

Trabalho de Conclusão de Curso  
Curso de Graduação em Geologia

ELUCIDAÇÕES QUANTO A EVOLUÇÃO DA PORÇÃO CENTRAL DO RIFT  
CONTINENTAL DO SUDESTE DO BRASIL (RCSB): TRAÇO DE FISSÃO POR  
MICROSSONDA ELETRÔNICA EM ZIRCÕES DA BACIA DE TAUBATÉ E  
ADJACÊNCIAS

**Gustavo Soldado Peres**

Orientador: Prof<sup>o</sup> Dr. George Luiz Luvizotto

Rio Claro (SP)

2022

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Câmpus de Rio Claro

GUSTAVO SOLDADO PERES

ELUCIDAÇÕES QUANTO A EVOLUÇÃO DA PORÇÃO CENTRAL  
DO *RIFT* CONTINENTAL DO SUDESTE DO BRASIL (RCSB): TRAÇO  
DE FISSÃO POR MICROSSONDA ELETRÔNICA EM ZIRCÕES DA  
BACIA DE TAUBATÉ E ADJACÊNCIAS

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)  
apresentado ao Instituto de Geociências e  
Ciências Exatas - Câmpus de Rio Claro, da  
Universidade Estadual Paulista Júlio de  
Mesquita Filho, para obtenção do grau de  
Geólogo.

Rio Claro - SP

2022

P437e

Peres, Gustavo Soldado

Elucidações quanto a evolução da porção central do rift Continental do Sudeste do Brasil (RCSB) : traço de fissão por microsonda eletrônica em zircões da Bacia de Taubaté e adjacências / Gustavo Soldado Peres. -- Rio Claro, 2022

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

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Geologia) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro

Orientador: George Luiz Luvizotto

1. Geologia. 2. Traço de Fissão. 3. Microsonda eletrônica. 4. Zircão. 5. RCSB. I.  
Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Câmpus de Rio Claro

GUSTAVO SOLDADO PERES

ELUCIDAÇÕES QUANTO A EVOLUÇÃO DA PORÇÃO CENTRAL  
DO *RIFT* CONTINENTAL DO SUDESTE DO BRASIL (RCSB): TRAÇO  
DE FISSÃO POR MICROSSONDA ELETRÔNICA EM ZIRCÕES DA  
BACIA DE TAUBATÉ E ADJACÊNCIAS

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)  
apresentado ao Instituto de Geociências e  
Ciências Exatas - Câmpus de Rio Claro, da  
Universidade Estadual Paulista Júlio de  
Mesquita Filho, para obtenção do grau de  
Geólogo

Comissão Examinadora

\_\_\_\_\_ (orientador)  
George Luiz Luvizotto

\_\_\_\_\_  
Iata Anderson de Souza

\_\_\_\_\_  
Nayara de Macedo dos Santos

Rio Claro, 02 de dezembro de 2022.

Assinatura do(a) aluno(a)

assinatura do(a) orientador(a)

“Opte por aquilo que faça o seu coração vibrar...  
Apesar de todas as consequências.”

Osho

“Sábio não é aquele que sabe de todas as coisas, mas sim aquele  
que usa do pouco que sabe em seu benefício”

C.P

Dedico este trabalho,  
À minha amada mãe, Evilin D. Soldado,  
Ao meu amado pai, Ataíde Peres (*In Memoriam*),  
À minha amada avó, Vera L. C. Soldado,  
À minha segunda mãe, Denise Cardoso.  
Nós conseguimos.

## AGRADECIMENTOS

Expresso aqui meus sinceros agradecimentos.

À Universidade Estadual Paulista (UNESP) – Rio Claro, pelo acolhimento e apoio institucional.

À ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) e a programa PRH- 40, pelo apoio financeiro oferecido para a realização deste trabalho.

À minha mãe, por ter sido também pai, me auxiliando e apoiando em todos os momentos em que precisei, mulher forte e guerreira, exemplo a ser seguido, você é meu orgulho.

Ao meu pai, que mesmo não estando mais aqui, sempre torceu por mim, me incentivando a conquistar meus sonhos.

A minha avó, Vera, que amo incondicionalmente e sempre foi um colo aconchegante em que pude me deitar, a senhora é um exemplo para mim.

A minha amiga Caroline Favoretto, por ter vivido junto a mim diversos desafios durante a graduação, observando de perto minha evolução como geólogo, mas principalmente como ser humano, uma irmã que a vida me deu.

Ao amigo, Felipe Pires (Salsicha), pelos momentos de conversa, risadas e geologia, muito aprendi contigo, sobre a vida.

A família Dandalunda, com todos seus integrantes, que me receberam de braços abertos, principalmente a Mãe. D. e ao seu C.P. que ressignificaram meu caminhar.

Ao professor Dr. Peter Christian Hackspacher (*Im Memoriam*), pelas diversas conversas formais ou informais, dentro da universidade ou na mesa de um bar. Uma semente foi plantada, sou grato por todas as oportunidades que o senhor me proporcionou, grato por acreditar em mim.

Ao amigo Dr. Bruno Venâncio, por ter no início de minha jornada na termocronologia, me auxiliado nos conhecimentos pacientemente.

Ao amigo, Dr. Daniel Godoy, pelas grandes oportunidades de conversas geológicas e pelos diversos ensinamentos passados durante toda a minha graduação.

À amiga, Nayara Macedo, por tantas conversas e apoio durante a graduação, uma pessoa incrível que tive a oportunidade de conhecer.

Ao professor, George Luiz Luvizotto, por acolher-me posteriormente ao falecimento do professor Peter, me auxiliando em todas as necessidades para a realização deste trabalho.

Que esse seja o primeiro passo, para a construção de um grandioso futuro.

## RESUMO

O *Rift* Continental do Sudeste do Brasil (RCSB), apresenta uma estrutura de graben e *horts* preservada não recoberta por águas sendo uma importante feição para estudos geológicos, tanto pelo seu potencial econômico quanto pelo papel evolutivo que representa para o sudeste brasileiro. O presente trabalho, se baseia na aplicação de técnicas termocronológicas por meio de traço de fissão em zircões detríticos, com objetivo de elucidar a evolução geológica da porção central do RCSB antes de sua abertura, e melhor compreender os processos de exumação durante o Paleogeno-Neogeno. Para isso utilizou-se de amostras coletadas na Bacia de Taubaté e suas adjacências, no segmento central do RSCB. As idades obtidas remontam a eventos desde o Triássico ao Cretáceo, com a fase de reativação, rifteamento do Continente Gondwana, abertura do Oceano Atlântico e Soerguimento da Serra da Mantiqueira. Para o Paleogeno-Neogeno, período deposicional da Bacia de Taubaté e surgimento do RSCB a disposição dos picos de idade para os sedimentos da bacia, oriundos de áreas fonte distintas, evidenciam processos de estabilidade nas taxas de exumação e aumento da mesma ao longo do tempo. Cálculos de taxa de *lag-time* revelam uma diferença do tempo de trajeto dos grãos para diferentes localidades da bacia, aliados aos diferentes picos de idades esses dados corroboram para existência de mais de uma área fonte com expressividade no aporte de sedimentos.

Palavras-chave: Geologia; Termocronologia Detrítica; Traço de Fissão; RCSB

## **ABSTRACT**

The Continental Rift of Southeastern Brazil (RCSB), presents a preserved graben and horts structure not covered by water and is an important feature for geological studies, both for its economic potential and for the evolutionary role it represents for southeastern Brazil. The present work is based on the application of thermochronological techniques by means of fission tracks in detrital zircons, in order to elucidate the geological evolution of the central portion of the RCSB before its opening, and to better understand the exhumation processes during the Paleogene-Neogene. For this purpose, samples collected in the Taubaté Basin and its surroundings, in the central segment of the RSCB, were used. The ages obtained date back to events from the Triassic to the Cretaceous, with the reactivation phase, rifting of the Gondwana continent, opening of the Atlantic Ocean and soaring of the Mantiqueira mountain range. For the Paleogene-Neogene, depositional period of the Taubaté Basin and emergence of the RSCB the disposition of the age peaks for the basin sediments, coming from distinct source areas, shows processes of stability in the exhumation rates and increase of the same through time. The lag-time rate calculations reveal a difference in the grain travel time for different locations in the basin, together with the different peak ages, these data corroborate the existence of more than one source area with expressivity in the sediment contribution.

