a ablação deve ser realizada até no máximo essa profundidade para garantir a precisão na análise.

Outro fator que deve ser destacado para uma boa aplicação do método LA-ICP-MS é a calibração do equipamento e o teor de urânio. Habese *et al.* (2004) apresentou uma abordagem de calibração onde a concentração de U nos grãos desconhecidos foi comparada com a concentração conhecida em dois vidros padrão distintos, além disso o  $^{44}\text{Ca}$  foi utilizado como padrão elemental interno para corrigir variações no volume de ablação. Outra abordagem seria uma calibração baseada em  $\zeta$ , neste caso a obtenção do fator  $\zeta_{\text{ICP}}$  seria similar ao  $\zeta_{\text{EDM}}$ , ou seja, ele seria estimado a partir de amostras de idade conhecida (*i.e.*, amostras padrão) (Donelick *et al.*, 2005, 2009; Cogné *et al.*, 2020).

### **3.2. Zona de cisalhamento Além Paraíba**

Segundo Fossen (2016), o termo "Zona de Cisalhamento" refere-se a faixas que se estendem por dezenas a centenas de quilômetros, onde ocorre ou ocorreu movimentação relativa entre dois blocos de rocha. Nesses locais, o regime deformacional dominante é o cisalhamento puro e/ou simples, desta forma, essas zonas são caracterizadas pela presença de rochas quebradas ou deformadas, resultantes do movimento relativo entre blocos de rocha adjacentes. As zonas de cisalhamento podem ser classificadas de acordo com o ambiente em que ocorrem, levando em consideração profundidade, temperatura e regime deformacional. No caso da Zona de Cisalhamento Além Paraíba (ZCAP), ela é classificada como uma zona de alta temperatura. Esse tipo de zona se forma a grandes profundidades, resultando em deformações predominantemente dúcteis, além disso, ocorrem processos metamórficos de recristalização e formação de novos minerais (Fossen, 2016).

A Zona de Cisalhamento Além Paraíba (ZCAP), também conhecida como Zona de Cisalhamento Paraíba do Sul (Dayan & Keller, 1989) ou Lineamento de Além Paraíba (Almeida *et al.*, 1975), é uma faixa constituída predominantemente por milonitos com aproximadamente 200 km de comprimento e até 5 km de largura. Sua orientação é NE-SW e exerce uma forte influência sobre o terreno, controlando estruturalmente o Rio Paraíba do Sul entre os estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro (figura 7).

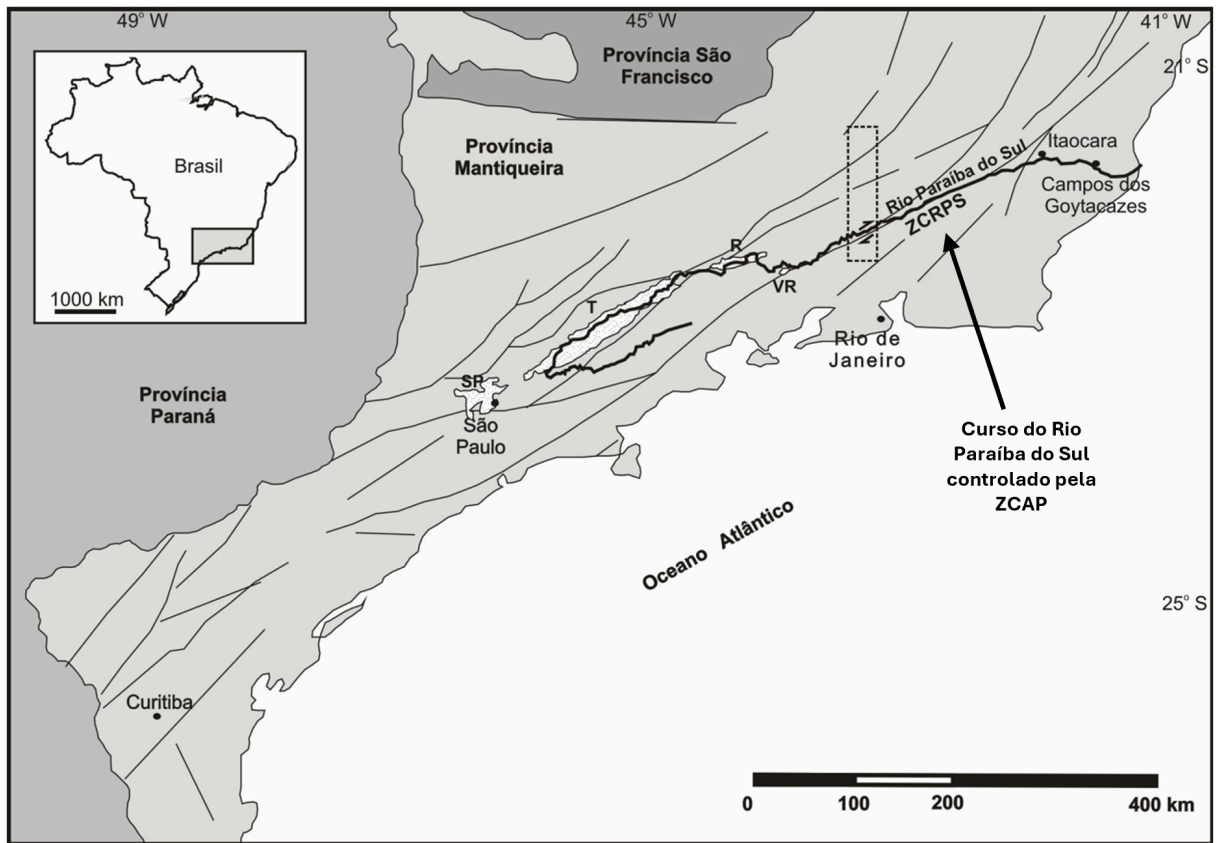


Figura 7. Mapa das principais falhas da Província Mantiqueira. Em destaque a Zona de Cisalhamento Além Paraíba (ZCAP ou ZCRPS) e sua influência sobre o curso do rio Paraíba do Sul. Fonte: Modificado de Silva & Mello, 2011.

### 3.2.1. Contexto tectônico

A Zona de Cisalhamento Além Paraíba está inserida no contexto evolutivo da Faixa Ribeira (Heilbron *et al.*, 2008). Esta faixa integra a Província Mantiqueira (Almeida *et al.*, 1977), uma vasta área orogênica formada durante a amalgamação dos crátons São Francisco, Congo, Kalahari, Paranapanema e Rio de La Plata, que deu origem ao paleocontinente Gondwana. A formação da Província Mantiqueira foi marcada por episódios de subducção, colisões continentais e movimentos transcorrentes tardios (Heilbron *et al.*, 2017). Ela inclui os orógenos Araçuaí, Ribeira, Brasília, Dom Feliciano e São Gabriel (Heilbron *et al.*, 2008).

O Orógeno Ribeira, onde está localizada a ZCAP, formou-se durante a colisão que ocorreu entre 600 e 540 Ma e englobou os crátons São Francisco, Congo e outras microplacas e arcos de ilha (Heilbron *et al.*, 2008), fazendo parte do Sistema Orogrênico Brasileiro/Pan-Africano (Heilbron *et al.*, 2008; Tupinambá *et al.*, 2007). Este orógeno se estende por aproximadamente 1400 km, desde o estado do Paraná até o Rio de Janeiro, e apresenta uma orientação geral de NE-SW, com uma tendência para NNE no norte e ENE no sul (Egydio-Silva *et al.*, 2018). O Orógeno Ribeira foi subdividido em cinco terrenos

tectônicos: Ocidental, Oriental, Paraíba do Sul, Embú e Cabo Frio (figura 8) (Heilbron *et al.*, 2004).

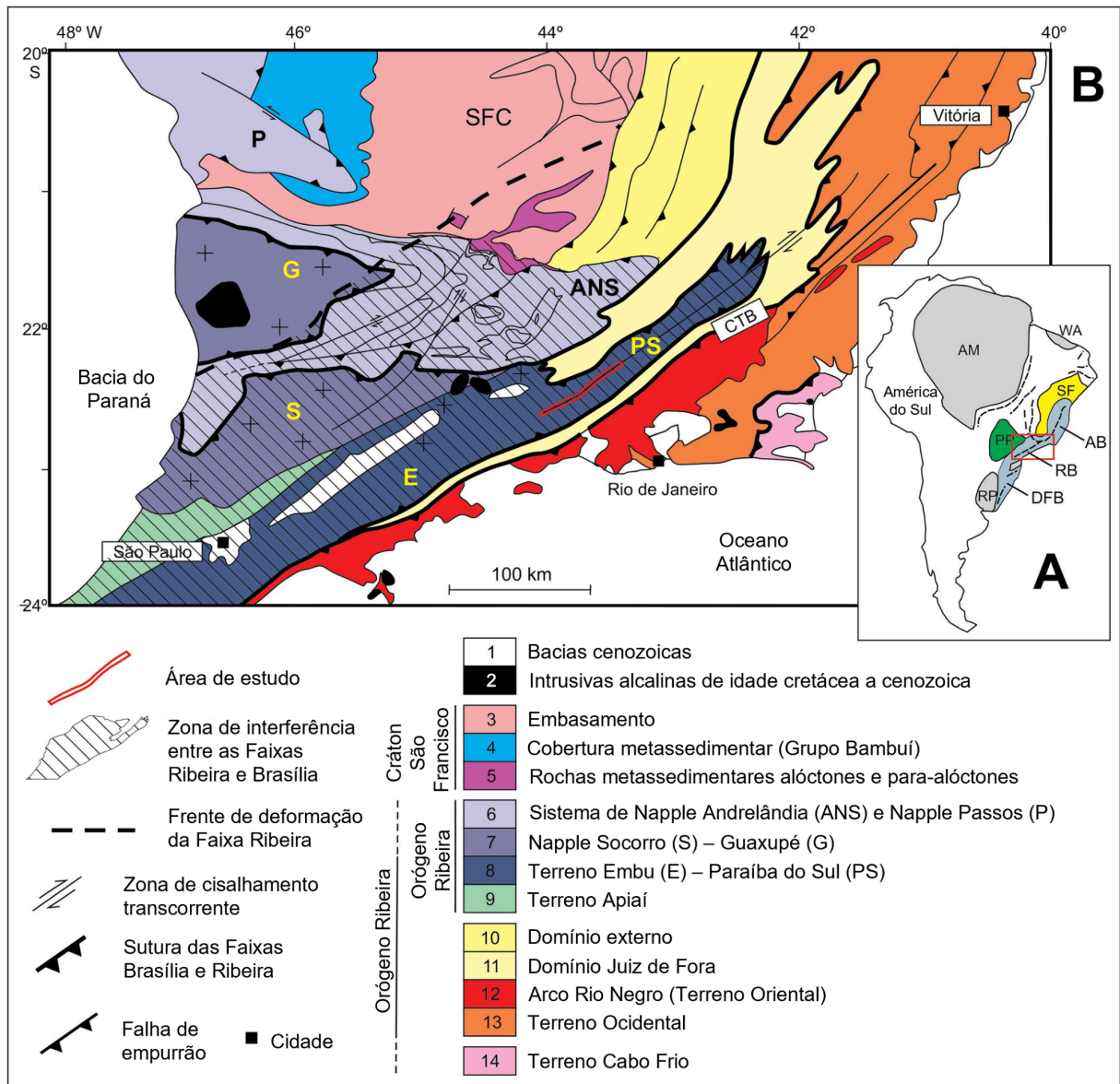


Figura 8. (A) Configuração tectônica da província Mantiqueira na América do Sul: PP – Cráton Paranapanema, SF - Cráton São Francisco, AM - Cráton Amazonas, RP- Cráton Rio de la Plata, WA - Cráton Oeste Africano, AB - Cinturão Araçuaí, RB - Cinturão Ribeira, DFB - Cinturão Dom Feliciano. (B) Mapa tectônico simplificado da região, destacando a compartimentação tectônica do sudeste brasileiro. Fonte: Giraldo *et al.* (2019)

O Terreno Tectônico Paraíba do Sul está localizado na porção central do Orógeno Ribeira, compreendendo a ZCAP. Este terreno constitui uma klippe dobrada (Heilbron *et al.*, 2008) e é composto por um embasamento Arqueano-Paleoproterozóico, unidades metassedimentares Neoproterozóicas e um arco magmático continental (Heilbron *et al.*, 2017).

### 3.2.2. Litologias

A Zona de Cisalhamento Além Paraíba corresponde a uma faixa de rochas miloníticas derivadas de associações de ortognaisses, paragnaisses, anfibolitos, granulitos e granitóides (figura 9 ). Na região entre os municípios de Além Paraíba (MG) e Santo Antônio de Pádua (RJ), essa faixa apresenta direção ENE, extensão aproximada de 200 km e aproximadamente 5 km de largura (Almeida *et al.*, 1975). Nesta área ocorre um embasamento Arqueano e Paleoproterozóico que, segundo Heilbron *et al.* (2004), apresenta três associações litológicas. A primeira associação contempla ortognaisses migmatíticos, granitóides e metabasitos do Complexo Mantiqueira (2,8 - 2,7 Ga; 2,2 - 2,0 Ga), a segunda apresenta ortogranulitos, granitóides cálcio-alcalinos, granitos colisionais e metabasitos do Complexo Juiz de Fora (2,14 - 2,07 Ga) e, por fim, a última associação está relacionada ao Complexo Quirino com granitoides tonalítico-granodioríticos com enclaves de rochas metaultramáficas, metamáficas e cálcio-silicáticas.

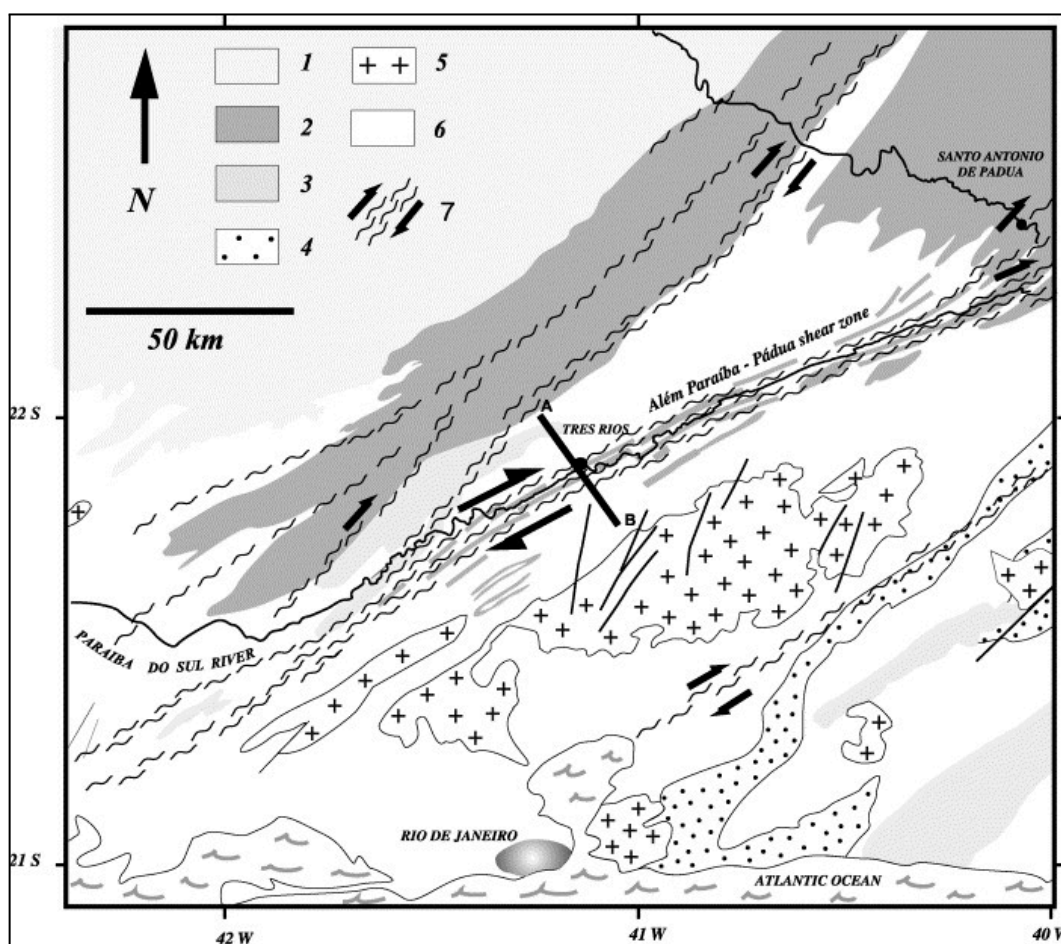


Figura 9. Mapa geológico esquemático da Zona de Cisalhamento Além Paraíba (ZCAP). As litologias presentes são: (1) Embasamento policíclico; (2) Complexo Juiz de Fora; (3) Enderbita; (4) Cinzigita; (5) Granitos Sin-tectônicos; (6) Complexo Paraíba do Sul; e (7) Rochas miloníticas. Fonte: Egydio-Silva *et al.* (2002).