Key words: Geology, Detrital Zircon Termocronhology; Zircon Fission Track; RSCB

## Sumário

|  |    |
|--|----|
| 1. INTRODUÇÃO .....  | 7  |
| 1.1 Localização da área de Estudo .....                          | 8  |
| 2. OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA .....                               | 9  |
| 3. ASPECTOS METODOLÓGICOS .....                                  | 10 |
| 3.1 Metodologia de Traço de Fissão em Zircão .....               | 10 |
| 3.1.1 Princípios Físicos .....                                   | 10 |
| 3.1.2 Princípios Analíticos .....                                | 11 |
| 3.1.3 Princípios Quantitativos .....                             | 12 |
| 3.2 Termocronologia em zircões Detríticos .....                  | 14 |
| 3.2.1 Conceitos Gerais e aplicações .....                        | 14 |
| 3.2.3 Taxa de <i>Lag-time</i> .....                              | 16 |
| 3.2.4 Gráfico idade estratigráfica vs idade deposicional .....   | 17 |
| 3.3 Coleta, Preparação e Procedimentos de Análise .....          | 18 |
| 3.3.1 Coleta .....   | 19 |
| 3.3.2 Concentração e preparação das amostras .....               | 20 |
| 3.3.3 Ataque Químico .....                                       | 22 |
| 3.3.4 Microsonda Eletrônica e Contagem de traços .....           | 22 |
| 4. ASPECTOS GEOLÓGICOS .....                                     | 23 |
| 4.1 Província Mantiqueira Central .....                          | 23 |
| 4.1.1 Caracterização Litoestratigráfica do Embasamento .....     | 26 |
| 4.2 <i>Rift</i> Continental do Sudeste do Brasil (RCSB) .....    | 29 |
| 4.2.1 Bacia de Taubaté .....                                     | 30 |
| 4.3 Evolução da região sudeste brasileira .....                  | 32 |
| 4.3.1 Ciclo Brasileiro .....                                     | 32 |
| 4.3.2 Eventos Triássicos/Jurássicos .....                        | 33 |
| 4.3.3 Ruptura do Gondwana e Abertura do Atlântico .....          | 33 |
| 4.3.4 Soerguimento Cretáceo .....                                | 34 |
| 4.3.5 <i>Rift</i> Continental do Sudeste Brasileiro (RCSB) ..... | 35 |
| 5. RESULTADOS .....  | 36 |
| 5.1 Bacia de Taubaté .....                                       | 36 |
| 5.1.1 Formação Tremembé .....                                    | 36 |
| 5.1.2 Formação Resende .....                                     | 36 |
| 5.2 Embasamento .....  | 48 |
| 5.2.1 Amostra TA04 .....   | 48 |

|  |    |
|--|----|
| 5.2.2 Amostra TA05.....  | 48 |
| 5.2.3 Amostra TG01.....  | 49 |
| 5.2.4 Amostra TG05.....  | 49 |
| 6. DISCUSSÕES E INTERPRETAÇÕES.....                                      | 51 |
| 6.1 Correlações dos eventos geológicos com as idades TFZ.....            | 51 |
| 6.2 Considerações e correlações quanto as taxas de <i>lag-time</i> ..... | 53 |
| 7. CONCLUSÕES.....   | 59 |
| 8. REFERÊNCIAS .....   | 60 |

## Índice de Tabelas

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabela 1:</b> Valores de profundidade para o início da retenção dos traços de fissão em zircão para cada grau geotérmico adotado. ....          | 17 |
| <b>Tabela 2:</b> Tabela de dados das amostras analisadas neste trabalho. ....  | 20 |
| <b>Tabela 3:</b> Compartimentação tectônica da Extremidade Sul do Orógeno Brasília. Fonte: Heilbron et al. (2004). ....                            | 25 |
| <b>Tabela 4:</b> Compartimentação tectônica da parte central do Orógeno Ribeira. Fonte: Heilbron et al. (2004). ....                               | 25 |
| <b>Tabela 5:</b> Idades para os grãos da amostra TA02. ....  | 36 |
| <b>Tabela 6:</b> Valor mínimo e máximo de <i>Lag-time</i> para a amostra TA02. ....  | 36 |
| <b>Tabela 7:</b> Valor da taxa de <i>Lag-time</i> para diferentes profundidades e temperaturas para a amostra TA02. ....                           | 36 |
| <b>Tabela 8:</b> Idades para os grãos da amostra TG02. ....  | 37 |
| <b>Tabela 9:</b> Valor mínimo e máximo de <i>Lag-time</i> segundo os picos obtidos para a amostra TG02. ....                                       | 38 |
| <b>Tabela 10:</b> Valor da taxa de <i>Lag-time</i> para diferentes profundidades e temperaturas segundo os picos obtidos para a amostra TG02. .... | 39 |
| <b>Tabela 11:</b> Dados de idade obtidos para a amostra TG03. ....   | 39 |
| <b>Tabela 12:</b> Valor mínimo e máximo de <i>Lag-time</i> segundo o pico obtidos para a amostra TG03. ....  | 40 |
| <b>Tabela 13:</b> Valor da taxa de <i>Lag-time</i> para diferentes profundidades e temperaturas segundo os picos obtidos para a amostra TG03. .... | 40 |
| <b>Tabela 14:</b> Idades para os grãos da amostra TG04. ....   | 41 |
| <b>Tabela 15:</b> Valor mínimo e máximo de <i>Lag-time</i> segundo o pico obtido para a amostra TG04. ....   | 43 |
| <b>Tabela 16:</b> Valor da taxa de <i>Lag-time</i> para diferentes profundidades e temperaturas segundo os picos obtidos para a amostra TG04. .... | 43 |
| <b>Tabela 17:</b> Idades para os grãos da amostra TA01. ....   | 44 |
| <b>Tabela 18:</b> Valor mínimo e máximo de <i>Lag-time</i> segundo os picos obtidos para a amostra TA01. ....                                      | 46 |
| <b>Tabela 19:</b> Valor da taxa de <i>Lag-time</i> para diferentes profundidades e temperaturas segundo os picos obtidos para a amostra TA01. .... | 46 |
| <b>Tabela 20:</b> Idades para os grãos da amostra TA03. ....   | 46 |
| <b>Tabela 21:</b> Valor mínimo e máximo de <i>Lag-time</i> segundo os picos obtidos para a amostra TA03. ....                                      | 47 |
| <b>Tabela 22:</b> Valor da taxa de <i>Lag-time</i> para diferentes profundidades e temperaturas segundo o pico obtido para a amostra TA03. ....    | 48 |
| <b>Tabela 23:</b> Idade para os grãos da amostra TG01. ....  | 49 |
| <b>Tabela 24:</b> Compilado dos valores de <i>lag-time</i> para a Fm. Resende e Fm. Tremembé. ....   | 53 |
| <b>Tabela 25:</b> Compilado de dados de taxa de <i>lag-time</i> para as amostras da Formação Resende e Tremembé. ....                              | 56 |
| <b>Tabela 26:</b> Compilado de idades dispostos conforme a região de localização da Formação dentro da Bacia de Taubaté. ....                      | 58 |

## Índice de Figuras

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 1:</b> Mapa de localização e principais rodovias de acesso a área de estudo. Fonte: Elaborado pelo autor.....   | 8  |
| <b>Figura 2:</b> Processo de formação do traço de fissão (modificado de Wagner & Van den Haute, 1992). A) Afastamento em direções opostas dos núclídeos filhos. B) Zona de desarranjo produzida no retículo cristalino do mineral (Traço de fissão).....  | 10 |
| <b>Figura 3:</b> Estágios de estabilidade termal adaptado para o TFZ. ....  | 11 |
| <b>Figura 4:</b> Representação de <i>lag-time</i> , tempo necessário para uma amostra esfriar, sofrer exumação em direção a superfície, erosão e deposição em uma bacia próxima. O tempo de erosão e deposição é praticamente instantâneo no tempo geológico, dessa forma o <i>lag-time</i> . (BERNET & GARVER, 2005). ....   | 15 |
| <b>Figura 5:</b> Gráfico idade deposicional vs idade de pico apresentando de modo resumido as três principais situações registradas pelo estudo detrítico. Rápida exumação (a); constante exumação (b); lenta exumação (c). Modificado de Bernet & Garver, 2005. ....   | 18 |
| <b>Figura 6:</b> Mapa de localização das amostras analisadas neste trabalho. ....   | 19 |
| <b>Figura 7:</b> A) Imagem BSE do grão de zircão que apresenta seus traços revelados. B) Imagem do grão de zircão contendo o <i>spot</i> de análise da microsonda eletrônica.....   | 22 |
| <b>Figura 8:</b> A) Imagem BSE do grão de zircão que apresenta seus traços revelados. B) Imagem do grão de zircão contendo um filtro para realçar e facilitar a visualização dos traços de fissão. ....   | 23 |
| <b>Figura 9:</b> Subdivisão do Sistema Orogênico Mantiqueira: o segmento setentrional é o Orógeno Araçuaí; o segmento central compreende a porção sul do Orógeno Brasília e os orógenos Ribeira e Apiaí; e o segmento meridional inclui os orógenos Dom Feliciano e São Gabriel. Em roxo e laranja estão representados os terrenos que alojam os arcos magmáticos neoproterozóicos. Fonte: HEILBRON <i>et al.</i> , (2004)..... | 24 |
| <b>Figura 10:</b> Mapa geológico da área estudada. Compilado de CPRM (2001).....  | 27 |
| <b>Figura 11:</b> Mapa geológico da Bacia de Taubaté.....   | 30 |
| <b>Figura 12:</b> Coluna litoestratigráfica contendo os eventos tectônicos para a Bacia de Taubaté. Letras: t - depósitos de tálus; c - depósitos coluviais; ca - depósitos colúvio-aluviais; a – depósitos aluviais. Modificado de Riccomini (1989).....   | 31 |
| <b>Figura 13:</b> Gráfico radial contendo os picos de idades e a distribuição cumulativa para a amostra TG03. ....  | 38 |
| <b>Figura 14:</b> Gráfico radial contendo o pico de idade amostra TG03. ....  | 40 |
| <b>Figura 15:</b> Gráfico radial contendo os picos de idades e a distribuição cumulativa para a amostra TG04. ....  | 42 |
| <b>Figura 16:</b> Gráfico radial contendo os picos de idades e a distribuição cumulativa para a amostra TA01. ....  | 45 |
| <b>Figura 17:</b> Gráfico radial contendo os picos de idades e a distribuição cumulativa para a amostra TA03. ....  | 47 |
| <b>Figura 18:</b> Gráfico radial apresentando dados estatísticos para a amostra TA04. ....  | 48 |
| <b>Figura 19:</b> Gráfico radial apresentando dados estatísticos para a amostra TA05. ....  | 49 |
| <b>Figura 20:</b> Gráfico radial apresentando dados estatísticos para a amostra TG05. ....  | 50 |
| <b>Figura 21:</b> Gráfico da distribuição dos picos de idade associado aos principais eventos geológicos da área de estudo. ....  | 51 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 22:</b> Gráfico da distribuição das idades centrais do embasamento associadas aos principais eventos geológicos da área de estudo. ....          | 52 |
| <b>Figura 23:</b> Gráfico idade deposicional vs idade de pico para Formação Resende e Formação Tremembé. ....  | 54 |
| <b>Figura 24:</b> Gráfico idade estratigráfico vs idade de pico, apresentando a síntese interpretativa com base nos dados de pico para as idades TFZ. .... | 55 |
| <b>Figura 25:</b> Mapa geológico da Bacia de Taubaté contendo as taxas de <i>lag-time</i> com base nos picos e localização das amostras. ....              | 57 |

## 1. INTRODUÇÃO

Durante o Cenozoico a margem continental do sudeste brasileiro adquire a estrutura de duplo escarpamento formado pelas Serras do Mar e Mantiqueira, com aproximadamente 1000 km de extensão dispostos paralelamente à costa na região emersa do continente, entre as cidades de Curitiba, Paraná e São João do Itaboraí, Rio de Janeiro. A este conjunto, Almeida (1976) designou de *Rifts* da Serra do Mar, modificado posteriormente como *Rift* Continental do Sudeste do Brasil (RCSB) por Riccomini (1989).

Concomitante a formação desse sistema *rift* houve o preenchimento sedimentar Cenozoico da Bacia de Taubaté e outras bacias sedimentares. As informações referentes aos processos geológicos pretéritos a sedimentação destas bacias, estão armazenados em cristais de zircão, registrando informações termocronológicas referentes aos principais eventos geológicos da área de estudo, como o riftamento e abertura do Oceano Atlântico, soerguimento Cretáceo e o processo de rifteamento das Serras do Mar e Mantiqueira.

Inserida no contexto central do RCSB, a bacia de Taubaté possui arcabouço formado por hemi-grabens separados por zonas de transferência em típica geometria de bacia do tipo *rift* (CARVALHO A. *et al.*, 2010), com um pacote sedimentar que atinge até 800 m de espessura (RICCOMINI *et al.*, 2004). O principal pacote tectono-sedimentar da Bacia de Taubaté é denominado por Riccomini (1990) como Grupo Taubaté, compreendendo as unidades: Formação Resende (leques aluviais-proximais e fluviais-distais); Formação Tremembé (lacustre) e a Formação São Paulo (fluvial meandrante). Além do Grupo Taubaté, há ainda na bacia outro pacote sedimentar expressivo, a Formação Pindamonhangaba (fluvial), cuja deposição ocorreu posteriormente às demais, assim como a Formação Itaquaquecetuba, atribuída a um sistema fluvial entrelaçado.

A abordagem de estudo por meio de métodos termocronológicos se mostra eficiente para a compreensão da evolução de um ambiente geológico. A maior parte dos resultados para a área, disponíveis na literatura, foram obtidos a partir de métodos de traço de fissão em apatitas (TFA) e zircão (TFZ) (GALLAGUER *et al.* 1994;

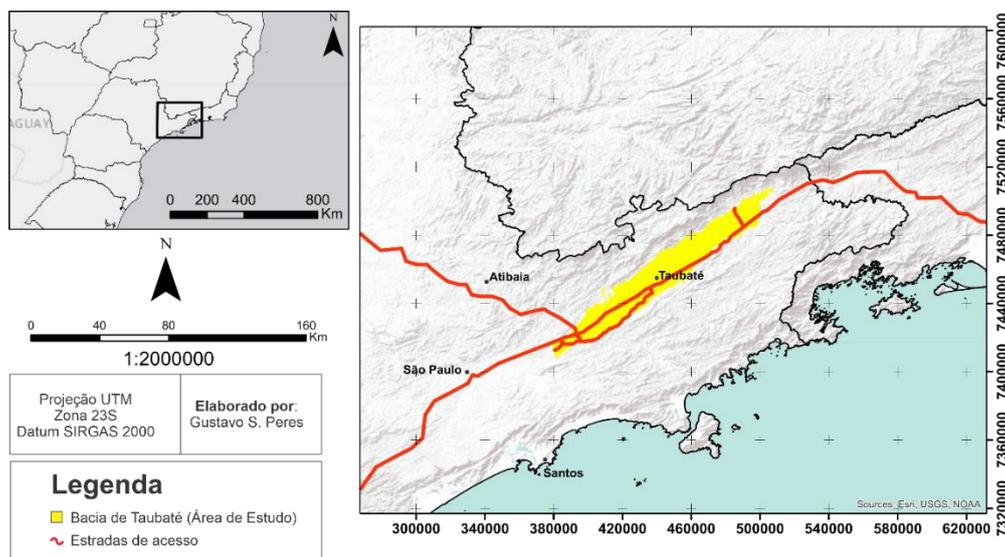
OLIVEIRA et al. , 200; GODOY, 2003; RIBEIRO, 2003; TELLO SAENZ et al. 2003; HACKSPACHER et al., 2007; GENARO, 2008; COGNÉ et al., 2012).

A evolução dos estudos termocronológicos na área, demonstram a atuação de pelo menos três eventos térmicos pós Ciclo Brasileiro, de idades Juro-Cretácea Inferior representando a reativação tectônica, rifteamento do Gondwana na região continental sudeste, abertura do Atlântico e soerguimento da Serra da Mantiqueira e proto Serra do Mar); Cretácea Superior com novo soerguimento da Serra do Mar; e Paleogena-Neogena com a abertura do RCSB.

Dessa maneira, para elucidar referências aos processos termotectônicos pretéritos (Pré-Cenozóicos) e concomitantes a evolução do RCSB (Paleogeno-Neogeno), relacionados à deposição da Bacia de Taubaté, que preservam informações de suas áreas fontes (Serras do Mar e da Mantiqueira), foi utilizada a metodologia de traço de fissão em zircão detríticos (TFZD) como geotermômetro, devido sua abundância em bacias sedimentares e resistência a altas temperaturas

### 1.1 Localização da área de Estudo

A Bacia de Taubaté está localizada na porção leste do Estado de São Paulo entre as serras do Mar e Mantiqueira. Seu acesso pode ser feito, principalmente, através da rodovia Presidente Dutra (SP-60), sendo cortada também pelas rodovias Carvalho Pinto (SP-70) e Ayrton Senna (SP-70) e pela BR- 459.



**Figura 1:** Mapa de localização e principais rodovias de acesso à área de estudo. Fonte: Elaborado pelo autor.

## 2. OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA

Este trabalho tem como objetivo trazer elucidacões referentes à evoluçã geológica atuante na porçã central do *Rift* Continental do Sudeste Brasil durante o paleogeno, por meio de estudos de traço de fissã em zircões detríticos (TFZD) obtidos de amostras do Grupo Taubaté (Fm. Resende e Fm. Tremembé) de idade Eoceno a Oligoceno, na Bacia de Taubaté e seu entorno (Embasamento).

Para isso, obteve-se dados referentes as idades de traço de fissã em zircã, *lag-time* e taxa de *lag-time*, que fornecem informacões referentes ao embasamento, nã sã para a compreensã dos processos atuantes no paleogeno, mas sim o contexto evolutivo pré-Cenozoico da regiã.

A escolha da Bacia de Taubaté se pauta, na grande expressividade de seus sedimentos, se comparadas a outras bacias no mesmo contexto, localizaçã e conhecimento bem difundido quanto seus intervalos deposicionais.