Acima do embasamento estão situadas as sucessões metassedimentares neoproterozóicas da Megassequência Andrelândia ou do Grupo Paraíba do Sul. A



Megassequência Andrelândia compreende diversas sucessões metassedimentares associadas a rochas meta-ígneas máficas e sua deposição se deu em uma bacia de margem passiva, com fácies plataformais e distais (Heilbron *et al.*, 2004). Essa unidade pode ser subdividida em duas sequências: (I) Carrancas, com paragneisses bandados, quartzitos e xistos cinzentos com intercalações quartzíticas; e (II) Barra do Turvo, composta por clorita-biotita filito, plagioclásio-biotita xisto/gnaiss e biotita xisto/gnaiss (Heilbron *et al.*, 2004). O Grupo Paraíba do Sul apresenta associações litológicas compostas por xistos, paragneisses com intercalações de mármore e calcissilicáticas.

### 3.2.3. Deformação e estruturas

A Faixa Ribeira apresenta evidências de uma evolução polifásica, ou seja, um estabelecimento a partir de diversas fases de deformação e recristalização. Segundo Heilbron *et al.* (1995) as fases de deformação  $D_1$  e  $D_2$  constituem a principal etapa de encurtamento crustal, tendo ocorrido entre 590 e 563 Ma durante a colisão entre os crátons São Francisco e Paranapanema e um arco magmático. A terceira fase de deformação ( $D_3$ ) ocorreu entre 530 e 510 Ma, como resultado da colisão entre os crátons já amalgamados e o Terreno Cabo Frio (Heilbron *et al.*, 2008).

Como resultado da fase de deformação  $D_3$ , foram geradas dobras de grande escala, incluindo a Megassinforme do Rio Paraíba do Sul e a Megantiforma do Rio de Janeiro (Heilbron *et al.*, 1995). Durante esse evento, também foi formada a Zona de Cisalhamento Além Paraíba (ZCAP), que se estende ao longo do plano axial de uma grande dobra sinforme aberta no Vale do Rio Paraíba do Sul. A ZCAP é uma zona de cisalhamento transpressiva, responsável pela formação de foliação milonítica e dobras isoclinais na região. De acordo com Heilbron *et al.* (1995), o movimento principal entre os blocos ao longo da ZCAP é de natureza dextral, indicadores cinemáticos como porfiroclastos de feldspato com caudas assimétricas tipo  $\sigma$  e  $\delta$  são observados em superfícies horizontais, confirmando essa movimentação dextral (Giraldo *et al.*, 2019) (figura 10).

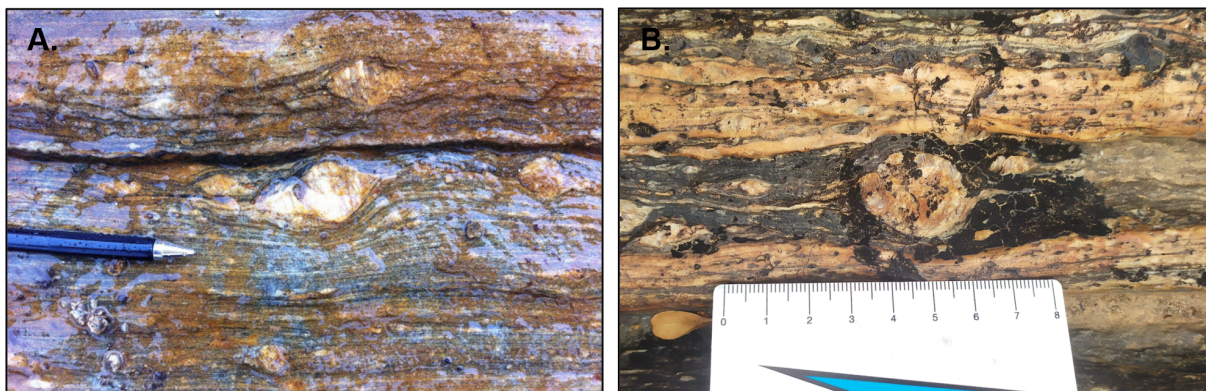


Figura 10. (A,B) Porfiroclastos de plagioclásio estirados. Fonte da figura 10A: Giraldo *et al.*, 2019.

Destacando a Zona de Cisalhamento Além Paraíba (ZCAP) entre os municípios de Além Paraíba e Santo Antônio de Pádua, Egydio-Silva *et al.* (2002) define que essa zona de cisalhamento apresenta uma orientação N070°E, representando a terminação de uma rede de zonas de cisalhamento do tipo *strike slip* dextral. Giraldo *et al.* (2019) ressalta que a ZCAP é caracterizada por uma foliação milonítica subvertical, com uma lineação de estiramento horizontal. A partir das projeções estereográficas (figura 11), observa-se que a foliação tem direção N060°E, enquanto a lineação segue direção N065°E.

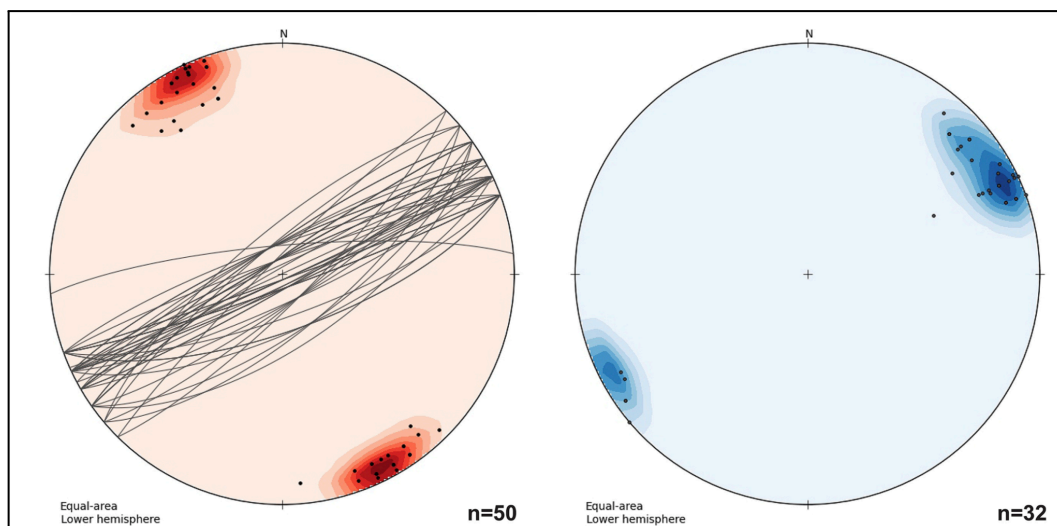


Figura 11. Estereogramas com as orientações preferenciais da foliação milonítica (A) e lineação milonítica (B). Fonte: Modificado de Giraldo *et al.* (2019).

#### 3.2.4. Metamorfismo

No que se refere ao caráter metamórfico da Zona de Cisalhamento Além Paraíba (ZCAP), podem ser identificadas duas fases principais de metamorfismo. A primeira, associada ao pico metamórfico, está relacionada à formação de rochas metamórficas em fácies granulito, enquanto a segunda corresponde à formação da maioria dos milonitos, em fácies anfibolito. De acordo com Giraldo *et al.* (2019), por meio de idades U-Pb de sobrecrescimento de zircão, o pico metamórfico da ZCAP ocorreu entre 595 e 590 Ma. Além disso, a análise da química mineral em paragneisses e ortogneisses permitiu determinar que as condições desse pico estavam entre aproximadamente 724 °C e 825 °C, com pressões variando de ~8,3 a 9,8 kbar. A partir das idades de monazita U-Pb obtidas em rochas miloníticas, foi possível concluir que, após o pico metamórfico, a região permaneceu sob condições de fácies anfibolito, o que favoreceu a continuidade da (re)cristalização até aproximadamente 554 Ma.



## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1. Preparação e separação mineral das amostras

A primeira fase da preparação de amostras envolve a fragmentação em frações adequadas para análise. Para isso, são utilizados equipamentos como marretas, britadores de mandíbulas e moinhos de disco. Após a desagregação, as amostras são peneiradas em um agitador suspenso utilizando um conjunto de peneiras dispostas da seguinte maneira: uma base fechada na parte inferior, uma malha de 63  $\mu\text{m}$  e uma peneira de 250  $\mu\text{m}$ . Esse procedimento assegura a separação da fração de interesse, que está entre 63 e 250  $\mu\text{m}$ .

As etapas seguintes têm como objetivo obter um concentrado composto exclusivamente por apatitas. Para isso, são realizados os seguintes procedimentos:

- I. Pré-concentração de minerais pesados utilizando uma mesa agitadora do tipo Wilfley para separação baseada na densidade;
- II. Concentração de minerais de baixa susceptibilidade magnética (*i.e.*, apatitas e zircões) através da separação magnética promovida por imã de mão e pelo Separador Frantz, onde ocorre uma separação progressiva pela interação dos grãos com campos magnéticos induzidos por uma corrente elétrica incremental no equipamento;
- III. Concentração de minerais através da utilização de líquidos densos, líquidos com densidades conhecidas e controladas, que devem estar entre as densidades dos minerais a serem separados. Em um primeiro momento utiliza-se Politungstato de Sódio (SPT), com densidade de 2,87 g/cm<sup>3</sup>, para distinguir minerais pesados (*i.e.*, apatitas e zircões) de minerais leves (*i.e.*, quartzo e feldspato),
- IV. Concentração de apatitas através do líquido denso Di-iometano (DI), com densidade de 3,33 g/cm<sup>3</sup>. Ao final deste procedimento são obtidos dois concentrados: um de apatita e outro de zircão.

Deve-se ressaltar que o concentrado obtido após a utilização do SPT já apresentava condições adequadas para a etapa seguinte de seleção das apatitas, tornando desnecessário o uso do DI neste estudo.

Os procedimentos de preparação e separação mineral das amostras foram realizados no Laboratório de Termocronologia de Baixa Temperatura (CPGeo-LTC) do Instituto de Geociências (IGc).

#### **4.2. Montagem das amostras**

Para a análise de datação por TF, tanto pelo método EDM quanto pelo método LA-ICP-MS, são utilizados apenas os melhores grãos de apatita. Assim, o concentrado de apatita e zircão obtido na separação mineral passa por uma seleção manual, na qual são avaliados critérios como tamanho, forma e ausência de inclusões nos grãos minerais. Esta etapa, assim como as demais do método EDM, foram realizadas no Laboratório de Termocronologia de Baixa Temperatura (CPGeo-LTC) do Instituto de Geociências (IGc). Os grãos selecionados são distribuídos em uma lâmina de vidro petrográfico e, durante esta etapa, deve-se garantir que todos estejam orientados de maneira adequada, com o eixo C dos cristais alinhados paralelamente à lâmina. Após a distribuição das apatitas, as pastilhas de cada amostra são montadas através do preenchimento de moldes com resina epóxica.

Com a resina endurecida, as amostras passam pelo polimento para expor as superfícies internas dos grãos de apatita. O topo das pastilhas, onde as apatitas estão localizadas, é polido usando um disco giratório (Poletrix) e diferentes líquidos abrasivos (*i.e.*, pasta de alumina). Esse polimento garante a adequada exposição das superfícies internas dos grãos de apatita para a análise subsequente. Por fim, buscando revelar os traços de fissão espontâneos já presentes nos grãos, cada pastilha é submetida a um ataque químico com ácido nítrico (5,5 M HNO<sub>3</sub>) a 21 ± 0,5 °C por 20 ± 1 segundos, de acordo com o protocolo estabelecido por Donelick *et al.* (2005).

#### **4.3. Aquisição de dados termocronológicos - Método EDM**

##### **4.3.1. Montagem e irradiação das amostras**

No método do Detector Externo (EDM), as amostras passam por uma etapa de irradiação em um reator nuclear, exigindo uma montagem adequada de pilhas de irradiação. Nessas pilhas, os pares pastilha-mica são dispostos, acompanhados de dois vidros-padrão, que devem ser posicionados em cada extremidade. Esses vidros, que possuem teores de U conhecidos, são utilizados para monitorar a fluência de nêutrons no reator e são conhecidos como vidros de dosimetria.

Após a montagem, as pilhas foram enviadas para o reator nuclear do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), onde foram submetidas à irradiação com nêutrons termalizados, com energia cinética em torno de 0,025 eV. É fundamental conhecer

a natureza do fluxo de nêutrons que atinge as amostras, uma vez que a relação U/Th do material em análise é variável e desconhecida. Após a irradiação, as pastilhas devem ser armazenadas com proteção de chumbo até que os níveis de radiação sejam seguros para manuseio. Ao descompactar as amostras, cada par de pastilha e mica é montado em uma lâmina de vidro petrográfico, de modo que fossem a imagem espelhada um do outro.

#### 4.3.2. *Cálculo Zeta e Dosimetria*

Para determinar a idade de traços de fissão em uma amostra, é necessário estimar uma constante de calibração empírica a partir de amostras de idade conhecida, chamadas de amostras-padrão. Essa constante, denominada zeta ( $\zeta$ ), tem como objetivo estimar parâmetros da irradiação que são difíceis de medir. Para seu cálculo é essencial distinguir os traços de outras feições presentes nos cristais dos minerais padrão e realizar a contagem dos seguintes elementos: (I) traços espontâneos ( $N_s$ ); (II) traços induzidos ( $N_i$ ), na mesma área da mica correspondente à área considerada para a contagem do  $N_s$ ; e (III) traços do vidro de dosimetria utilizado na irradiação da amostra-padrão, neste caso, o vidro CN-1.

Os dados obtidos nas três contagens são processados e inseridos no *software* TrackKey, permitindo o cálculo da constante de calibração zeta necessária para determinar a idade-padrão de cada amostra. Esse processo é repetido para várias amostras-padrão até que se obtenha um valor constante para zeta. Ao final, é realizada uma média aritmética ponderada dos valores de zeta e seus respectivos erros (apêndice A).

A contagem dos traços do vidro de dosimetria deve ser realizada tanto para as amostras-padrão quanto para as amostras irradiadas. Essa contagem é fundamental, pois o fluxo de nêutrons que atinge cada par de pastilha-detector varia conforme a posição dentro da pilha, com o fluxo se movendo da base para o topo. Os dados obtidos nesta etapa foram adquiridos a partir do vidro-padrão CN1 (com 39,8 ppm de U) (apêndice B).

#### 4.3.3. *Contagem dos traços de fissão*

A contagem dos traços de fissão é uma etapa fundamental para a determinação das idades. Para garantir a precisão, é necessário referenciar as amostras de forma que a platina automática do microscópio possa se mover entre um grão e a posição exata da sua imagem composta pelos traços induzidos na mica. Esse procedimento é realizado no *software* FTStage, resultando em arquivos de coordenadas com a extensão “.FT”.

Com as amostras devidamente referenciadas, os melhores grãos são selecionados para a contagem, que envolve dois procedimentos principais:

- I. Contagem dos traços espontâneos nos grãos de apatita, onde se considera a quantidade e o tamanho ( $D_{par}$ ) dos traços. Nesta etapa, devem ser medidos os traços confinados existentes.
- II. Contagem dos traços induzidos na mica, que deve levar em conta apenas a quantidade na mesma área utilizada na etapa anterior.

#### 4.3.4. Cálculo da idade AFT

O cálculo das idades AFT foi realizado por meio da relação entre a densidade de traços espontâneos observados no grão e a densidade de traços induzidos no detector externo. Para definir a idade FT de cada amostra, foi utilizada uma tabela padrão chamada “*FT Age Calculation*”, nela foram inseridos os dados obtidos na dosimetria — ND e  $RhoD$  —, o valor de zeta, e os dados coletados durante a contagem de traços, que incluem:  $N_s$  (traços espontâneos),  $N_A$  (área de contagem),  $N_i$  (traços induzidos),  $D_{par}$  (diâmetro dos traços) e traços confinados. Esses parâmetros são essenciais para o cálculo preciso das idades e estão disponíveis no apêndice C.

### 4.4. Aquisição de dados termocronológicos - Método LA-ICP-MS

#### 4.4.1. Montagem e referência das amostras

Para a aplicação do método LA-ICP-MS, é necessário realizar uma montagem específica das amostras, permitindo a análise das pastilhas por meio de um microscópio óptico. Este microscópio deve contar com uma platina automática integrada ao programa FTStage, além de uma câmera conectada ao *software* Olympus Stream Essentials. Esses recursos são fundamentais para o registro fotográfico dos grãos avaliados e para a criação de arquivos de coordenadas das amostras. A montagem das amostras é feita fixando as pastilhas, com os grãos expostos voltados para cima, em lâminas de microscopia.