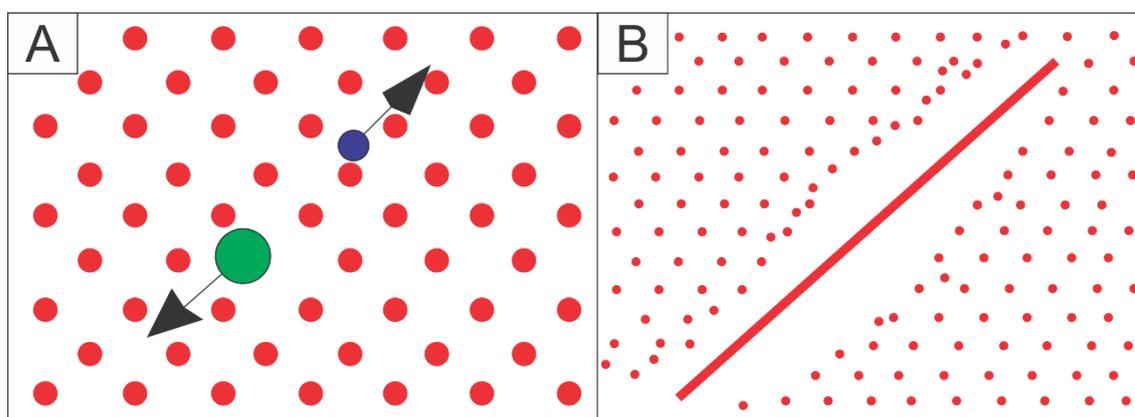
A compreensã dos eventos de idade paleogena, tem como base, a obtençã idades de grãos detríticos que preservam informacões pretéritas aos processos atuantes no momento da abertura do RCSB.

### 3. ASPECTOS METODOLÓGICOS

#### 3.1 Metodologia de Traço de Fissão em Zircão

##### 3.1.1 Princípios Físicos

A análise por traço de fissão (AFT) foi inicialmente proposta entre as décadas de 1950 e 1960, como uma ferramenta termocronológica (YOUNG, 1958; SILK e BARNER, 1959). A técnica baseia-se no princípio teórico em que se realiza a contagem dos traços gerados no mineral analisado, resultado da fissão dos átomos de  $U^{238}$ . O produto do decaimento do átomo  $U^{238}$  resulta em dois nuclídeos “filhos” de densidades comparáveis. Esses nuclídeos se afastam em direções opostas liberando energia cinética, dando origem a “vazios” ou “defeitos” cilíndricos (zonas de desarranjo) no retículo mineral, denominados traço de fissão (Figura 2).



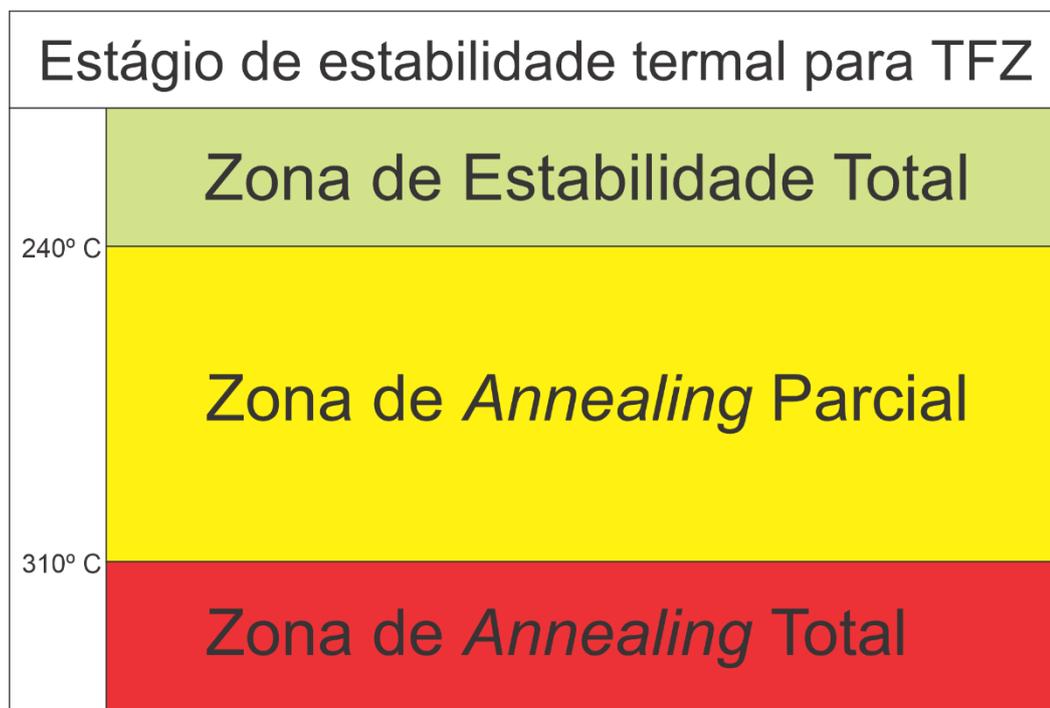
**Figura 2:** Processo de formação do traço de fissão (modificado de Wagner & Van den Haute, 1992). A) Afastamento em direções opostas dos nuclídeos filhos. B) Zona de desarranjo produzida no retículo cristalino do mineral (Traço de fissão).

As zonas de desarranjo são passíveis de se recuperarem, sofrendo uma diminuição progressiva, caso o mineral hospedeiro seja submetido a temperaturas elevadas, podendo até mesmo serem apagadas. Este fenômeno é denominado *annealing* (cozimento), e foi observado nos primeiros estágios do desenvolvimento do método (FLEISCHER *et al.*, 1965).

Dessa forma, os traços de fissão, levando-se em conta o mineral hospedeiro, para este estudo o zircão, são sensíveis a diferentes intervalos de temperaturas (*annealing* ou recozimento) e ao tempo em um ambiente geológico.

Estudos referentes ao processo de *annealing* em zircões à diferentes temperaturas e tempo de exposição, foram desenvolvidos por autores como Yamada *et al.* (1995) e Tagami *et al.* (1998). Modelos de *annealing* foram propostos a partir dos estudos supracitados como por exemplo Tagami (2005), Yamada (2007). A partir destes são reconhecidas três zonas térmicas amplamente aceitas, que podem variar de autor

para autor e que foram utilizadas neste trabalho: menores que 240 °C (Zona de estabilidade) sendo 240° C a temperatura de fechamento, entre 240 e 310 ° C (Zona de *annealing* parcial) e maiores que 310 ° C (Zona de *annealing* total). (Figura 3).



**Figura 3:** Estágios de estabilidade termal adaptado para o TFZ.

### 3.1.2 Princípios Analíticos

Para o cálculo da idade do traço de fissão, é necessário estimar-se a quantidade inicial de  $U^{238}$  (isótopos pai) do mineral, que pode ser feito de forma indireta (método do detector externo - EDM) ou de forma direta, por meio da quantificação de  $U^{238}$  em microsonda eletrônica (EPMA) ou em espectrômetro de massa como o ICP-MS (KOHN *et al.* 2019).

Para este trabalho, optou-se pela utilização da microsonda eletrônica do Departamento de Geologia / Unesp Campus Rio Claro, ao invés do método EDM, devido a facilidade do acesso ao equipamento, menor custo e a não necessidade de utilização de reator nuclear. Para tal, fazem necessárias adaptações referentes aos cálculos de idade, baseados na proposta de Gombosi *et al.* (2013), abordados na seção 3.1.3.

Cada grão de zircão foi submetido a análise pela microsonda eletrônica que fornece dados quantitativos referente a porcentagem em massa de óxido de urânio ( $UO_2$ ). O elemento de interesse é o Urânio, dessa forma a partir do dado obtido isola-se

sua massa que representa cerca de 88,15% de sua massa total do óxido. O valor isolado representa a massa de  $U^{235}$  e  $U^{238}$ , devido a relação  $U^{235}$  (0,7204%) e  $U^{238}$  (99,2842%) existente na natureza calcula-se o valor total de  $U^{238}$ , valor de interesse, que por sua vez é convertido em ppm (GOMBOSI et al. 2018).

Para as análises de microsonda eletrônica utilizou-se corrente de aceleração de 25 kV e corrente de 300nA. Para cada elemento analisado, o tempo de contagem no pico para foi de 400s. O mesmo tempo foi distribuído nas posições superiores e inferiores do background (200s cada). Os elementos analisados, as respectivas linhas de raio X e os padrões de calibração foram: Zr, L alfa, zircão; Hf, M  $\alpha$ , Hf metálico; U, M  $\beta$ , UO<sub>2</sub>; Th, M alfa, Th glass; Si, K alfa, zircão. Foi aplicada correção da interferência de Th na linha do U.

Além dos dados analíticos, a microsonda eletrônica gera uma imagem retroespalhada da superfície do grão analisado, utilizada posteriormente para a contagem dos traços e quantificação da área.