Por fim, a última etapa antes da aquisição dos dados é o referenciamento das amostras, realizado com o *software* FTStage. Inicialmente, cria-se um arquivo de coordenadas para cada pastilha analisada. Em cada arquivo “.FT” é realizada a identificação de todos os grãos presentes na pastilha, esse sistema de coordenadas é utilizado para gerar um mapa base do posicionamento das amostras (figura 12A), facilitando a identificação dos grãos durante a ablação. Além disso, é necessário capturar fotografias das amostras, criando um mosaico (figura 12B) que é utilizado em conjunto com o mapa base.

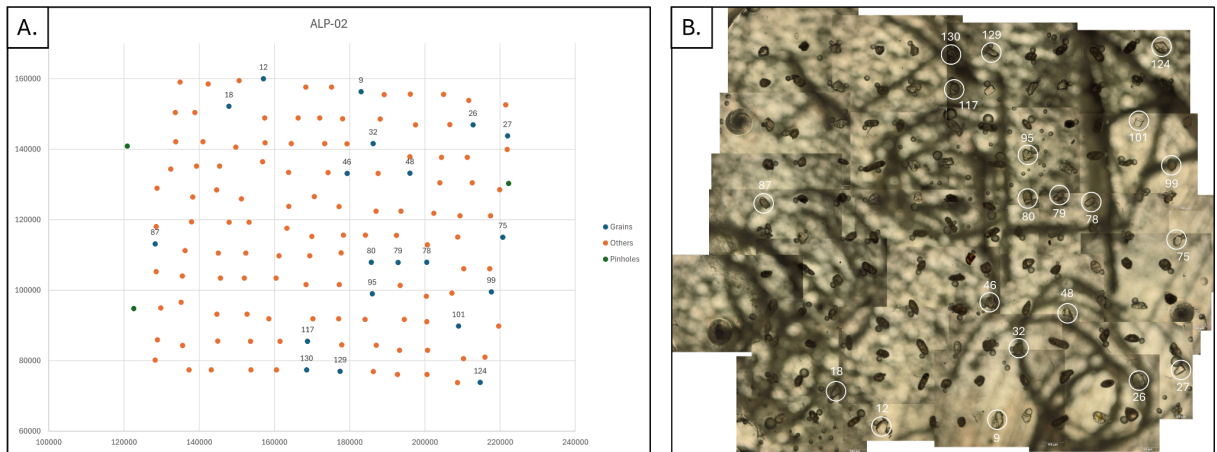


Figura 12. (A) Mapa base do sistema de coordenadas da amostra ALP-04; e (B) Mosaico da amostra ALP-04.

#### 4.4.2. Contagem dos traços espontâneos

Após a preparação das amostras no *software* FTStage, os melhores grãos são selecionados para análise. Esses grãos devem ser registrados em uma planilha (apêndice D) com as seguintes informações:

- Número de traços de fissão espontâneos: Contados na maior superfície do grão;
- Tamanho dos traços (DPAR): Obtido pela medição de pelo menos 4 traços;
- Área da contagem: Determinada através do *software* Olympus Stream Essentials.

Além disso, deve ser capturada uma fotografia do grão, com a área analisada claramente delimitada, conforme ilustrado na figura 13.

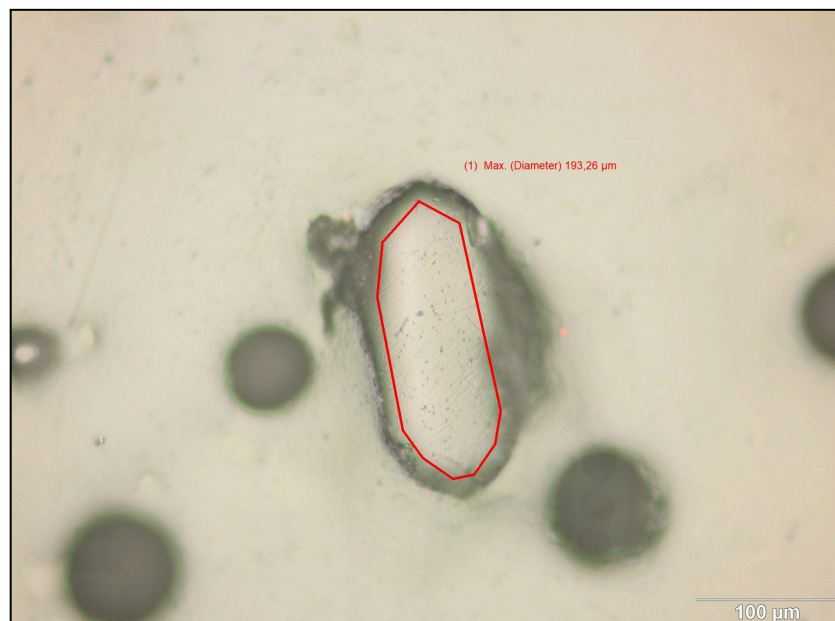


Figura 13. Fotografia do grão #36 da amostra ALP-06.

#### 4.4.3. Ablação a laser, espectrometria de massas e redução dos dados

A preparação para a etapa de ablação das amostras envolve a montagem das pastilhas em um suporte específico para o laser acoplado a um espectrômetro de massa e a marcação dos pontos a serem analisados no *software* "Photon Machines - Chromium 24 - Laser Ablation System". As medições de urânio são realizadas usando LA-ICP-MS nas mesmas áreas e grãos que foram utilizados para a contagem dos traços de fissão espontâneos. Isso possibilita a comparação entre a densidade de traços e o teor de  $^{238}\text{U}$ .

As análises químicas foram realizadas no Núcleo de Apoio à Pesquisa Geoanalítica do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, utilizando um laser CETAC LSX-213 G2+ com as condições destacadas na tabela 1.

Laser CETAC LSX-213 G2+	
Comprimento de onda do feixe de laser	25 $\mu\text{m}$
Fluxo de energia	9,71 J/cm <sup>2</sup>
Taxa de repetição do disparo	15 Hz
Diâmetro do feixe de laser	40 $\mu\text{m}$
Potência do laser	75%
Tempo total	70 s (30 s em <i>background</i> e 40 s em sinal)

Tabela 1. Condições otimizadas de operação do laser utilizado na etapa de LA-ICP-MS.

O material ablacionado foi introduzido em um Thermo Scientific iCAP Q, que apresenta suas condições destacadas na tabela 2. As concentrações de  $^{238}\text{U}$  foram calibradas em relação aos padrões NISTSRM610, Durango, MAD, MM, MT7 e DG.

Thermo Scientific iCAP Q	
Potência do plasma	1550 W
Fluxo auxiliar	0,8 L/min
Fluxo do nebulizador	0,75 L/min
Fluxo de resfriamento	14 L/min
Lente de extração	-118,2 V

Tabela 2. Condições otimizadas de operação do LA-ICP.

Como indicado na Tabela 1, o tempo total para a aquisição de dados é de 70 segundos. Este período inclui um intervalo inicial de 30 segundos destinado à avaliação dos

parâmetros e à criação de um *background* antes do início da ablação. Após essa etapa, a ablação é iniciada e os sinais da análise química são captados, sendo registrados em intensidades em contagens por segundo. As respostas obtidas foram processadas pelo *software* GLITTER! v.4, que eliminou o sinal de fundo e converteu as intensidades em concentrações. Essas concentrações estão disponíveis no apêndice E do presente relatório.

#### 4.4.4. Cálculo da idade AFT

O cálculo das idades AFT foi realizado através da relação entre a densidade de traços espontâneos observados no grão, obtida durante a contagem dos traços, com o teor de urânio medido em ppm por meio do método LA-ICP-MS. Além disso, foi considerado um valor de zeta ( $\zeta$ ) análogo ao tradicionalmente empregado no método EDM. O valor de  $\zeta_{\text{LA-ICP-MS}}$  foi determinado usando uma amostra padrão Durango.

#### 4.5. Modelagem dos dados AFT

A modelagem dos dados termocronológicos obtidos através do método EDM foi realizada com o *software* HeFTy (Ketcham et al., 2005), no qual foram incluídos os dados da dosimetria — ND e RhoD —, o valor de zeta e os valores obtidos durante a contagem de traços — Ns, Ni, Dpar e comprimento de traços confinados; nesta etapa, o parâmetro Na não é utilizado. Outros parâmetros considerados pelo *software* incluem: (I) incerteza de 1 SE; (II) modelo de reaquecimento proposto por Ketcham *et al.* (2007); e (III) projeção do eixo C conforme Ketcham *et al.* (2007, 5.5M). Para os dados obtidos através do método LA-ICP-MS, o mesmo *software* foi utilizado. No entanto, os dados inseridos foram o  $N_s$ , área de contagem em  $\text{cm}^2$ ,  $U_{\text{ppm}}$ ,  $\text{erro}_{U_{\text{ppm}}}$ , Dpar e comprimento de traços confinados.

Após a inserção dos dados no HeFTy, seleciona-se a modelagem inversa para obter a história térmica de cada amostra. Essa etapa utiliza o método de investigação Monte Carlo, com o objetivo de gerar 50 trajetórias térmicas distintas, representadas pela coloração rosa, a partir do parâmetro estatístico GOF (*Goodness of Fit*, Ketcham *et al.*, 2005).

## 5. RESULTADOS

### 5.1. Idade AFT - EDM

Foi realizada a irradiação de 7 amostras: duas ALP-01, duas ALP-03, uma ALP-04 e duas ALP-09. As amostras duplicadas foram coletadas para garantir que, caso houvesse a perda do detector externo de uma das amostras, a outra ainda poderia ser analisada. Como resultado, foram analisadas as amostras ALP-03B, ALP-04A e ALP-09A. As amostras ALP-01 não apresentaram grãos de apatita em quantidade suficiente e com qualidade adequada para a datação, razão pela qual não foram contabilizadas.

No total foram realizadas 84 datações *single-grain*: 27 para as amostras ALP-03 e ALP-04A e 30 para a amostra ALP-09A. As idades obtidas foram de  $37,6 \pm 3,8$  Ma,  $42,1 \pm 2,7$  Ma e  $53,8 \pm 2,5$  Ma para as amostras ALP-03B, ALP-04A e ALP-09A, respectivamente. Na tabela 3 estão dispostos os dados termocronológicos obtidos para cada amostra.

ID	ALP-03B	ALP-04A	ALP-09A
<b>Descrição da rocha</b>	Biotita-Plagioclásio Gnaiss	Biotita-Plagioclásio Gnaiss tonalítico	Granada-Biotita Gnaiss granulítico
<b>UTM N</b>	7612475.00 m S	7582354.00 m S	7599159.00 m N
<b>UTM E</b>	804116.00 m E	748190.00 m E	799892.00 m E
<b>n<sub>GRÃOS</sub></b>	27	27	30
<b>N<sub>S</sub></b>	136	433	1149
<b>N<sub>I</sub></b>	501	1409	2886
<b>Rho-S (traços/cm<sup>2</sup>)</b>	1,01 E+05	2,78 E+05	7,42 E+05
<b>Idade <i>pooled</i> (Ma)</b>	37,6	42,1	53,8
<b>Erro<sub>IDADE</sub> ((Ma) (1-σ))</b>	3,8	2,7	2,5
<b>P(χ<sup>2</sup>)</b>	0,28	8,4 E-04	1,3 E-07
<b>Dpar</b>	2,13	2,46	2,07

Tabela 3. Dados termocronológicos e idade central calculada através do método EDM.

A modelagem dos dados foi realizada inserindo as informações mencionadas anteriormente no *software* HeFTy (Ketcham, 2005), com a seleção dos parâmetros detalhados no tópico 4.5. Em seguida, aplicou-se a modelagem inversa dos dados utilizando o método de investigação Monte Carlo, com a condição de gerar 50 trajetórias térmicas



distintas e adequadas, a partir do parâmetro estatístico GOF (*Goodness of Fit*, conforme Ketcham *et al.*, 2005). Além disso, foi determinado um intervalo inicial de temperatura e tempo para o modelo, com a implementação de uma evolução gradual do processo de resfriamento.

Os modelos gerados estão apresentados nas figuras 14, 15 e 16, onde é possível identificar um envelope rosa que destaca as trajetórias consideradas boas, um envelope verde que indica as demais trajetórias consideradas aceitáveis, uma linha preta que representa a melhor trajetória térmica e uma linha azul que corresponde à trajetória média de todos os bons resultados. Também é possível observar o intervalo condicionado, delimitado entre 600 e 500 Ma e entre 250 e 300 °C, o qual representa a permanência em temperaturas superiores à temperatura de fechamento do sistema TFA durante a Orogênese Brasileira. Embora o pico do metamorfismo tenha ocorrido em temperaturas superiores a 300 °C, esse intervalo foi definido para fins de modelagem e visualização, não impactando a história térmica recente, que é o foco deste estudo.

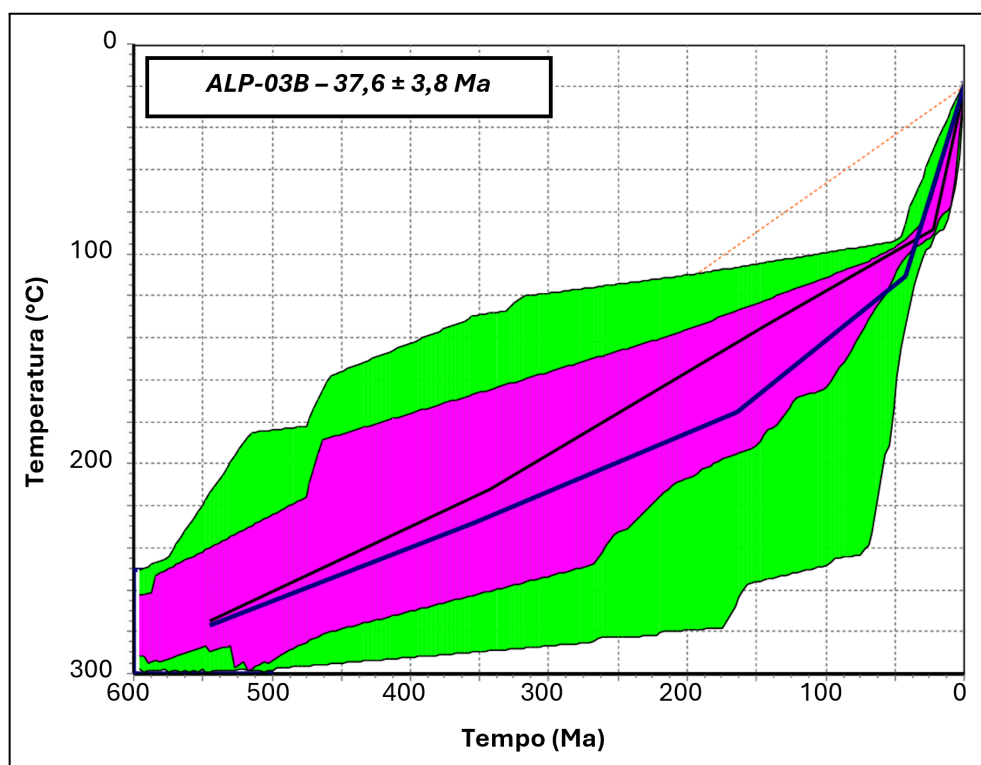


Figura 14. Modelo calculado através da modelagem inversa no *software* HeFTy (Ketcham, 2005). Neles estão dispostos os envelopes com as possíveis trajetórias térmicas para a amostra ALP-03B.

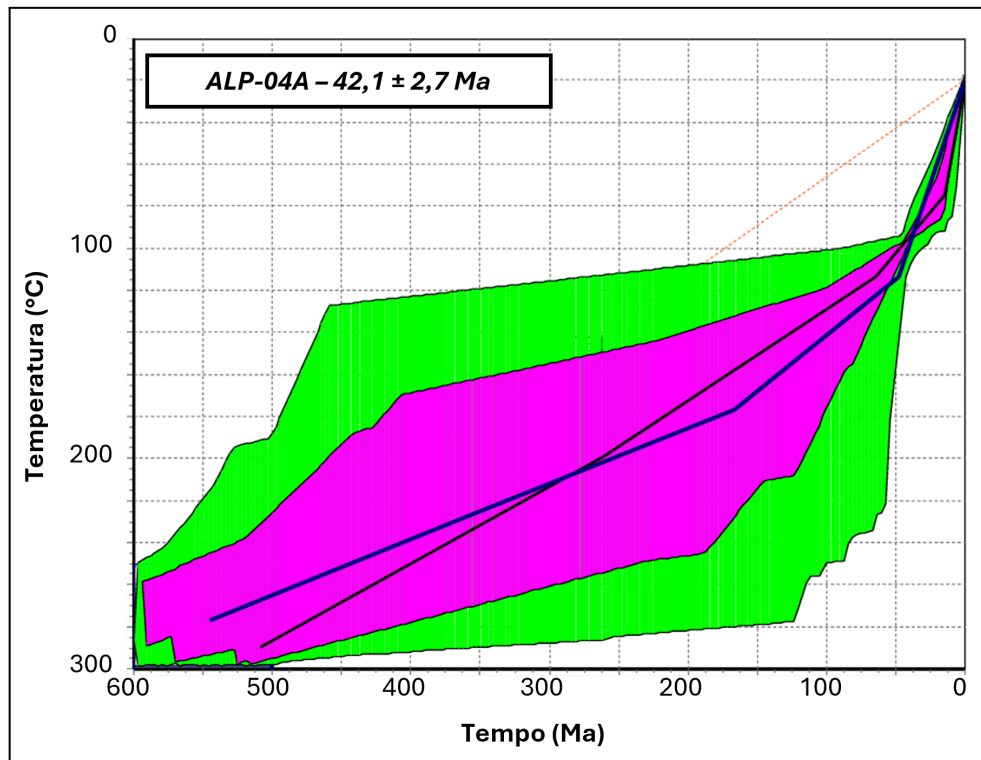


Figura 15. Modelo calculado através da modelagem inversa no *software* HeFTy (Ketcham, 2005). Neles estão dispostos os envelopes com as possíveis trajetórias térmicas para a amostra ALP-04A.

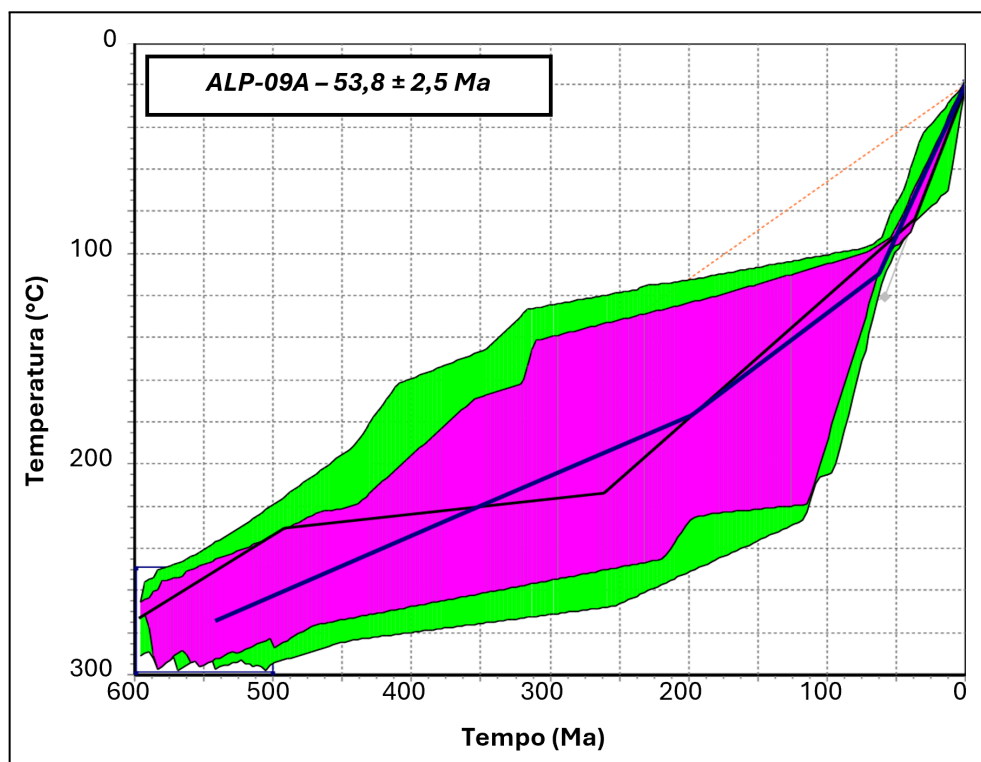


Figura 16. Modelo calculado através da modelagem inversa no *software* HeFTy (Ketcham, 2005). Neles estão dispostos os envelopes com as possíveis trajetórias térmicas para a amostra ALP-09A.

Buscando verificar se o cálculo da idade utilizando o método *single-grain age* seria o mais adequado, foi realizado o teste de  $\chi^2$  (Green, 1981). O *site* IsoplotR foi utilizado para

gerar gráficos no estilo *radial-plot*, permitindo visualizar a dispersão das idades de cada grão individualmente. Além disso, o próprio *site* realiza o cálculo do  $\chi^2$ . Como mostrado nas figuras 17, 18 e 19, todas as amostras apresentaram um valor de  $\chi^2$  inferior ao nível crítico de 5%.

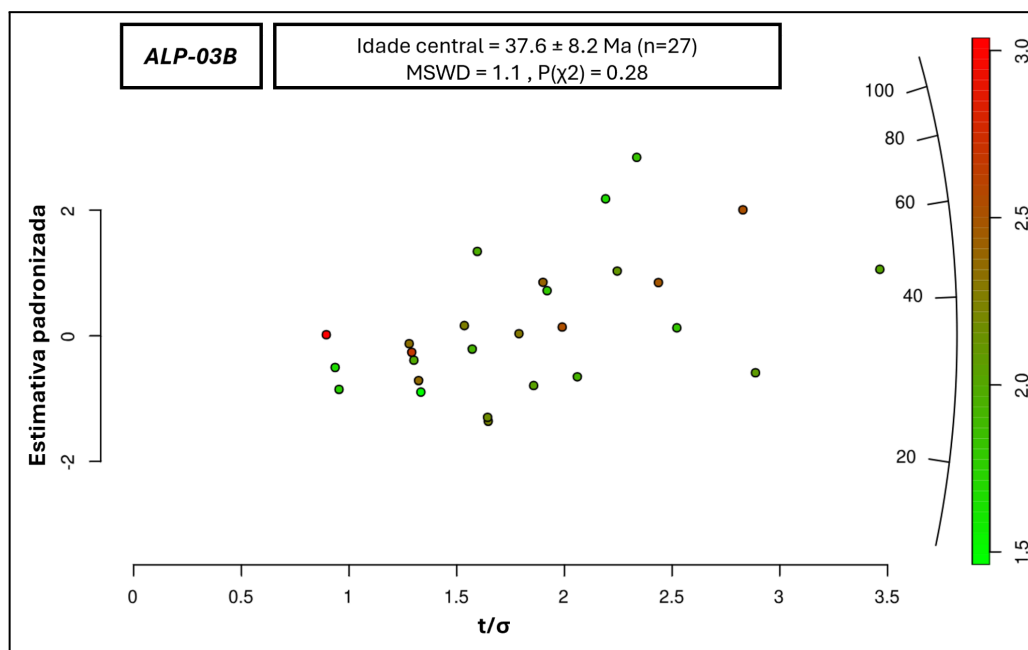


Figura 17. *Radial-plot* criado através do *site* IsoplotR para a amostra ALP-03B.

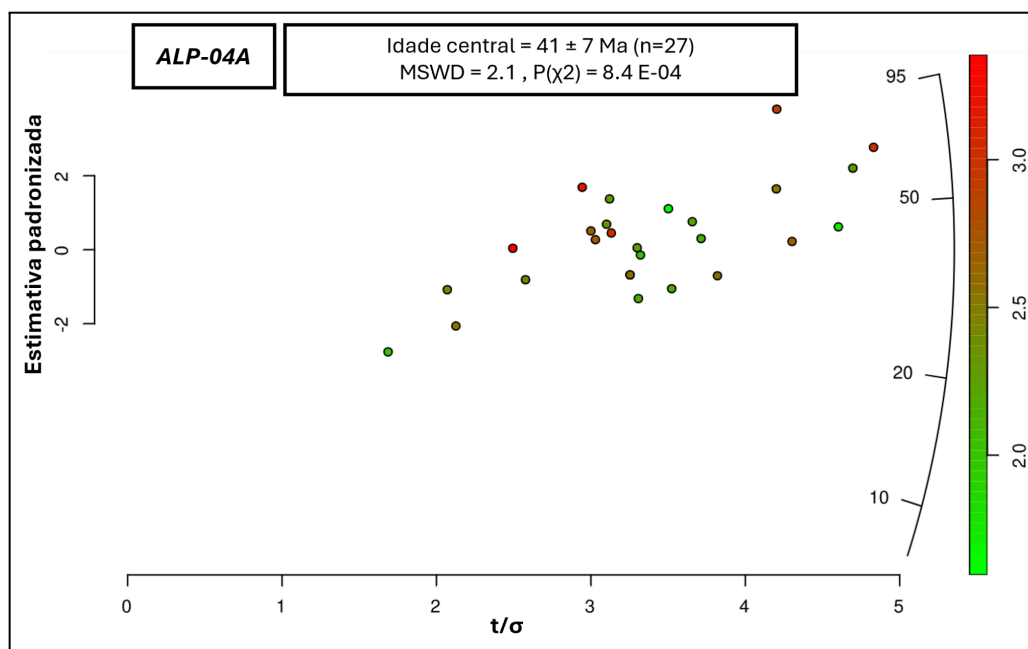


Figura 18. *Radial-plot* criado através do *site* IsoplotR para a amostra ALP-04A.

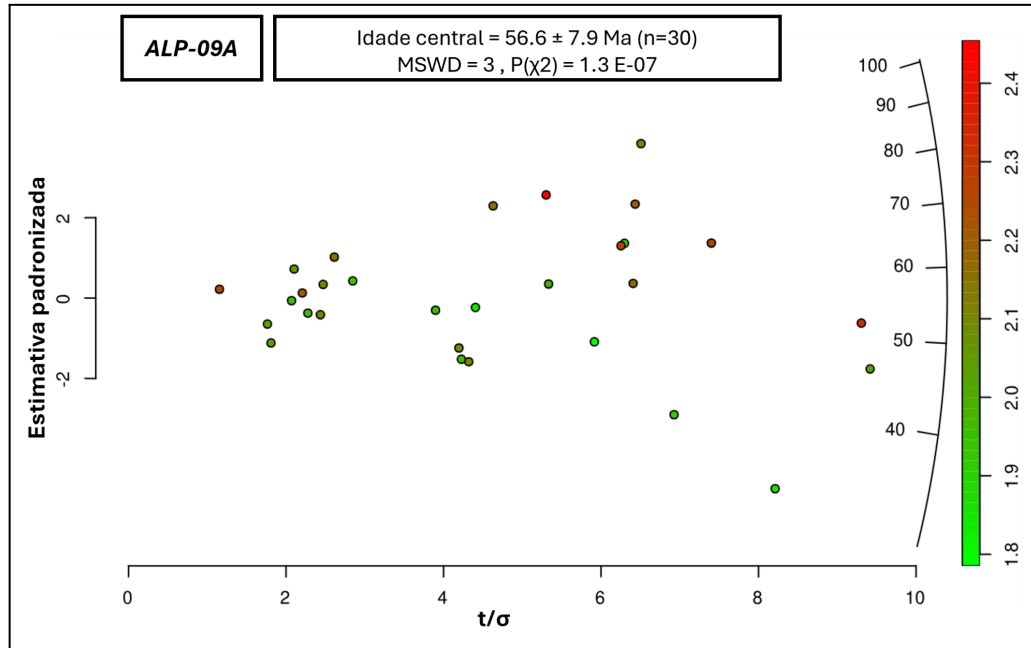


Figura 19. *Radial-plot* criado através do site IsoplotR para a amostra ALP-09A.

## 5.2. Idade AFT - LA-ICP-MS

Visando uma maior agilidade na obtenção dos dados termocronológicos, optou-se por realizar parte das datações utilizando o método LA-ICP-MS. Esta escolha foi motivada pela implementação de um método alternativo que, diferentemente do EDM, não é afetado pelo longo período de quarentena das amostras após a irradiação. Além disso, a amostra ALP-04 foi analisada através dos dois métodos, permitindo uma comparação entre os resultados de cada um.

Desta forma, foram realizadas 58 datações *single-grain*: 18 para a amostra ALP-04, 20 para a amostra ALP-06 e 20 para a amostra ALP-02. As idades obtidas foram de  $41,79 \pm 2,35$  Ma,  $42,49 \pm 2,8$  Ma e  $43,10 \pm 2,08$  Ma para as amostras ALP-02, ALP-04B e ALP-06 (tabela 4), respectivamente.

ID	ALP-02	ALP-04B	ALP-06
<b>Descrição da rocha</b>	Granada-Biotita Gnaiss milonítico	Biotita-Plagioclásio Gnaiss tonalítico	Milonito de composição granítica
<b>UTM N</b>	7612006.00 m S	7582354.00 m S	7611653.00 m S
<b>UTM E</b>	797932.00 m E	748190.00 m E	790264.00 m E
<b>NS</b>	2597	443	3799
<b>Área</b>	3.65E-03	2.24 E-03	3.30E-03
<b>RhoS</b>	7.17E+05	1.83E+05	1.13E+06

ID	ALP-02	ALP-04B	ALP-06
U (ppm)	24.15	6.17	37.85
Erro (U (ppm))	0.36	0.09	0.57
Idade <i>pooled</i> (Ma)	41.79	42.49	43,1
Erro <sub>IDADE</sub> ((Ma) (1- $\sigma$ ))	2.35	2.80	4.5
P( $\chi^2$ )	8,8 E-08	0	0
Dpar	2.13	1.98	2.64
$\sigma_{Dpar}$	0.29	0.18	0.41

Tabela 4. Dados termocronológicos e idade central calculada através do método LA-ICP-MS.

Destaca-se que as idades de 42 Ma, dentro da incerteza, obtidas para as amostras do mesmo afloramento (ALP-04A, determinada pelo método EDM, e ALP-04B, determinada pelo método ICPMS), validam a abordagem adotada.

A modelagem dos dados foi realizada inserindo as informações mencionadas anteriormente no *software* HeFTy, seguido dos mesmos passos realizados para a modelagem dos dados EDM. Os modelos gerados podem ser observados nas figuras 20, 21 e 22, apresentando os mesmos elementos do tópico anterior.

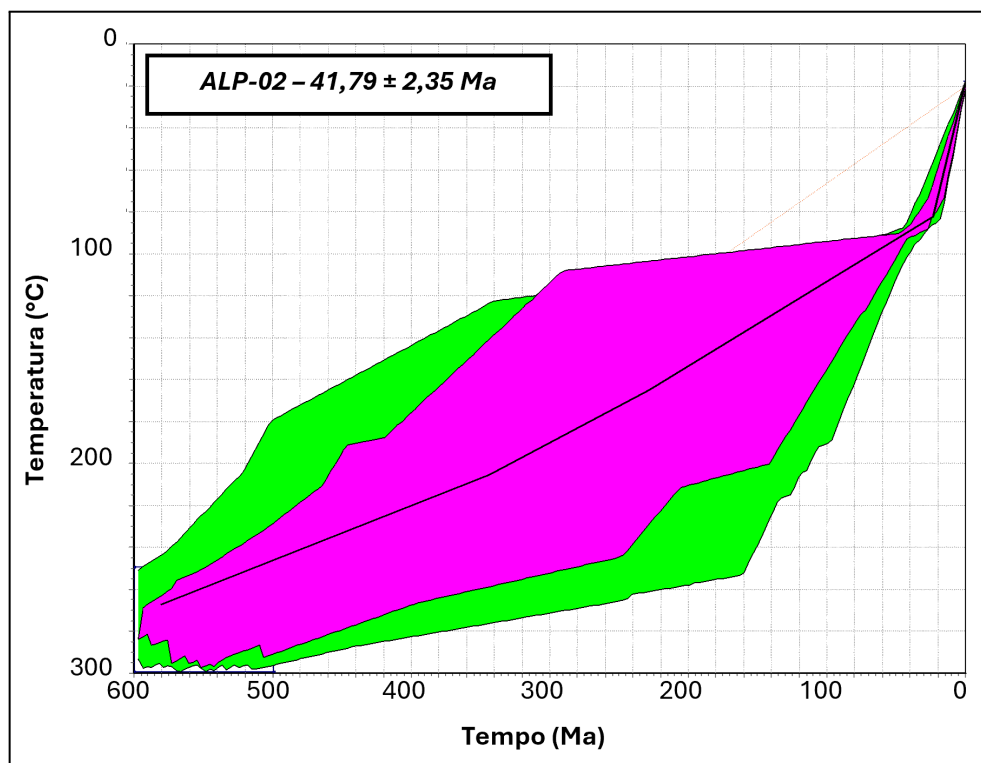


Figura 20. Modelo calculado através da modelagem inversa no *software* HeFTy (Ketcham, 2005). Neles estão dispostos os envelopes com as possíveis trajetórias térmicas para a amostra ALP-02.