### 3.1.3 Princípios Quantitativos

Este tópico aborda o cálculo de idade e o cálculo de erro para os traços de fissão em zircão adaptado a microsonda eletrônica como base na proposta de Gombosi *et al.*, (2013).

O cálculo de idade por traço de fissão não se difere muito de outros métodos de datação isotópica, que se fundamentam no decaimento radioativo. Em sua forma mais básica a equação fundamental da idade (Eq. 1) do método pode ser escrita da seguinte forma:

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln\left(1 + \frac{1}{\lambda_f} \frac{2\rho_s}{[U^{238}]L}\right) \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde  $\lambda$  é a constante de decaimento total de  $U^{238}$  ( $1,55125 \times 10^{-10}$  (JAFHEY *et al.*, 1971)),  $\lambda_f$  é a constante de decaimento de fissão com valor recomendado pela IUPAC-IUGS de  $8,45 \pm 0,10 \times 10^{-17}$ , (HOLDEN e HOFFMAN, 2000),  $\rho_s$  é a densidade (Traços por unidade de área) dos traços de fissão espontâneos em uma superfície interna do cristal,  $[U^{238}]$  é o número de átomos de  $U^{238}$  por unidade de volume, e L o comprimento do traço.

Entretanto, o cálculo de idade através da quantificação direta de  $U^{238}$  pela microsonda eletrônica, necessita de algumas adaptações (Gombosi *et al.*, 2014). A equação da idade de traço de fissão simplificada é apresentada por Gleadow, (1974);

Wagner e Van den Haute, (1992), remove quaisquer termos associados à irradiação e assume a medição direta de concentração de  $U^{238}$ . (Eq. 2)

$$t = \frac{1}{\lambda_\alpha} \ln\left(\frac{\lambda_\alpha}{\lambda_{sf}} \frac{\rho_s}{N_{238U}} QG + 1\right) \text{ (Eq. 2)}$$

Onde  $\rho_s$  é a densidade de traços espontâneos que cruzam a superfície do cristal dado por:  $\rho_s = \frac{N}{A}$  (onde N é o número de traços e A, a área em cm<sup>2</sup>).  $N_{238U}$  é o número de átomos de  $U^{238}$  abaixo da superfície analisada. G o fator de geometria, onde o valor de 0,5 equivale a uma superfície interna (geometria  $4\pi$ ), e  $\lambda_{sf}$  e  $\lambda_\alpha$  são as constantes de fissão espontânea e decaimento alfa do  $U^{238}$ . A variável Q é um fator de procedimento, um termo combinado que descreve tanto a eficiência de gravação de um material quanto a variância observacional do operador (JONCKHEERE e VAN DEN HAUTE, 2002).

Ao utilizar a equação proposta, três grandes fontes de incerteza são introduzidas: o valor de  $\lambda_{sf}$ , a incerteza na medição de  $\rho_s$  e a determinação do número de átomos  $U^{238}$ . Neste contexto insere-se o fator Z (Eq. 3) como uma constante de proporcionalidade determinada usando uma amostra de dados conhecidas, no caso do presente trabalho utilizou-se uma amostra de Zircão Fish Canyon anteriormente analisada nas dependências do laboratório de microsonda eletrônica do DG/UNESP-Campus Rio Claro (Departamento de Geologia). Assim temos:

$$Z = \frac{e^{\lambda_\alpha t_{std}} - 1}{\lambda_\alpha \frac{\rho_s}{N_{238U} G}} \text{ (Eq. 3)}$$

Onde  $t_{std}$  é a idade de uma amostra padrão determinada restritamente usando outra técnica geocronológica (K–Ar ou  $Ar^{40}/Ar^{39}$ ).

Substituindo Z na equação fundamental apresentada temos (Eq. 4):

$$t = \frac{1}{\lambda_\alpha} \ln\left(\frac{\rho_s}{N_{238U}} GZ\lambda_\alpha + 1\right) \text{ (Eq. 4)}$$

O cálculo referente ao erro da idade é obtido através da distribuição de Poisson sendo expressa segundo a forma modificada de Galbraith (2005), (Eq. 5):

$$\frac{\sigma(\hat{t})}{\hat{t}} = \sqrt{\frac{1}{N_s} + \left(\frac{\sigma(N_{238U})}{N_{238U}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma(\hat{Z})}{\hat{Z}}\right)^2} \text{ (Eq. 4)}$$

As idades finais são analisadas por meio de histogramas e gráficos gerados pelo software IsoplotR (VERMEESCHE, 2018) e no editor de planilhas Excel.

## 3.2 Termocronologia em zircões Detríticos

### 3.2.1 Conceitos Gerais e aplicações

Os conceitos expostos na seção 3.1.1 Princípios Físicos, são utilizados amplamente na termocronologia para a obtenção de idades de traço de fissão em diversos estudos. Tais idades representam o momento em que a amostra analisada atravessou a isoterma de *annealing* total.

A termocronologia detrítica tem como base a datação radiométrica de minerais em sedimentos e rochas sedimentares (principalmente apatita e zircão) com objetivo de investigar informações pretéritas da área fonte de origem ou eventos térmicos que afetaram a bacia em que se encontram. Para tal, pressupõe-se que os minerais foram gerados, soerguidos, erodidos, transportados e depositados armazenando ou não em seu interior informações de sua origem. (BERNET & GARVER, 2005).

O zircão, por possuir uma maior temperatura de *annealing*, é menos sensível aos processos geológicos de baixas temperaturas, armazenando informações mais antigas que metodologias termocronológicas em apatita, por exemplo. Dentre as possíveis informações obtidas através de zircão detríticos em rochas sedimentares temos:

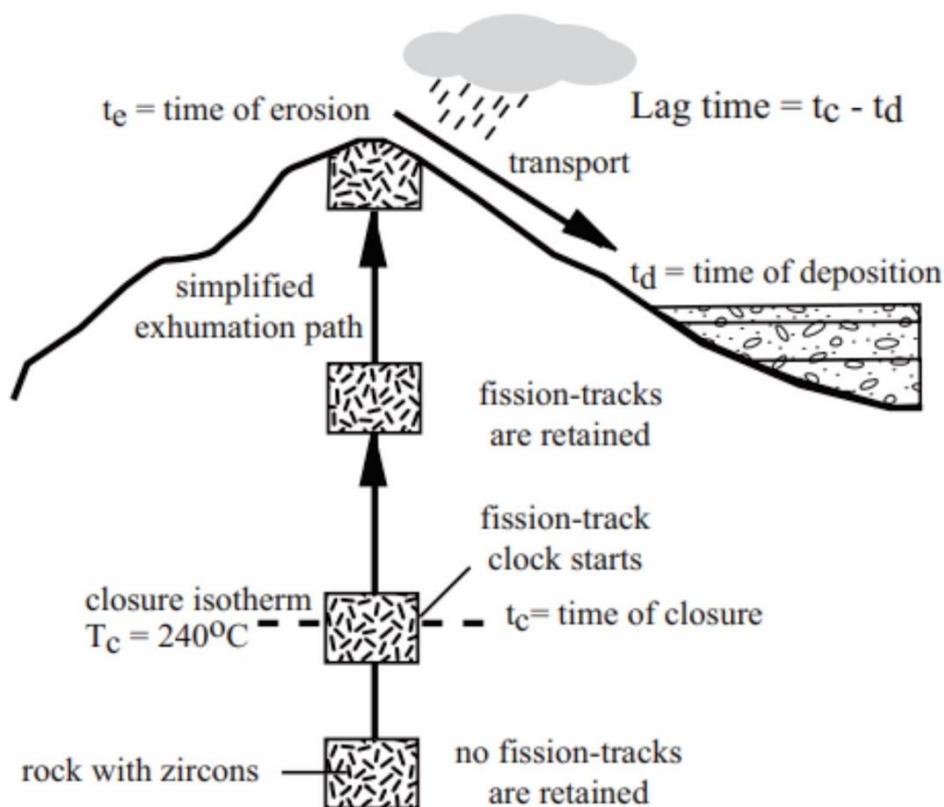
- Reaquecimento da bacia hospedeira: Em caso de idades TFZ mais recentes do que a idade deposicional da bacia, os dados em questão podem indicar processos térmicos ocorridos pela bacia hospedeira, como idade de processos digenéticos ou intrusões magmáticas. (BERNET & GARVER, 2005).
- Proveniência dos sedimentos: A presença de zircão na maior parte dos litotipos, faz com que este mineral seja muito utilizado em estudos de proveniência sedimentar (BERNET & GARVER, 2005). Devido sua alta resistência térmica e física os zircões detríticos podem revelar uma história ígnea e metamórfica policíclica, resultado de retrabalhamento das rochas hospedeiras pretéritas. (CARTER & BRISTOW, 2000).
- *Lag-time*: O conceito de *lag-time*, consiste no intervalo de tempo em que o zircão levou para atravessar a isoterma de *annealing* pela última vez e atingir o topo da área fonte (Considerando o tempo de erosão, transporte e sedimentação instantâneo no tempo geológico). Aborda-se o tema na seção 3.2.2

- Taxa de *lag-time*: A taxa de *lag-time* tem como base o valor de *lag-time*, e a profundidade da isoterma de *annealing* total, revelando a taxa em km/Ma que a amostra percorreu desde a passagem pela isoterma de *annealing* até atingir o topo da área fonte. Aborda-se o tema na seção 3.2.3

Os métodos utilizados neste estudo se baseiam em estudos detriticos de *lag-time* e taxa de *lag-time* e são abordados nas seções a seguir.