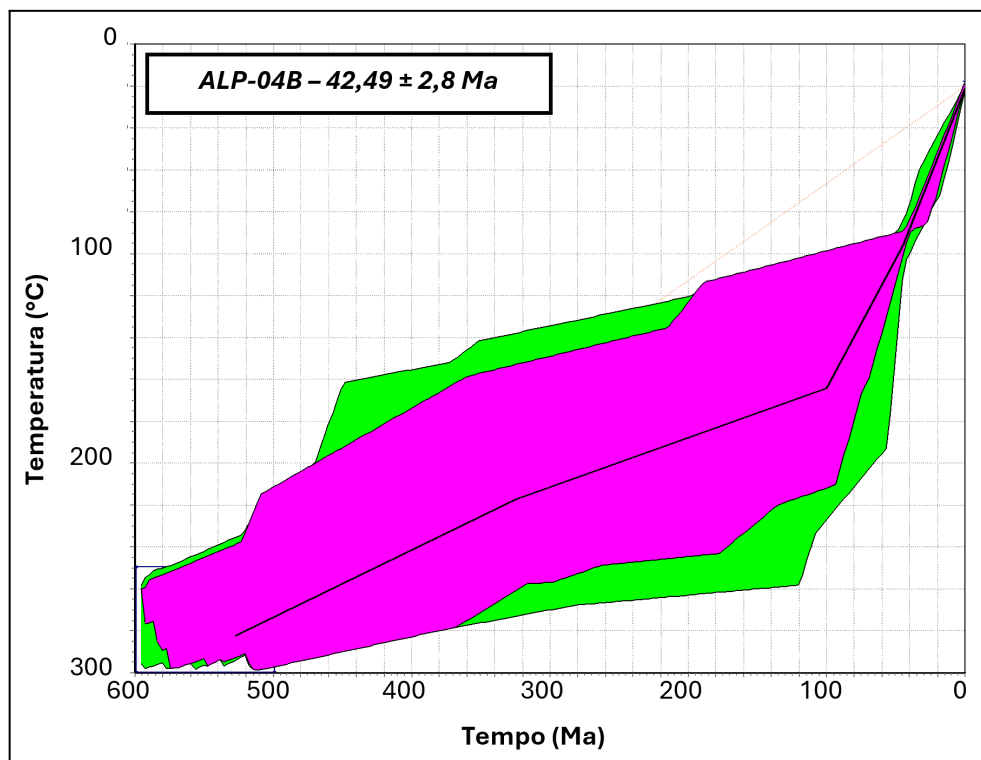


Figura 21. Modelo calculado através da modelagem inversa no *software* HeFTy (Ketcham, 2005). Neles estão dispostos os envelopes com as possíveis trajetórias térmicas para a amostra ALP-04B.

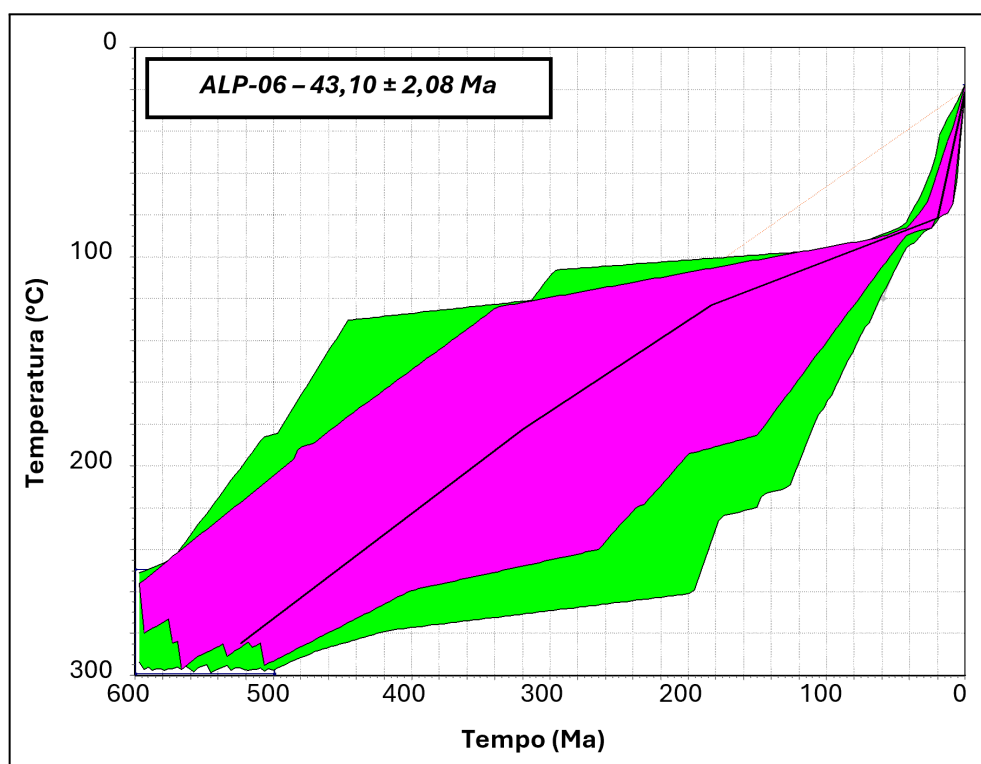


Figura 22. Modelo calculado através da modelagem inversa no *software* HeFTy (Ketcham, 2005). Neles estão dispostos os envelopes com as possíveis trajetórias térmicas para a amostra ALP-06.

O teste de  $\chi^2$  (Green, 1981) foi novamente realizado utilizando o *site* IsoplotR. Os gráficos no estilo *radial-plot*, apresentados nas figuras 23, 24 e 25, mostram que todas as

amostras apresentaram valores de  $\chi^2$  inferiores ao nível crítico de 5% e idades centrais discordantes.

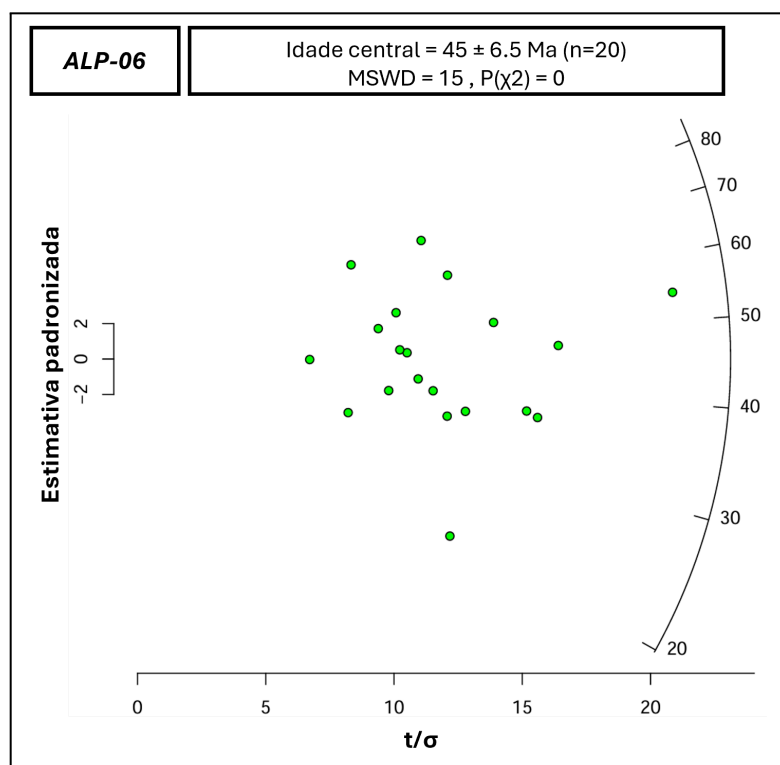


Figura 23. *Radial-plot* criado através do site IsoplotR para a amostra ALP-06.

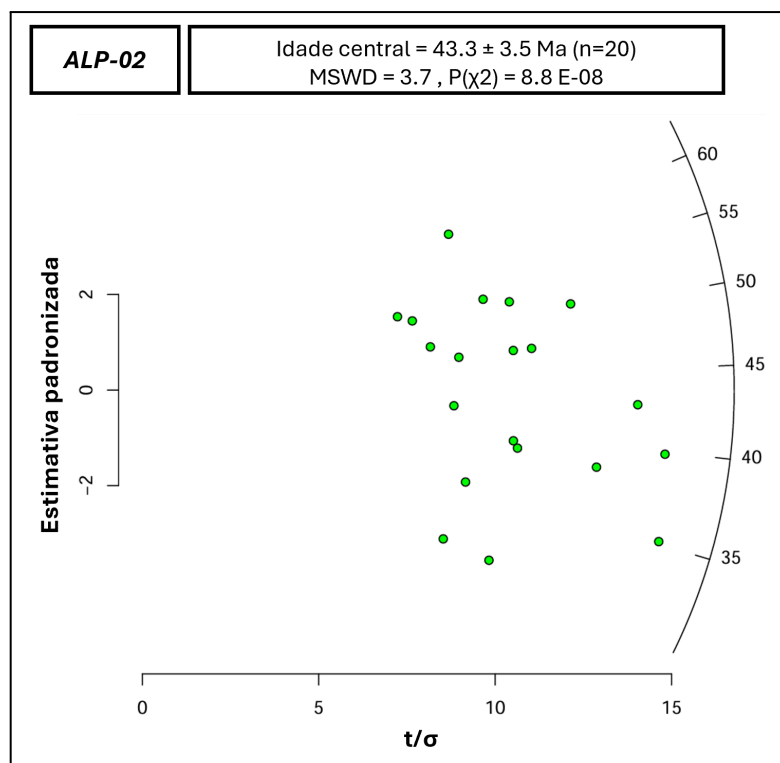


Figura 24. *Radial-plot* criado através do site IsoplotR para a amostra ALP-02.

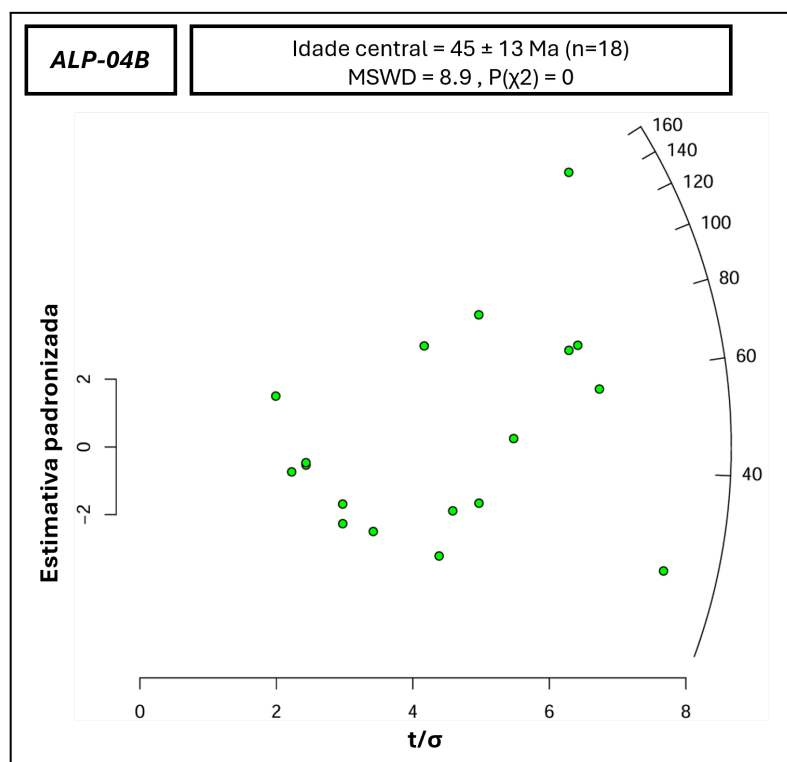


Figura 25. Radial-plot criado através do site IsoplotR para a amostra ALP-04B.

### 5.3. Geoquímica

A datação por traços de fissão utilizando o método LA-ICP-MS oferece a vantagem adicional de fornecer informações detalhadas sobre a química das amostras analisadas. Assim, as informações obtidas sobre os elementos terras raras foram utilizadas para determinar a composição do protólito das rochas estudadas.

Utilizando o códigoR desenvolvido por O'Sullivan *et al.* (2020), foi realizada uma análise da relação entre a soma dos elementos terras raras leves (LREE) e a razão estrôncio/ítrio (Sr/Y). O resultado dessa análise gerou *biplots* que foram utilizados para categorizar o protólito dos grãos de apatita. Observando a figura 26, destaca-se que as amostras ALP-02 e ALP-04 apresentam um protólito composto por granitóides máficos do tipo I e/ou rochas ígneas máficas, enquanto a amostra ALP-06 apresenta como protólito uma rocha ígnea rica em álcalis.



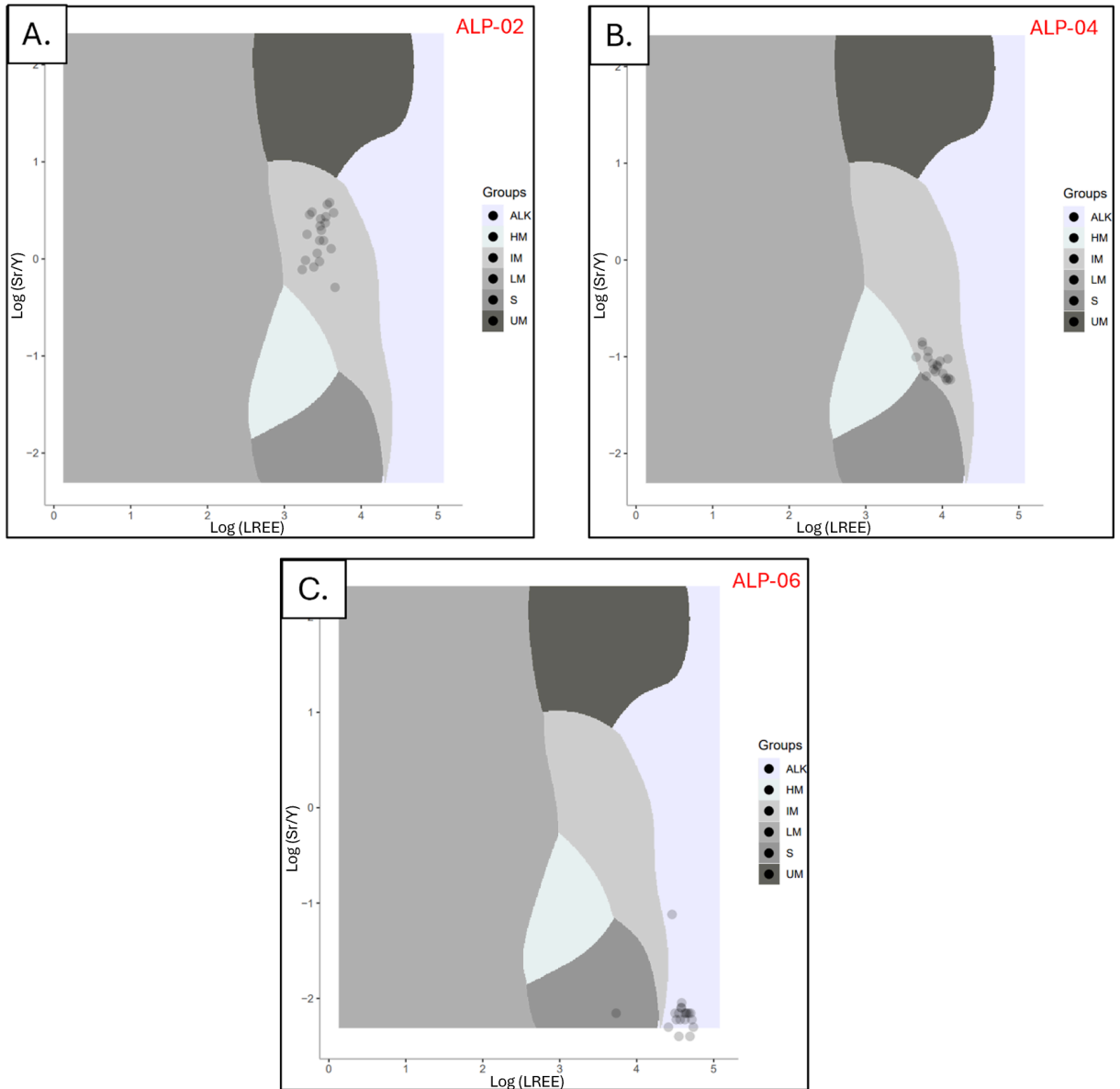


Figura 26. (A, B, C) Biplots relacionando a quantidade de LREE e a relação Sr/Y. Abreviações para os grupos: ALK = Rochas ígneas ricas em álcalis; IM = Granitóides máficos do tipo I e rochas ígneas máficas; LM = Rochas metamórficas e metassomáticas de baixo e médio grau; HM = Fusões parciais, leucosomas e rochas metamórficas de alto grau; S = Granitóides do tipo S e tipos I 'félsicos' de alto índice de saturação de alumínio (ASI); UM = Rochas ultramáficas incluindo carbonatitos, lherzolitos e piroxenitos .

## 6. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

As idades obtidas tanto pelo método EDM quanto pelo método LA-ICP-MS indicam um resfriamento cenozóico na área de estudo de aproximadamente 70 a 80 °C. Em outras palavras, as rochas, que estavam a temperaturas de 90-100 °C no Eoceno, atingiram as temperaturas atuais da superfície, entre 20-30 °C. Considerando a ausência de eventos magmáticos significativos na região, esse resfriamento é interpretado como resultado de exumação. Com base em um gradiente geotérmico de 25°C/km, esse resfriamento corresponderia a uma exumação de aproximadamente 2,8 a 3,2 km desde o Eoceno.