### 3.2.2 *Lag-time*

Para o cálculo de *lag-time*, serão utilizados os princípios propostos por Garver et al. (1999) e Bernet & Garver (2005). utilizados principalmente em cinturões orogênicos como geotermômetros mais resistentes a altas temperaturas. A figura 4, apresenta um desenho esquemático para o *lag-time*.



**Figura 4:** Representação de *lag-time*, tempo necessário para uma amostra esfriar, sofrer exumação em direção a superfície, erosão e deposição em uma bacia próxima. O tempo de erosão e deposição é praticamente instantâneo no tempo geológico, dessa forma o *lag-time*. (BERNET & GARVER, 2005).

Conforme apresentado na figura 4, o valor de *lag-time* é obtido através do cálculo:

$$lagtime = t_c - t_d$$

Onde  $t_c$  representa a idade do traço de fissão da amostra, que se inicia com a passagem dela na isoterma de *annealing* total, e  $t_d$  a idade estratigráfica do estrato onde a amostra foi coletada. No presente trabalho foram utilizadas as idades correspondentes Formação Resende (53 Ma a 23 Ma.) e Formação Tremembé para a Resende (33 Ma a 27 Ma.) (RICCOMINI, 1989)

No presente trabalho, o tempo de erosão, transporte e deposição é considerado praticamente instantâneo no tempo geológico, dessa forma o valor de *lag-time* revela o tempo necessário para o cristal de zircão passar pela isoterma de *annealing* total, iniciar o registro dos traços de fissão e atingir o topo da área fonte. Em outras palavras o *lag-time*, neste caso, revela o momento em que o cristal de zircão estudado chegou no topo da área fonte. (BERNET & GARVER, 2005).

O cálculo de *lag-time* é obtido após um tratamento estatístico das idades multigrãos. Segundo Bernet & Garver (2005), uma das formas de se analisar um conjunto de idades TFZ para grãos detríticos é a decomposição do conjunto de amostras em idades de picos denominadas (P1, P2... etc). Tais idades de pico são dispostas em distribuições bimodais e gráficos radiais o que pode revelar distintas áreas fontes para a amostra.

Seguindo o modelo acima, os cálculos de *lag-time* foram realizados com base nas idades de pico obtidas pelo software IsoplotR (VERMEESCHE, 2018) baseadas nos algoritmos de Galbraith and Green (1993).

### 3.2.3 Taxa de *Lag-time*

A taxa de *lag-time*, segue os princípios propostos por Bernet & Garver (2005), sendo a taxa em km/Ma ou m/Ma apresentada pelos cristais de zircão desde sua passagem pela isoterma de *Annealing* total até sua posterior deposição. Para tal cálculo parte-se do princípio de que as idades registradas nos cristais de zircão são mais antigas do que as idades deposicionais onde estas se encontram, outro fator importante a ser considerado é a temperatura de fechamento, ou a temperatura de início do registro dos traços de fissão, abordada na seção 3.1.1, que por sua vez começa a uma certa profundidade, aqui considerada aproximadamente 7 km (variando com o grau geotérmico), obtida pela equação a seguir (Eq. 5):

$$P = \frac{T_{ir} - T_a}{G} \text{ (Eq. 5)}$$

Onde, P é a profundidade inicial,  $T_{ir}$  a isoterma de *annealing* total (240°C para o zircão como já abordado),  $T_a$  a temperatura ambiente (25°C) e G o grau geotérmico adotado para a área de estudo, para um melhor resultado adotou-se os valores de 25°C, 30°C e 35°C. Os resultados dos cálculos são apresentados na tabela 1.

**Tabela 1:** Valores de profundidade para o início da retenção dos traços de fissão em zircão para cada grau geotérmico adotado.

| Temperatura →  | 25°C   | 30°C   | 35°C   |
|----------------|--------|--------|--------|
| Profundidade → | 8,6 km | 7,1 km | 6,1 km |

O cálculo de taxa *lag-time* portanto, considera que os grãos analisados na bacia, percorreram aproximadamente de 6,1 km a 8,6 km até a superfície, ou seja, a espessura de rocha que se encontrava sobre amostra precisou ser erodida, para que então esta fosse exposta, erodida e transportada para a bacia.

O princípio de picos de idade apresentados para o *lag-time*, é também utilizado para a obtenção da taxa de *lag-time*. Retirando da idade de pico a idade deposicional (idade em que já sabemos que a amostra se encontrava depositada na bacia), temos o tempo máximo em que a mostra percorreu os 7 km, foi erodida e transportada (sendo a erosão e transporte considerados instantâneos como abordado anteriormente), até ser depositada na bacia. A formula apresentada a seguir, fornece, portanto, a taxa máxima e mínima do tempo de trajetória (taxa de *lag-time*) dos grãos de zircão:

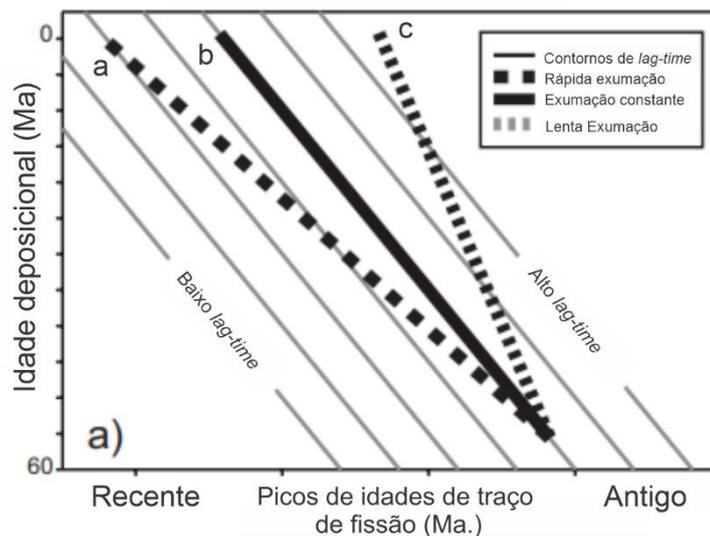
$$T_{lt} = \frac{P}{I_{tf} - I_d}$$

Onde  $I_{lt}$ , é a taxa de *lag-time*, P a profundidade inicial calculada e apresentada na tabela 1, e  $I_{tf}$  a idade obtida através do traço de fissão) e  $I_d$  idade deposicional máxima e mínima (intervalo deposicional para a Fm. Resende) da formação em que amostra foi coletada.

### 3.2.4 Gráfico idade estratigráfica vs idade deposicional

Quando se realiza a datação de mais de um estrato com intervalo estratigráfico bem definido, Bernet & Garver (2005) propõe uma análise com base nas idades de pico,

*lag-time*, e idade estratigráfica, do comportamento tectônico do embasamento que deu origem a esses grãos. A figura 5, demonstra a abordagem que pode ser realizada e as diferentes situações que podem ser observadas.



**Figura 5:** Gráfico idade deposicional vs idade de pico apresentando de modo resumido as três principais situações registradas pelo estudo detrítico. Rápida exumação (a); constante exumação (b); lenta exumação (c). Modificado de Bernet & Garver, 2005.

A plotagem dos picos de idade de traço de fissão como apresentado na figura 5, revelam três comportamentos distintos: Uma rápida exumação, representada pelo rompimento positivo da reta de *lag-time* (reta a); exumação constante ao longo do tempo geológico, representada por um paralelismo a linha de *lag-time* (reta b); exumação lenta representada pelo rompimento negativo da reta de *lag-time* (reta c).