Considerando a disposição espacial das idades (figura 27), observa-se que, de forma geral, as idades no bloco NW variam entre 37 e 43 Ma, enquanto a idade da amostra do bloco SW é de 53 Ma. A partir dessa análise, pode-se interpretar que: (I) a região passou por um soerguimento tectônico, evidenciado pela exumação de 2,8 a 3,2 km desde o Eoceno; e (II) houve uma reativação da componente inversa da zona de cisalhamento, promovendo um soerguimento diferencial entre os blocos da ZCAP.

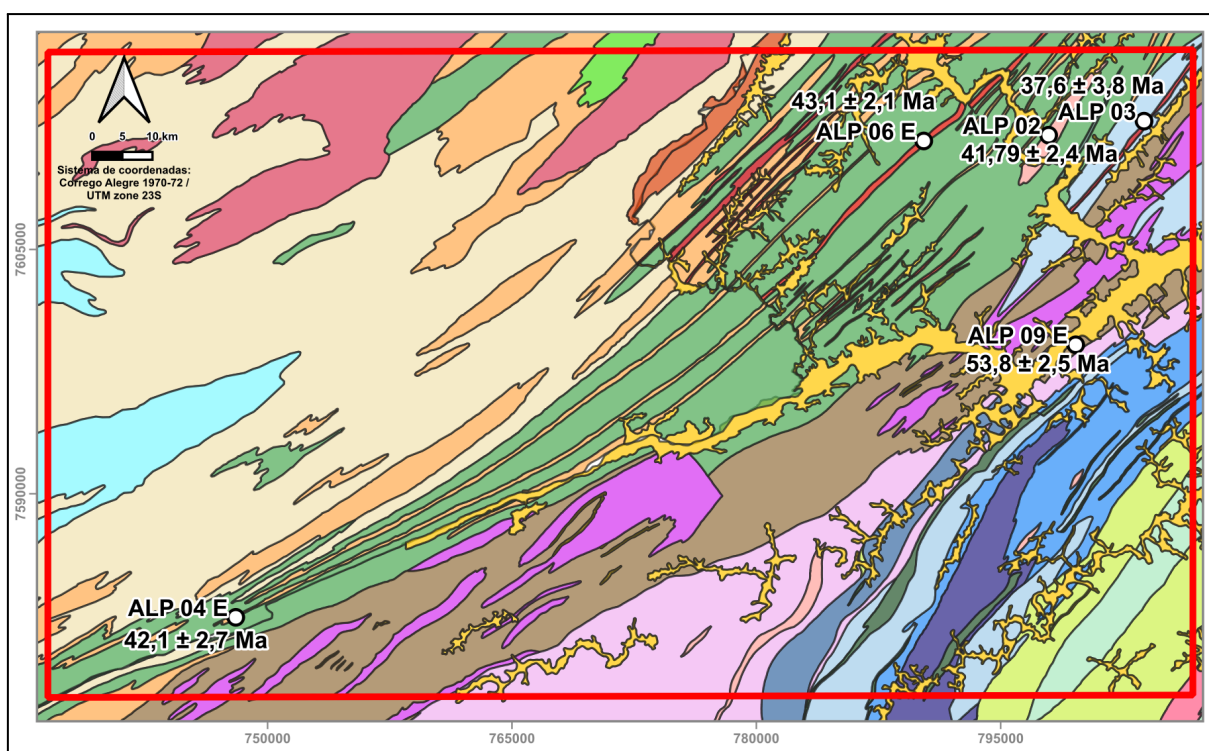


Figura 27. Mapa geológico com a distribuição espacial das amostras e idades associadas.

Utilizando a amostra ALP-09 como representativa do bloco sudeste e a amostra ALP-06 como representativa do bloco noroeste, observa-se uma diferença entre 53,8 ± 2,5 Ma e 43,1 ± 2,08 Ma, ou seja, aproximadamente 10 Ma. Os resultados das histórias térmicas (figura 28) indicam que, por volta de 50 Ma, ambas as rochas estavam a temperaturas

semelhantes, cerca de 90°C. Considerando uma temperatura média na superfície de 20°C, isso corresponde a uma profundidade de aproximadamente 2,8 km. No entanto, por volta de 25 Ma, no final do Oligoceno, a amostra ALP-06, do bloco NW, estava a 80°C (aproximadamente 2,4 km de profundidade), enquanto a amostra ALP-09, do bloco SW, apresentava uma temperatura de 60°C (cerca de 1,6 km de profundidade). Dessa forma, pode-se concluir que o bloco NW experimentou 0,8 km a mais de exumação nos últimos 25 Ma, o que foi acomodado por uma reativação da ZCAP com componente de falha inversa, responsável pelo soerguimento de 1,6 km desde o final do Oligoceno. A trajetória das amostras, conforme as histórias térmicas, está representada na figura 29.

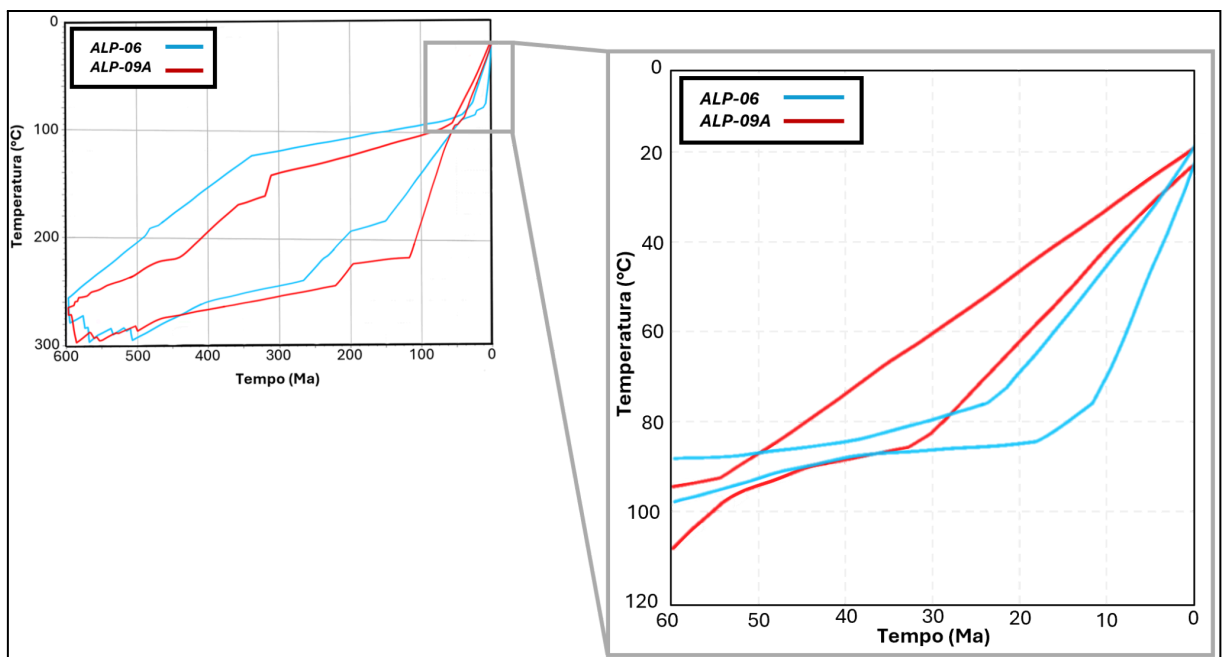


Figura 28. Comparação entre os envelopes de trajetórias térmicas das amostras ALP-06 (azul) e ALP-09A (vermelho).

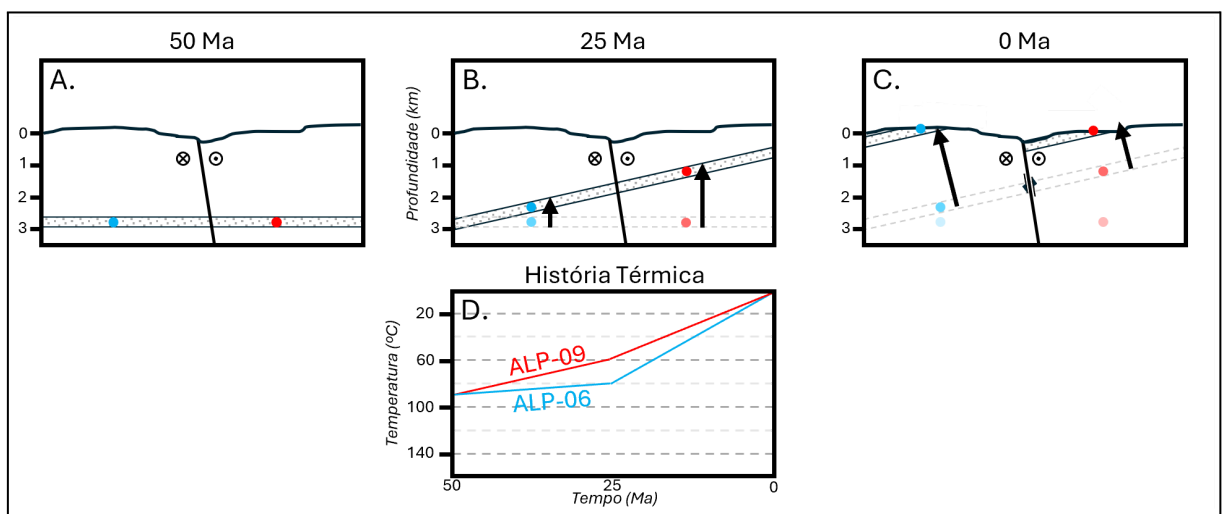


Figura 29. Modelo esquemático da posição das amostras em profundidade, conforme a história térmica modelada.

## 7. CONCLUSÕES

Foram datadas 6 amostras através do método de traços de fissão em apatita, sendo obtidas as seguintes idades TFA: ALP-02 com idade  $41,8 \pm 2,4$  Ma; ALP-03 com idade  $37,6 \pm 3,8$  Ma; ALP-04 com idade  $42,1 \pm 2,7$  Ma (método EDM) e  $42,5 \pm 2,8$  Ma (método LA-ICP-MS); ALP-06 com idade  $43,1 \pm 2,1$ ; e ALP-09 com idade  $53,8 \pm 2,5$  Ma. Considerando estas amostras, a Zona de Cisalhamento Além Paraíba apresenta idades AFT variando entre 53 e 37 Ma, o que indica um evento de resfriamento cenozóico. A modelagem térmica dos dados, incorporando comprimentos de traços, resulta em uma história térmica que sugere um resfriamento de 70 a 80°C nos últimos 50 Ma, correspondendo a um soerguimento e exumação de 2,8 a 3,2 km de rocha.

As diferenças nas idades e nas histórias térmicas entre os blocos NW e SE da zona de cisalhamento indicam um processo de exumação diferencial, com um soerguimento mais rápido no bloco NW. Esse soerguimento diferencial é explicado por uma reativação com componente de falha inversa da ZCAP, responsável por um deslocamento vertical de 1,6 km nos últimos 25 Ma. Os mecanismos geodinâmicos que controlam esse soerguimento ainda necessitam ser investigados.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, F.F.M., Hasuy, Y., Carneiro, C.D.R., 1975, Lineamento de Além-Paraíba: Anais da Academia Brasileira de Ciências, v. 47, no 3/4, p. 575.
- Almeida, F.F.M., Hasui, Y., Brito Neves, B.B., Fuck, R.A., 1977, Províncias estruturais brasileiras, *in* VII Simpósio de Geologia do Nordeste, Campina Grande, p. 363-391.
- Cogné, N., Chew, D.M., Donelick, R.A., Ansberque, C., 2020, LA-ICP-MS apatite fission track dating: A practical zeta-based approach: *Chemical Geology*, v. 531, p. 119-302.
- Dayan, H., Keller, J.V.A., 1989, A zona de cisalhamento do rio Paraíba do Sul nas vizinhanças de Três Rios (RJ): uma análise da deformação dada por algumas feições estruturais: *Revista Brasileira de Geociências*, v. 19, p. 494-506.
- Donelick, R.A., 1993, Apatite etching characteristics versus Chemical composition: *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, v. 21, p. 604.
- Donelick, R.A., O'Sullivan, P.B., Ketcham, R.A., 2005, Apatite fission-track analysis, *in* *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, v.58, p.49-94, doi:10.2138/rmg.2005.58.3.
- Donelick, R.A., O'Sullivan, P.B., Donelick, M.B., 2010, A Discordia-Based Method of Zircon U-Pb Dating from LA-ICP-MS Analysis of Single Spots: *Smart Science for Exploration and Mining*, v. 1, p. 276-278.
- Egydio-Silva, M., Vauchez, A., Bascou, J., Hippert, J., 2002, High-temperature deformation in the Neoproterozoic transpressional Ribeira belt, southeast Brazil, *in* *Transport and flow processes in shear zones: Programme and abstracts*: London: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 2002, p. 24, doi:10.1016/S0040-1951(02)00197-X.
- Egydio-Silva, M., Vauchez, A., Fossen, H., Cavalcante, G.C.G., Xavier, B.C., 2018, Connecting the Araçuaí and Ribeira belts (SE–Brazil): Progressive transition from contractional to transpressive strain regime during the Brasiliano orogeny: *Journal of South American Earth Sciences*, v. 86, p. 127-139.
- Fleischer, R.L., Price, P.B., Walker, R.M., 1975, *Nuclear Tracks in Solids: Principles and Applications*: Berkeley, University of Califórnia Press, 605 p.
- Fleischer, R.L., Price, P.B., 1963, Charged particle tracks in glass: *Journal of Applied Physics*, v. 34, n. 9, p. 2903-2904.
- Fossen, H., 2016, *Structural Geology*: Cambridge, Cambridge University Press, 524 p.
- Gallagher, K., Brown, R., Johnson, C., 1998, Fission track analysis and its applications to geological problems: *Annual Review Earth and Planetary Science*, v. 26, p 519-572, doi:10.1146/annurev.earth.26.1.519.
- Gallagher, K., 2012, Transdimensional inverse thermal history modeling for quantitative thermochronology: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, v. 117, no 2, doi:10.1029/2011JB008825.

- Giraldo, S.J., Trouw, R.A.J., Duffles, P., Costa, R.V., Mejia, M.I., Marimon, R.S., 2019, Structural analysis combined with new geothermobarometric and geochronological results of the Além Paraíba shear zone, between Três Rios and Bananal, Ribeira Orogen, SE Brazil: *Journal of South American Earth Sciences*, v.90, p. 118-136, doi:10.1016/j.jsames.2018.11.018.
- Gleadow, A. J. W., 1981, Fission-track dating methods: what are the real alternatives?: *Nuclear Tracks*, v. 5, n. 1-2, p. 3-14.
- Green, P.F., 1981, A new look at statistics in fission-track dating: *Nuclear tracks*, v. 5, n. 1-2, p. 77-86.
- Hasebe, N., Barbarand, J., Jarvis, K., Carter, A., Hurford, A.J., 2004, Apatite fission-track chronometry using laser ablation ICP-MS: *Chemical Geology*, v. 207, no 3, p. 135-145, doi:10.1016/j.chemgeo.2004.01.007.
- Hasebe, N., Carter, A., Hurford, A. J., Arai, S., 2009, The effect of chemical etching on LA-ICP-MS analysis in determining uranium concentration for fission-track chronometry: *Geological Society, London, Special Publications*, v. 324, n. 1, p. 37-46.
- Heilbron, M., Valeriano, C.M., Valadares, C.S., Machado, N., 1995, A orogênese Brasileira no Segmento Central da Faixa Ribeira, Brasil: *Revista Brasileira de Geociências*, v. 25, p. 249-266.
- Heilbron, M., Mohriak, W.U., Valeriano, C., Milani, E., Almeida, J., Tupinambá, M., 2000, From collision to extension: The roots of the southeastern continental margin of Brazil, *in* Talwami, M., Mohriak, W.U., eds., *Atlantic Rifts and Continental Margins*: Washington DC, American Geophysical Union Geophysical Monograph Series, v. 115, doi:10.1029/GM115p0001.
- Heilbron, M., Pedrosa-Soares, A. C., Campos-Neto, M. C., Silva, L. C., Trouw, R. A. J., Janasi, V. A., 2004, Província Mantiqueira, *in* Mantesso-Neto, V., Bartorelli, A., Carneiro, C. R., Brito Neves, B. B. (Org.), *Geologia do Continente Sul-Americano - evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*: São Paulo: Beca, p. 203-235.
- Heilbron, M., Valeriano, C.M., Tassinari, C.C.G., Almeida, J., Tupinambá, M., Trouw, R.A.J., 2008, Correlation of Neoproterozoic terranes between the Ribeira Belt, SE Brazil and its Africa counterpart: comparative tectonic evolution and open questions. *West Gondwana: Pre – Cenozoic Correlations Across the South Atlantic Region*: Geological Society, London, Special Publications, 294, p. 211-223.
- Heilbron, M., Ribeiro, A., Valeriano, C.M., Paciullo, F.V., Almeida, J.C.H., Trouw, R.J.A., Eirado-Silva, L.G., 2017, The Ribeira Belt. São Francisco Craton, Eastern Brazil: *Tectonic Genealogy of a Miniature Continent*, p. 277-302.
- Hurford, A.J., Green, P.F., 1983, The Zeta Age Calibration of Fission-Track Dating: Elsevier Science Publishers, *Isotope Geoscience*, v. 1, p. 285-317.
- Ketcham, R.A., 2005, Forward and Inverse Modeling of Low-Temperature Thermochronometry Data: *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, v. 58, no 1, p. 275–314, doi:10.2138/rmg.2005.58.11.

- Ketcham, R.A., 2007, Improved modeling of fission-track annealing in apatite: *American Mineralogist*, v. 92, p. 799-810, doi: 10.2138/am.2007.2281.
- Ketcham, R.A., 2024, Thermal history inversion from thermochronometric data and complementary information: New methods and recommended practices: *Chemical Geology*, v. 653, doi: 10.1016/j.chemgeo.2024.122042.
- Laslett, G.M., Green, P.F., Duddy, I.R., Gleadow, A.J.W., 1987, Thermal annealing of fission tracks in apatite 2: a quantitative analysis: *Chemical Geology: Isotope Geoscience Section*, v. 65, no 1, p. 1-13, doi:10.1016/0168-9622(87)90057-1.
- Malusà, M.G., Fitzgerald, P.G., eds., 2019, *Fission-Track Thermochronology and its Application to Geology*: Springer, 408 p.
- O'Sullivan, G., Chew, D., Kenny, G., Henrichs, I., Mulligan, D., 2020, The trace element composition of apatite and its application to detrital provenance studies: *Earth-Science Reviews*, v. 201, 103044 p.
- Passchier, C.W., Trouw, R.A.J., 1996, *Microtectonics*: Berlin, Springer, 289 p, doi:10.1007/3-540-29359-0.
- Reiners, P.W., Brandon, M.T., 2006, Using Thermochronology To Understand Orogenic Erosion: *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, v. 34, p. 419-466, doi:10.1146/annurev.earth.34.031405.125202.
- Reiners, P.W., Ehlers, T.A., eds., 2018, *Low-Temperature Thermochronology: Techniques, interpretations, and applications*: Mineralogical Society Of America, v 58, 620 p.
- Silva, C.M.T., 2010, O Sistema Transcorrente da Porção Sudeste do Orógeno Araçuaí da Faixa Ribeira: Geometria e Significado Tectônico [Tese de doutorado]: Ouro Preto, Departamento de Geologia da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto.]
- Silva, T.P., Mello, C.L., 2011, Reativações neotectônicas na Zona de Cisalhamento do Rio Paraíba do Sul (sudeste do Brasil): *Geologia USP, Série Científica*, São Paulo, v. 11, no 1, p. 95-111, doi:10.5327/Z1519-874X2011000100006.
- Stockli, D.F., 2005, Application of Low-Temperature Thermochronometry to Extensional Tectonic Settings: *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, v. 58, p. 411-448, doi:10.2138/rmg.2005.58.16.
- Tupinambá, M. *et al.*, 2007, Geologia da Faixa Ribeira Setentrional: Estado da arte e conexões com a Faixa Araçuaí in *Revista Geonomos*, v. 15, no 1, doi:10.18285/geonomos.v15i1.108.

## **APÊNDICE**

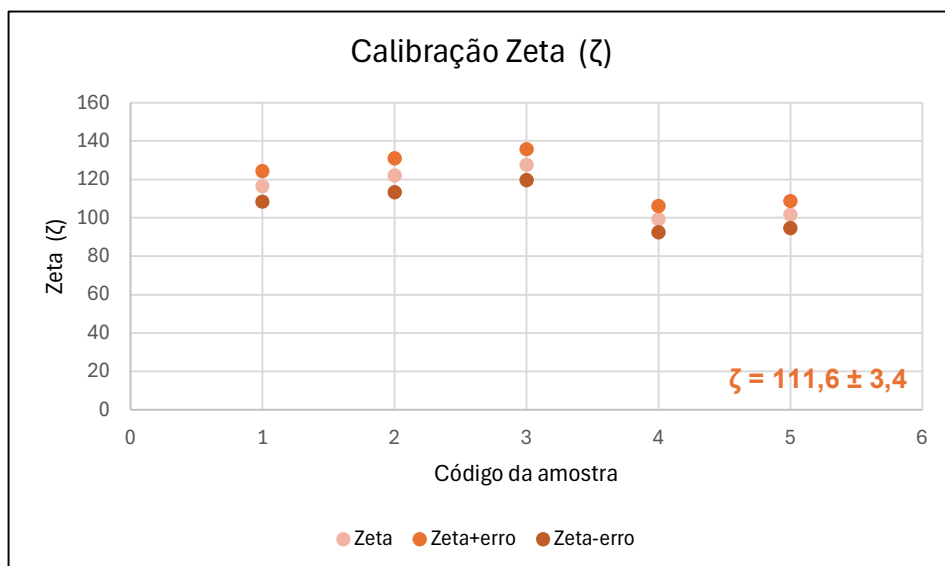


## APÊNDICE A - Cálculo do Zeta ( $\zeta$ )

Irradiação	Amostra	Zeta	Erro (zeta)	n	X2	U (ppm)
USP-03	FCT-N1	116,43	7,96E+00	25	25,4	4,83
	FCT-Q1	122,14	8,80E+00	25	62,7	8,3
	FCT-N3 I	127,7	8,08E+00	25	24	7,18
	DUR2 I	99,26	6,82E+00	25	30,5	3,52
	DUR2 II	101,7	7,08E+00	25	13,6	3,5

Cálculo da média	Média aritmética	Erro da média simples	Média aritmética com peso	Erro da média com peso
	113,45	3,87	<b>111,6</b>	<b>3,4</b>

Gráfico	Amostra	Zeta	Zeta+erro	Zeta-erro
	FCT-N1 (1)	116,43	124,39	108,47
	FCT-Q1 (2)	122,14	130,94	113,34
	FCT-N3 (3)	127,7	135,78	119,62
	DUR2 I (4)	99,26	106,08	92,44
	DUR2 II (5)	101,7	108,78	94,62



## APÊNDICE B: Dosimetria irradiação USP-52

Irradiação: USP-52

Vidro: CN1

Vidro CN1 - A1				
Contagem dos traços (Nd)	233	232	208	
	229	229	200	
	225	209	202	
	235	243	207	
	214	188	199	
	209	230	222	
	229	202	215	
	234	206	210	
	225	213	206	Total
	255	222	223	6554

Vidro CN1 - B1				
Contagem dos traços (Nd)	172	170	169	
	174	180	161	
	175	145	162	
	182	185	172	
	178	150	168	
	167	167	172	
	180	183	160	
	172	183	184	
	153	187	172	Total
	163	167	185	5138

Cálculo da densidade ( $\rho_D$ )			
Densidade no vidro CN1-A1:	3413541,7	1- $\sigma$ Erro:	42165
Densidade no vidro CN1-B1:	2676041,7	1- $\sigma$ Erro:	37333,3
Nd Total			11692

**APÊNDICE C: Dados FTA - EDM**

ALP-03B							
Ns	NA	Área (cm <sup>2</sup> )	ρs (cm <sup>-2</sup> )	Dpar	Ni	Idade FT	1-σ Erro
12	70	4,48E-05	2,68E+05	2,51	24	72,12	25,95
2	60	3,84E-05	5,21E+04	2,36	14	20,69	15,70
3	60	3,84E-05	7,81E+04	2,22	28	15,52	9,49
2	60	3,84E-05	5,21E+04	2	11	26,32	20,31
4	100	6,40E-05	6,25E+04	1,97	7	82,36	51,91
4	50	3,20E-05	1,25E+05	2,29	16	36,16	20,36
8	60	3,84E-05	2,08E+05	2,47	23	50,26	20,90
3	60	3,84E-05	7,81E+04	2,16	27	16,10	9,85
10	100	6,40E-05	1,56E+05	2,07	50	28,95	10,21
5	50	3,20E-05	1,56E+05	2,52	19	38,06	19,30
5	100	6,40E-05	7,81E+04	2,4	13	55,55	29,47
1	60	3,84E-05	2,60E+04	2,98	4	36,16	40,50
5	49	3,14E-05	1,59E+05	1,81	14	51,60	27,10
2	50	3,20E-05	6,25E+04	1,52	16	18,11	13,63
2	100	6,40E-05	3,13E+04	2,33	9	32,15	25,23
8	100	6,40E-05	1,25E+05	1,71	12	95,98	44,28
1	70	4,48E-05	2,23E+04	1,77	10	14,49	15,23
7	100	6,40E-05	1,09E+05	2,11	18	56,16	25,30
3	100	6,40E-05	4,69E+04	1,93	14	31,01	19,84
10	60	3,84E-05	2,60E+05	1,84	12	119,76	51,90
1	100	6,40E-05	1,56E+04	1,7	7	20,69	22,16
16	90	5,76E-05	2,78E+05	2,03	48	48,17	14,27
8	100	6,40E-05	1,25E+05	1,83	31	37,32	15,01
3	80	5,12E-05	5,86E+04	2,25	11	39,44	25,82
2	60	3,84E-05	5,21E+04	2,65	10	28,95	22,50
4	100	6,40E-05	6,25E+04	2,04	25	23,17	12,57
5	100	6,40E-05	7,81E+04	1,94	28	25,85	12,67

ALP-04A							
Ns	Na	Área (cm <sup>2</sup> )	ρs (cm <sup>-2</sup> )	Dpar	Ni	Idade FT	1-σ Erro
13	100	6,40E-05	2,03E+05	3,11	26	71,24	24,66
8	100	6,40E-05	1,25E+05	3,29	28	40,80	16,58
3	90	5,76E-05	5,21E+04	2	55	7,81	4,66
35	100	6,40E-05	5,47E+05	2,98	70	71,24	15,49
14	100	6,40E-05	2,19E+05	2,28	32	62,38	20,42
18	100	6,40E-05	2,81E+05	2,57	77	33,40	9,02
17	98	6,27E-05	2,71E+05	1,66	44	55,12	16,16
30	100	6,40E-05	4,69E+05	2,87	43	99,18	24,50
28	100	6,40E-05	4,38E+05	1,77	87	45,94	10,44
13	100	6,40E-05	2,03E+05	2,96	40	46,39	15,13
18	50	3,20E-05	5,63E+05	2,23	52	49,40	13,91
14	97	6,21E-05	2,26E+05	2,06	52	38,46	11,86
5	100	6,40E-05	7,81E+04	2,53	47	15,22	7,23
25	100	6,40E-05	3,91E+05	2,49	60	59,42	14,69
32	100	6,40E-05	5,00E+05	2,3	71	64,25	14,34
13	100	6,40E-05	2,03E+05	2,7	57	32,59	10,25
8	70	4,48E-05	1,79E+05	2,45	39	29,32	11,55
5	70	4,48E-05	1,12E+05	2,35	30	23,83	11,62
14	70	4,48E-05	3,13E+05	2,25	49	40,80	12,66
13	70	4,48E-05	2,90E+05	2,57	57	32,59	10,25
13	60	3,84E-05	3,39E+05	2,32	37	50,14	16,51
12	100	6,40E-05	1,88E+05	2,66	36	47,58	16,17
12	70	4,48E-05	2,68E+05	2,74	39	43,93	14,80
15	100	6,40E-05	2,34E+05	2,18	72	29,78	8,68
18	90	5,76E-05	3,13E+05	2,15	59	43,56	12,08
13	100	6,40E-05	2,03E+05	2,19	69	26,94	8,34
24	100	6,40E-05	3,75E+05	2,67	81	42,31	10,23

ALP-09A							
Ns	Na	Área (cm <sup>2</sup> )	ρs (cm <sup>-2</sup> )	Dpar	Ni	Idade FT	1-σ Erro
119	70	4,48E-05	2,66E+06	2,03	348	48,20	6,04
23	70	4,48E-05	5,13E+05	2,1	75	43,24	10,70
82	100	6,40E-05	1,28E+06	2,27	165	69,93	10,54
47	60	3,84E-05	1,22E+06	2,43	70	94,30	18,86
21	87	5,57E-05	3,77E+05	1,97	55	53,79	14,26
74	100	6,40E-05	1,16E+06	2,07	99	104,89	17,57
83	100	6,40E-05	1,30E+06	1,86	359	32,63	4,53
27	50	3,20E-05	8,44E+05	1,87	69	55,12	13,04
59	80	5,12E-05	1,15E+06	2,17	135	61,53	10,44
36	80	5,12E-05	7,03E+05	2,16	53	95,39	21,56
66	100	6,40E-05	1,03E+06	2,2	111	83,58	14,14
60	70	4,48E-05	1,34E+06	1,91	117	72,15	12,43
7	50	3,20E-05	2,19E+05	2,21	16	61,60	28,22
6	70	4,48E-05	1,34E+05	1,97	15	56,34	27,47
59	60	3,84E-05	1,54E+06	2,27	116	71,56	12,40
12	70	4,48E-05	2,68E+05	1,95	25	67,55	24,15
4	50	3,20E-05	1,25E+05	2,02	14	40,30	23,00
7	100	6,40E-05	1,09E+05	2,06	12	82,00	39,38
7	100	6,40E-05	1,09E+05	1,97	20	49,33	21,91
2	100	6,40E-05	3,13E+04	2,25	4	70,35	61,11
24	60	3,84E-05	6,25E+05	2,09	84	40,30	9,71
4	70	4,48E-05	8,93E+04	2,05	18	31,36	17,46
120	100	6,40E-05	1,88E+06	2,3	311	54,36	6,88
8	100	6,40E-05	1,25E+05	2,1	23	49,02	20,39
9	100	6,40E-05	1,41E+05	2,08	19	66,67	27,34
41	60	3,84E-05	1,07E+06	2,01	93	62,07	12,35
11	100	6,40E-05	1,72E+05	2,17	18	85,88	33,36
47	100	6,40E-05	7,34E+05	1,81	137	48,35	8,79
61	100	6,40E-05	9,53E+05	1,92	225	38,24	6,08
23	60	3,84E-05	5,99E+05	1,96	80	40,55	9,97

APÊNDICE D: Dados FTA - LA-ICP-MS

ALP-04B								
NS	Área	RhoS	U (ppm)	AU	Erro (U-ppm)	Idade (Ma)	Erro Idade (Ma)	D-par
20	1,54E-04	1,30E+05	8,8	1,35E-03	0,13	21,18	4,83	1,98
4	3,73E-05	1,07E+05	1,63	6,08E-05	0,02	93,72	47,06	1,73
6	7,24E-05	8,29E+04	3,35	2,42E-04	0,05	35,40	14,54	2,14
5	5,23E-05	9,57E+04	4,32	2,26E-04	0,06	31,68	14,24	2,27
18	6,28E-05	2,87E+05	4,52	2,84E-04	0,07	90,28	21,67	2,07
6	7,35E-05	8,16E+04	3,2	2,35E-04	0,05	36,46	14,98	1,69
67	2,13E-04	3,15E+05	16,47	3,50E-03	0,25	27,39	3,57	1,97
9	1,14E-04	7,87E+04	4,5	5,15E-04	0,07	25,02	8,42	1,97
9	9,78E-05	9,21E+04	6,4	6,26E-04	0,10	20,60	6,93	1,88
43	1,65E-04	2,61E+05	5,36	8,83E-04	0,08	69,46	11,05	2,12
26	2,17E-04	1,20E+05	1,76	3,82E-04	0,03	96,79	19,49	1,91
22	1,17E-04	1,87E+05	9,16	1,08E-03	0,14	29,25	6,38	1,89
26	1,24E-04	2,10E+05	9,49	1,18E-03	0,14	31,60	6,36	1,61
32	1,28E-04	2,50E+05	7,75	9,90E-04	0,12	46,17	8,43	1,87
12	1,06E-04	1,14E+05	7,65	8,08E-04	0,11	21,27	6,22	2,36
50	1,21E-04	4,13E+05	10,36	1,25E-03	0,16	56,89	8,45	2,18
45	2,27E-04	1,98E+05	4,01	9,11E-04	0,06	70,45	10,98	2,05
43	1,59E-04	2,71E+05	2,39	3,80E-04	0,04	160,31	25,51	1,99
						<b>42,49</b>	<b>2,80</b>	