### 3.3 Coleta, Preparação e Procedimentos de Análise

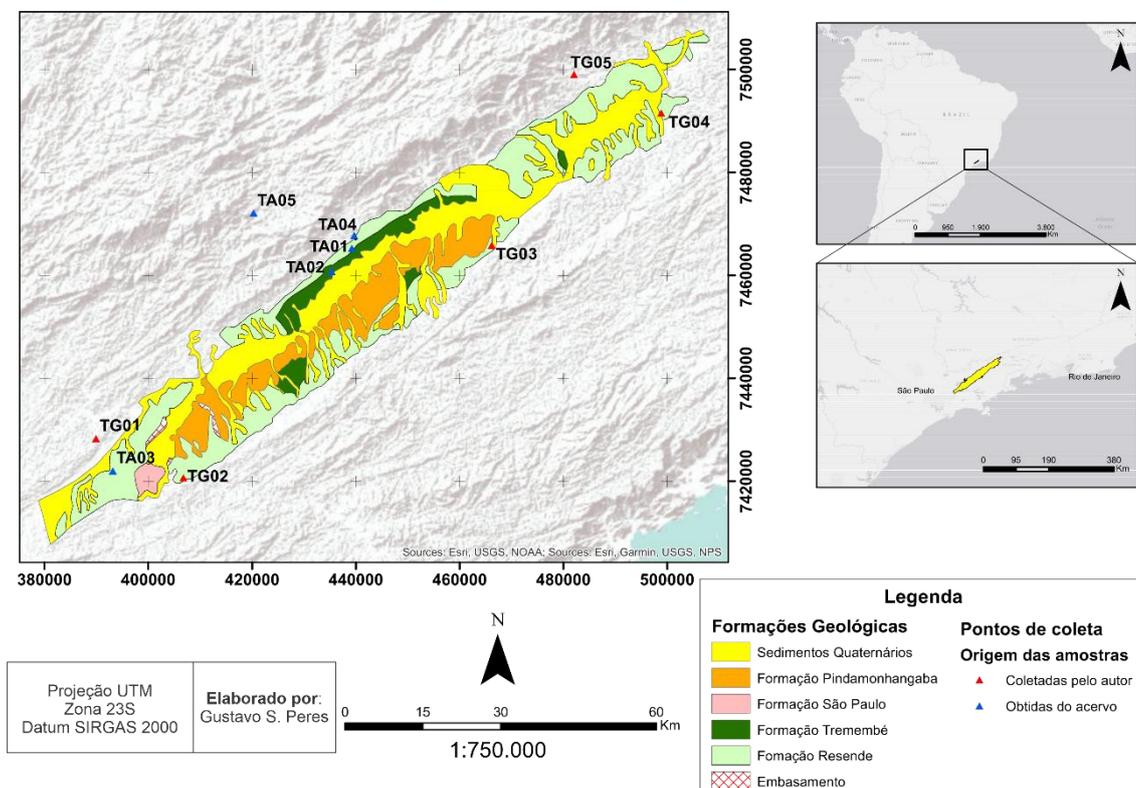
Foram coletadas amostras da Bacia de Taubaté, de modo a abranger preferencialmente a unidade com maior expressividade a Formação Resende e em menor quantidade a Formação Tremembé. Além disso, foi amostrado alguns pontos no embasamento cristalino, sendo 6 amostras o total coletado.

Além disso, obteve-se acesso a amostras pertencentes ao acervo do grupo de termocronologia e termocronometria da Unesp Rio Claro, complementando o material coletado.

Todas as amostras foram submetidas aos mesmos processos de concentração, preparação, e análise por microsonda eletrônica.

### 3.3.1 Coleta

A coleta foi realizada em um uma única campanha de campo de um dia, a seguir apresenta-se o mapa contendo os pontos coletados e os pontos referentes ao material do acervo citado anteriormente (Figura 6).



**Figura 6:** Mapa de localização das amostras analisadas neste trabalho.

As coordenadas e o tipo de rocha das amostras coletadas (sigla TG) e das utilizadas do acervo (Sigla TA) podem ser observados sucintamente na tabela 2.

**Tabela 2:** Tabela de dados das amostras analisadas neste trabalho.

| Amostras coletadas |          |            |         |                                       |
|--------------------|----------|------------|---------|---------------------------------------|
| Amostra            | Cota (m) | Coordenada |         | Tipo de Rocha                         |
|                    |          | x          | y       |                                       |
| TG01               | 650      | 389924     | 7428322 | Gnaiss                                |
| TG02               | 645      | 406799     | 7420727 | Conglomerado da Fm. Resende           |
| TG03               | 555      | 466224     | 7465889 | Conglomerado da Fm. Resende           |
| TG04               | 546      | 498922     | 7491510 | Arenito da Fm. Resende                |
| TG05               | 625      | 482098     | 7499040 | Gnaiss                                |
| Amostras do acervo |          |            |         |                                       |
| Amostra            | Cota (m) | Coordenada |         | Tipo de Rocha                         |
|                    |          | x          | y       |                                       |
| TA01               | 600      | 435356     | 7460844 | Arenito da Fm. Resende                |
| TA02               | 570      | 439246     | 7465310 | Arenito da Fm. Tremembé               |
| TA03               | 625      | 393152     | 7422089 | Conglomerado arenítico da Fm. Resende |
| TA04               | 603      | 439711     | 7467774 | Gnaiss                                |
| TA05               | 940      | 420296     | 7472091 | Gnaiss                                |

### 3.3.2 Concentração e preparação das amostras

O processo de preparação das amostras para a análise constituiu uma sequência de oito etapas I) Britagem Mecânica; II) Peneiramento; III) Bateamento; IV) Separação magnética; V) Separação por líquidos densos; VI) Separação Manual; VII) Montagem e incrustação e VIII) Polimento

- I. **Britagem Mecânica:** Esta etapa do processo foi realizada nas dependências do Laboratório de Preparação de Amostras Pedológicas e Geológicas (LAPEGE) do Departamento de Geologia (DG) da UNESP/Rio Claro. O procedimento consistiu na fragmentação das rochas para a desagregação do material de interesse, inicialmente por meio de um britador Furlan, BM2010 e posteriormente por um britador de mandíbula de menor porte Retsch, B31/A, produzindo um “pó de rocha” contendo todos os minerais desagregados.
- II. **Peneiramento:** O pó de rocha obtido na etapa anterior, é submetido ao processo de peneiramento por meio de peneiras (tamanho de 300 µm), onde por meio de mesas vibratórias o peneiramento ocorre de maneira controlada (quantidade na qual possa realizar o peneiramento completo da alíquota depositada) em turnos de 20 min até se finalizar o conteúdo total da amostra.

- III. **Bateamento:** O produto do peneiramento é então submetido ao bateamento manual, com o objetivo de concentrar os minerais mais densos, entre eles os grãos de zircão.
- IV. **Separação Magnética:** A separação magnética se inicia com a passagem de um ímã de neodímio para remoção dos minerais muito magnéticos como a magnetita. Posteriormente através da suscetibilidade magnéticas intrínsecas em cada mineral, se utiliza o separador magnético *Isodynamic Frantz*®, utilizando-se combinações adequadas de amperagem, campo magnético e inclinação do aparelho.
- V. **Separação por Líquidos Densos:** O produto da separação magnética é então submetido a separação por densidade. O zircão apresenta densidade relativa de aproximadamente  $d= 4,68 \text{ g/cm}^2$ , com sua imersão no bromofórmio ( $d=2,86 \text{ g/cm}^2$ ), os minerais mais densos, entre eles o zircão, apatita, monazita etc... podem ser separados dos demais.
- VI. **Separação Manual:** Esta etapa é de crucial importância. Devido heterogeneidade do zircão, grãos de diferentes formas e teores de urânio se encontram em uma mesma amostra sedimentar. É importante que haja uma seleção sistemática focando no hábito, coloração, e grau de alteração. Para isso, por meio de uma lupa pode-se separar os grãos de interesse, que para a melhor aplicabilidade do método proposto, desconsiderou grãos de coloração avermelhada, e demasiadamente arredondados (devido a deterioração demasiada do material).
- VII. **Montagem e Incrustação:** Os grãos selecionados são então dispostos sobre uma porção de folha de *Teflon* de  $1 \text{ cm}^2$  já com vaselina, para posterior incrustação. O processo de incrustação consiste no aquecimento da folha de teflon através de uma chapa de aquecimento a temperaturas de  $240^\circ\text{C}$ .
- VIII. **Polimento:** A etapa de polimento consiste na exposição do interior do grão mineral, eliminando heterogeneidades presentes em sua superfície podendo apresentar uma superfície polida para que seja possível contagem dos traços fósseis do mineral. Para tal utiliza-se uma combinação de lixas e panos de polimento de diferentes gradações. (Lixa 800/2400 e água, Lixa 1200/4000 e água, Pano DPMOL e óleo lubrificante e Pano DPMOL, pasta diamantada e óleo lubrificante).

### 3.3.3 Ataque Químico

Posterior à concentração e preparação das amostras, realiza-se o ataque químico das mesmas com o objetivo de revelar-se os traços fósseis presentes no mineral. Para isso submete-se as folhas de teflon já polidas a uma imersão em uma mistura alcalina eutética de KOH:NaOH (1:1), a uma temperatura de  $230^{\circ} \pm 5^{\circ} \text{C}$ .