ALP-06								
NS	Área	RhoS	U (ppm)	AU	Erro (U-ppm)	Idade (Ma)	Erro Idade (Ma)	D-par
728	4,48E-04	1,63E+06	42,99	0,02	0,64	54,02	2,59	2,06
169	1,40E-04	1,20E+06	25,74	0,00	0,39	66,70	5,52	2,18
193	1,21E-04	1,59E+06	63,69	0,01	0,96	35,79	2,80	2,61
74	1,03E-04	7,16E+05	11,94	0,00	0,18	85,41	10,26	1,84
293	2,33E-04	1,25E+06	48,28	0,01	0,72	37,16	2,45	2,71
313	3,25E-04	9,63E+05	37,74	0,01	0,57	36,49	2,34	2,78
135	1,68E-04	8,03E+05	28,21	0,00	0,42	40,70	3,72	2,84
138	1,11E-04	1,24E+06	21,46	0,00	0,32	82,58	7,47	1,85
151	1,23E-04	1,23E+06	45,48	0,01	0,68	38,60	3,35	2,42
72	2,23E-04	3,23E+05	14,81	0,00	0,22	31,20	3,80	2,87
235	1,20E-04	1,97E+06	53,68	0,01	0,81	52,32	3,77	1,78
47	5,00E-05	9,40E+05	29,91	0,00	0,45	44,90	6,69	2,06
171	1,17E-04	1,46E+06	105,18	0,01	1,58	19,85	1,63	2,23
112	1,22E-04	9,15E+05	22,35	0,00	0,34	58,45	5,80	2,61
360	2,98E-04	1,21E+06	36,58	0,01	0,55	47,24	2,88	1,87
96	8,36E-05	1,15E+06	30,28	0,00	0,45	54,15	5,77	3,00
123	1,32E-04	9,30E+05	28,48	0,00	0,43	46,65	4,44	2,72
168	1,66E-04	1,01E+06	42,01	0,01	0,63	34,52	2,86	1,87
105	1,20E-04	8,73E+05	33,19	0,00	0,50	37,60	3,84	1,92
116	1,00E-04	1,16E+06	34,93	0,00	0,52	47,44	4,64	2,64
						<b>43,10</b>	<b>2,08</b>	

ALP-02								
NS	Área	RhoS	U (ppm)	AU	Erro (U-ppm)	Idade (Ma)	Erro Idade (Ma)	D-par
196	1,70E-04	1,16E+06	42,92	0,01	0,64	38,49	2,99	1,99
267	3,84E-04	6,95E+05	28,29	0,01	0,42	35,13	2,40	2,14
126	1,64E-04	7,67E+05	28,19	0,00	0,42	38,92	3,66	2,22
241	4,31E-04	5,59E+05	18,73	0,01	0,28	42,69	3,04	2,15
123	1,52E-04	8,08E+05	29,3	0,00	0,44	39,44	3,75	1,91
91	1,04E-04	8,74E+05	35,36	0,00	0,53	35,36	3,86	2,60
62	1,39E-04	4,47E+05	12,1	0,00	0,18	52,72	6,89	1,82
87	1,30E-04	6,68E+05	20,26	0,00	0,30	47,10	5,25	2,06
84	1,33E-04	6,30E+05	21,41	0,00	0,32	42,04	4,76	1,66
71	1,09E-04	6,50E+05	19,04	0,00	0,29	48,74	5,97	2,49
120	1,47E-04	8,17E+05	22,39	0,00	0,34	52,11	5,01	1,88
171	1,64E-04	1,04E+06	29,37	0,00	0,44	50,62	4,17	2,15
78	1,35E-04	5,77E+05	27,27	0,00	0,41	30,28	3,55	1,63
137	2,23E-04	6,13E+05	18,55	0,00	0,28	47,22	4,28	2,25
102	1,61E-04	6,33E+05	17,01	0,00	0,26	53,12	5,50	2,06
106	1,46E-04	7,28E+05	34,29	0,00	0,51	30,36	3,09	1,99
55	1,47E-04	3,74E+05	9,89	0,00	0,15	53,95	7,46	2,60
276	3,14E-04	8,78E+05	31,48	0,01	0,47	39,85	2,69	2,58
81	1,08E-04	7,47E+05	16,77	0,00	0,25	63,53	7,32	2,46
123	1,83E-04	6,70E+05	20,29	0,00	0,30	47,21	4,49	1,89
						<b>41,79</b>	<b>2,35</b>	



APÊNDICE E: Resultados químicos - LA-ICP-MS

Element	Cl35	Ca43	Sr88	Y89	La139	Ce140	Pr141	Nd145	Sm147	Eu151	Gd157	Tb159	Dy163	Ho165	Er166	Tm169	Yb173	Lu175	Hg202	Pb204	Pb206	Pb207	Pb208	Th232	U238
ALP2-27	1210,4	390441,2	137,2	45,1	230,9	911,7	168,0	978,4	323,4	17,8	190,5	13,2	25,8	2,0	1,7	0,1	0,8	0,1	<0,00	20,5	10,3	2,7	2,6	0,0	29,3
ALP2-32	2261,8	390441,2	147,6	289,4	535,0	1791,4	320,2	1926,2	738,8	19,6	518,2	43,5	119,8	11,4	14,3	1,1	5,0	0,5	<0,00	<19,85	12,7	3,6	2,5	0,3	35,4
ALP2-46	1943,0	390441,2	182,8	221,4	198,5	876,2	177,4	1168,0	491,4	19,8	380,2	31,8	90,7	8,8	12,1	0,8	3,1	0,3	<0,00	<18,00	7,6	4,1	3,9	<0.0213	12,1
ALP2-48	1661,4	390441,2	252,6	97,6	305,0	1139,5	209,7	1310,2	486,6	20,4	290,1	20,1	43,1	4,0	5,7	0,4	1,4	0,1	<0,00	<19,70	7,6	4,0	3,1	0,0	20,3
ALP2-75	1687,5	390441,2	195,1	98,8	304,9	1164,2	218,3	1346,7	517,2	21,0	322,9	22,4	50,0	4,3	6,0	0,2	2,0	0,3	<0,00	15,0	10,0	3,9	3,1	0,0	21,4
ALP2-78	1264,3	390441,2	213,5	186,8	256,4	1007,1	191,4	1223,6	540,7	21,3	395,5	29,1	76,9	8,1	11,9	0,9	4,5	0,5	<0,00	<14,96	9,9	3,5	3,5	0,1	19,0
ALP2-79	1555,1	390441,2	211,2	136,3	273,2	1100,4	207,6	1299,6	545,4	24,2	374,8	27,6	62,1	5,4	7,5	0,4	1,9	0,3	<0,00	<15,16	8,2	3,3	3,3	0,8	22,4
ALP2-80	1565,9	390441,2	190,1	123,2	335,9	1257,3	230,5	1413,8	505,0	19,2	314,8	22,8	55,3	5,1	6,9	0,4	2,2	0,3	<0,00	<14,80	10,7	3,2	3,2	0,1	29,4
ALP2-87	1492,8	390441,2	122,7	33,8	458,3	1506,2	250,9	1406,1	423,6	18,4	195,4	10,8	20,4	1,6	1,9	<0.098	0,7	<0.082	<0,00	<24,58	11,1	3,4	2,8	0,1	27,3
ALP2-95	1485,8	390441,2	139,6	51,4	430,9	1421,6	241,4	1376,9	408,4	20,1	214,9	13,4	28,7	2,1	3,2	0,2	0,6	0,1	<0,00	<12,82	8,8	3,0	2,9	0,0	18,6
ALP2-99	1912,8	390441,2	139,1	48,7	176,0	798,7	155,9	1001,1	355,9	20,8	201,6	13,0	27,4	1,8	2,5	0,1	0,7	0,1	<0,00	<13,49	8,2	3,3	3,0	0,0	17,0
ALP2-101	1212,7	390441,2	196,5	65,7	563,1	1831,8	305,2	1679,4	478,0	20,0	265,0	17,5	35,3	2,8	3,3	0,2	1,0	<0.087	<0,00	19,7	12,6	4,4	3,7	0,2	34,3
ALP2-117	1960,2	390441,1	272,7	351,4	80,1	509,2	128,3	990,7	569,7	12,6	491,6	44,8	131,8	14,5	21,2	1,5	8,0	0,7	<0,00	<15,58	10,2	5,5	6,3	0,0	9,9
ALP2-124	1824,9	390441,1	151,0	64,3	385,2	1373,9	242,0	1412,1	443,9	19,3	252,0	17,0	33,8	2,6	3,6	0,3	1,1	0,2	<0,00	<17,44	10,5	3,9	2,7	0,1	31,5
ALP2-129	2110,1	390441,1	219,3	122,3	178,2	735,4	140,5	923,2	386,4	15,4	280,0	21,8	53,0	4,6	7,1	0,4	2,4	0,2	<0,00	<16,40	8,0	4,0	3,4	0,2	16,8
ALP2-130	1461,1	390441,1	200,0	213,0	221,0	1026,4	212,2	1405,5	565,1	18,6	405,7	34,7	89,9	8,5	11,1	0,7	3,8	0,4	<0,00	<14,49	10,9	5,2	4,3	<0.0194	20,3
ALP4-4	1821,3	390441,1	152,1	2511,9	1297,3	4686,4	802,2	4250,7	969,4	66,6	717,8	99,5	512,6	92,8	226,8	27,1	181,8	22,2	<0,00	<26,97	4,0	2,2	2,8	18,5	8,8
ALP4-6	937,6	390441,1	150,1	1053,3	680,6	2393,1	388,5	1999,4	404,0	26,4	299,4	38,4	192,7	35,5	89,2	11,3	67,1	8,3	<0,00	<19,14	2,1	2,1	1,5	3,3	1,6
ALP4-10	1435,7	390441,1	162,1	1635,1	487,6	1913,8	336,2	1805,0	459,3	50,3	379,0	55,8	296,5	57,9	146,9	18,1	113,6	15,0	<0,00	<22,75	1,4	1,8	2,1	4,6	3,4
ALP4-14	1789,7	390441,1	175,8	1788,1	758,0	2741,8	471,6	2498,1	593,9	43,9	450,2	64,8	321,6	62,1	146,1	18,5	116,2	14,5	<0,00	<44,11	3,7	2,7	3,3	7,2	4,3
ALP4-15	<797.29	390441,1	154,1	1941,5	1020,6	3815,2	610,8	3228,6	686,7	48,4	500,6	68,5	342,5	64,5	185,5	19,3	137,6	20,5	<0,00	27,6	<0.89	<0.77	1,1	10,6	4,5
ALP4-16	-2525860,3	390441,1	-304,4	<-1160.25	<-0.00	<-360.66	<-308.26	<-5591.01	<-0.00	<-0.00	<-0.00	-41,8	96,8	-37,5	-385,5	-85,7	-269,9	69,3	<-0.00	28185,8	756,3	<-0.00	<-0.00	<-0.00	<-0.00
ALP4-29	2109,8	390441,1	180,0	1569,9	760,4	2762,0	470,4	2527,8	565,5	40,9	441,0	60,3	302,5	56,4	141,3	17,5	108,2	13,9	<0,00	<27,47	2,6	2,3	2,5	4,4	3,2
ALP4-30	<1006.74	390441,1	192,8	3329,2	1513,0	5030,3	797,3	4114,7	1001,0	101,4	776,4	114,3	644,3	123,0	313,2	41,1	254,0	34,9	<0,00	<23,55	6,6	2,5	8,8	173,4	16,5
ALP4-33	2413,2	390441,1	135,3	1933,4	1012,0	3567,8	582,4	2962,1	672,2	39,2	513,4	71,4	372,4	69,6	173,2	22,1	138,9	17,9	<0,00	<34,49	3,5	1,2	2,3	8,5	4,5
ALP4-34	<635830.88	<899207.75	<140.36	<275.39	18,2	<89.31	<76.32	100,4	280,0	34,6	146,8	<141.54	101,8	26,3	98,3	24,0	<745.87	26,5	<0,00	<14247.74	88,4	146,2	<343.29	<0.00	<0.00
ALP4-90	1410,3	390441,1	166,3	2016,0	1005,2	3596,4	622,3	3281,5	740,4	54,3	549,6	76,2	387,4	71,9	178,5	22,6	135,4	17,5	<0,00	21,9	3,4	1,0	2,3	12,6	6,4
ALP4-100	1837,4	390441,1	150,1	1748,2	956,4	3277,9	535,6	2742,2	594,9	40,6	457,1	61,4	318,4	62,6	153,9	19,8	115,9	15,4	<0,00	<19,65	3,1	1,4	2,6	13,6	5,4
ALP4-135	8605,5	390441,1	185,0	1393,4	614,9	2388,8	390,5	2103,6	431,3	29,7	335,5	44,3	22,5	42,7	110,9	16,7	114,7	17,2	<0,00	<81.15	<2.08	7,2	3,5	2,3	1,8
ALP4-136	1710,9	390441,1	174,6	2750,2	623,9	2488,6	460,6	2605,2	758,6	99,8	635,5	95,8	515,7	102,0	257,0	34,6	225,3	30,1	<0,00	<24,88	4,6	1,6	2,7	15,4	9,2
ALP4-137	1237,2	390441,1	172,6	2547,3	1187,0	4339,1	740,9	3916,9	895,3	68,3	694,2	96,2	493,4	94,4	234,2	30,4	184,1	24,6	<0,00	<23,77	3,2	2,0	2,6	22,7	9,5
ALP4-138	1579,5	390441,1	176,2	2358,0	784,7	3158,1	575,2	3189,5	786,1	75,1	604,6	83,4	428,4	82,5	203,7	26,4	171,1	22,3	<0,00	<25,61	3,6	2,5	2,7	13,2	7,8
ALP4-139	1440,9	390441,1	152,5	2626,2	1513,1	5505,5	916,3	4828,5	1038,2	60,9	742,6	100,1	512,0	96,7	235,1	29,7	189,1	26,5	<0,00	<20,31	4,9	1,4	2,8	25,8	7,7
ALP4-140	1740,5	390441,1	145,4	2392,5	1685,4	5383,8	838,8	4112,3	860,3	59,1	625,6	86,3	451,6	82,3	211,1	26,8	178,0	23,2	<0,00	<24,29	4,8	1,7	2,9	40,9	10,4
ALP4-141	1340,3	390441,1	171,9	1804,7	1535,9	5363,9	839,4	4012,9	724,4	42,1	517,1	70,5	360,0	70,3	167,8	21,6	135,2	17,4	<0,00	24,0	2,3	1,1	1,8	9,9	4,0
ALP4-142	1906,5	390441,0	154,7	1708,1	1334,1	4245,3	652,8	3117,8	618,3	31,8	441,0	58,7	307,2	57,6	147,7	18,7	112,0	16,0	<0,00	<18,90	3,0	1,4	2,1	6,2	2,4
ALP6-8	6954,8	390441,0	68,1	14634,0	9461,6	22483,8	2877,2	14357,3	3640,4	137,1	3481,0	545,8	3050,9	597,3	1475,7	179,2	1080,2	140,3	<0,00	<80,56	15,1	5,8	21,8	396,7	43,0
ALP6-11	2898,2	390441,0	69,8	10359,1	8897,7	19223,2	2489,7	11645,8	2821,5	141,5	2583,4	393,1	2174,0	426,6	1052,6	129,6	760,7	95,7	<0,00	<58,59	13,1	6,4	10,9	117,3	25,7
ALP6-12	1619,4	390441,0	69,8	9805,6	5453,1	15795,3	2298,7	11707,7	2918,0	112,9	2633,9	394,9	2169,1	418,9	981,2	115,8	677,2	79,4	<0,00	<41,52	22,2	5,3	21,0	426,2	63,7
ALP6-17	1845,0	390441,0	425,0	5521,8	7054,9	13161,0	1538,4	7018,1	1555,2	81,8	1389,4	201,7	1105,9	212,9	532,2	68,9	422,2	55,4	<0,00	47,6	12,2	9,8	13,0	67,8	11,9
ALP6-20	503414,8	390441,1	1315764,5	6386,7	4273,8	171,8	<8.52	<108.59	580,7	5405,0	671,6	<10.42	<35.17	<9.43	<26.58	<10.28	<52.87	<11.10	<0,00	<1832.84	<68,05	70,6	61,5	<2.60	<5.45
ALP6-22	1430,4	390441,1	73,1	12311,9	2882,1	10895,0	1846,5	10163,5	2956,7	158,8	2872,1	450,9	2513,7	493,9	1213,6	146,9	861,4	103,1	<0,00	<23,42	16,6	4,6	4,8	30,0	48,3
ALP6-24	1265,0	390441,1	76,1	9667,0	10158,4	22244,0	2731,8	12486,3	2857,4	129,8	2536,2	377,8	2058,9	401,1	985,3	121,9	713,5	86,9	<0,00	<28,06	13,6	5,6	13,8	258,9	37,7
ALP6-30	1505,3	390441,1	63,3	9865,4	5541,2	16665,5	2409,3	12084,8	2943,4	194,4	2680,6	395,1	2165,0	413,8	1028,9	122,4	699,6	84,8	<0,00	<32,86	11,0	5,0	5,8	46,3	28,2
ALP6-36	1998,2	390441,1	71,2	7685,1	6991,2	18022,2	2331,3	11013,5	2480,4	109,0	2172,6	312,1	1674,8	327,3	780,8	93,4	554,3	65,6	<0,00	<27,26	8,8	4,0	11,9	191,5	21,5
ALP6-37	1801,8	390441,2	73,2	11039,1	10061,7	24208,5	3121,5	14698,5	3284,7	14															