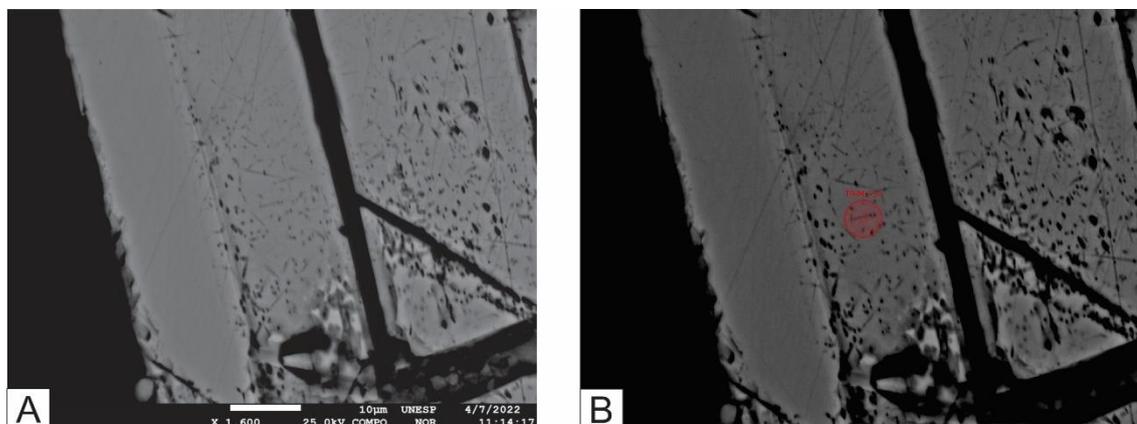
O tempo de ataque varia de amostra para amostra, para este trabalho cada amostra levou em média  $10 \pm 2$  h para que houvesse a revelação total dos traços. O critério para a finalização do ataque é a revelação dos traços no mineral, é delicado devido ao fato de poder ocorrer deterioração total da superfície do grão tornando-o inutilizável. Para amenizar as perdas, fez necessário pausas a cada 1h de ataque para análise da revelação (esse tempo pode variar de amostra para amostra).

Dessa forma, o ataque ocorreu em exposições de 1 h até que se atingissem a revelação total dos traços. A análise posterior a cada intervalo de 1 hora foi realizada em um microscópio nas dependências do Laboratório de Cronologia por Trações de Fissão: Núcleo de Cronologia e Cronometria para a verificação do andamento e qualidade do ataque.

### 3.3.4 Microssonda Eletrônica e Contagem de traços

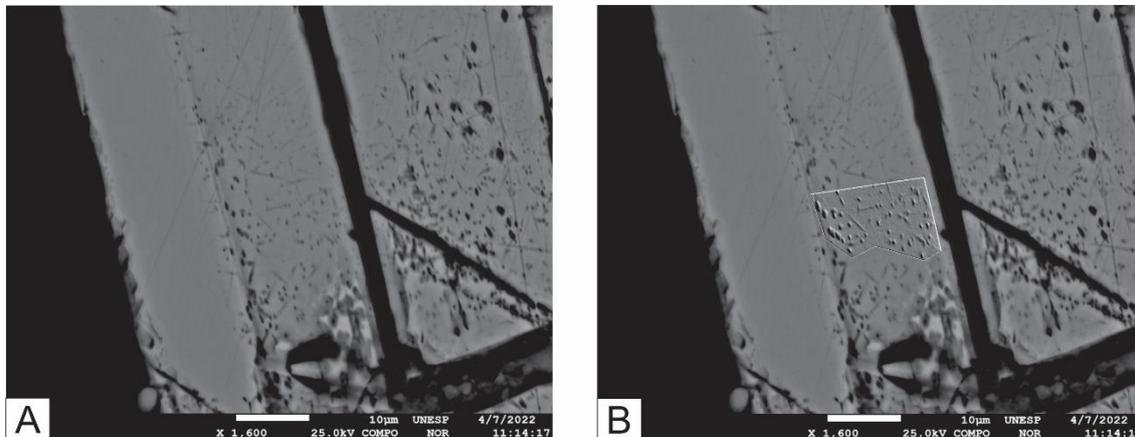
Após revelação dos traços, as amostras são submetidas a análise em microssonda eletrônica. Como produto obtêm-se dados quantitativos (seção 3.1.3), e uma imagem de microscopia eletrônica de varredura, utilizando-se o detector de elétrons retro-espalhados (BSE).

Com o auxílio do software ImageJ, mensura-se uma área na superfície mineral, contendo uma homogeneidade dos traços e inclusão do spot de análise da microssonda eletrônica, como mostrado na figura 7.



**Figura 7:** A) Imagem BSE do grão de zircão que apresenta seus traços revelados. B) Imagem do grão de zircão contendo o *spot* de análise da microssonda eletrônica.

Com essa área mensurada e quantidade de traços dentro dela, calcula-se a densidade de traços que é utilizada posteriormente no cálculo de idade. O *software* ImageJ, fornece também ferramentas que permitem a aplicação de filtros que facilitam a contagem dos traços (Figura 8).



**Figura 8:** A) Imagem BSE do grão de zircão que apresenta seus traços revelados. B) Imagem do grão de zircão contendo um filtro para realçar e facilitar a visualização dos traços de fissão.

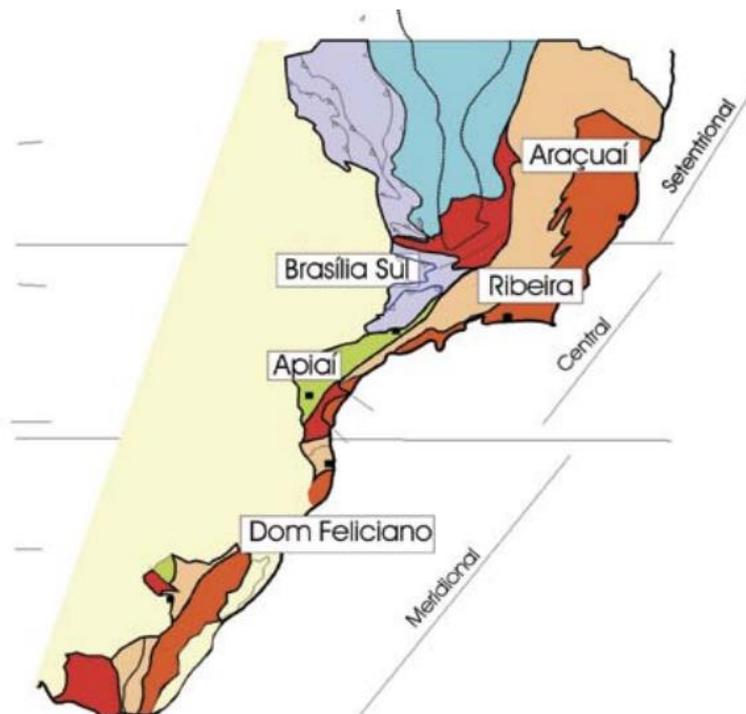
## 4. ASPECTOS GEOLÓGICOS

### 4.1 Província Mantiqueira Central

A Província Mantiqueira foi definida por Almeida *et al.* (1977,1981), como uma faixa de direção NE – SW, paralela à costa atlântica do sudeste e sul do Brasil, com mais de 3.000 km fazendo limite com as províncias Tocantins, São Francisco e Paraná além de ser bordejada pelas bacias costeiras do Espírito Santo, Campos, Santos e Pelotas.

Almeida & Hasui (1984), dividem o Sistema Mantiqueira em três setores: setentrional, central e meridional, sendo o segmento central a área de interesse deste trabalho.

A província Mantiqueira Central, segundo Heilbron *et al.* (2004) é composta pelos Orógenos Brasília Meridional e Ribeira, um conjunto de unidades geotectonicamente correlatas, denominadas terrenos Apiaí-Guaxupé e Embu e pela Zona de Interferência com o Orógeno Brasília registrando um diacronismo de diferentes etapas da Orogênese Brasileira, além de arcos-de-ilhas e suítes granitoides crustais (figura 9).



**Figura 9:** Subdivisão do Sistema Orogênico Mantiqueira: o segmento setentrional é o Orógeno Araçuaí; o segmento central compreende a porção sul do Orógeno Brasília e os orógenos Ribeira e Apiaí; e o segmento meridional inclui os orógenos Dom Feliciano e São Gabriel. Em roxo e laranja estão representados os terrenos que alojam os arcos magmáticos neoproterozóicos. Fonte: HEILBRON *et al.*, (2004).

Segundo Heilbron *et al.* (2004), o Orógeno Brasília, na região de estudo apresenta a mais antiga orogênese Brasiliana com idade de seu ápice entre 630-625 Ma., podendo ser dividida em dois conjuntos, as *nappes* inferiores e superiores. Enquanto o primeiro grupo registra metamorfismo em fácies granulito, o segundo apresenta metamorfismo de baixa pressão e inúmeras intrusões de corpos granitoides cálcio-alcalinos. A tabela 3, apresenta de modo sucinto a compartimentação tectônica do Orógeno Brasília.

**Tabela 3:** Compartimentação tectônica da Extremidade Sul do Orógeno Brasília. Fonte: Heilbron et al. (2004).

|    |   | Terrenos          | Domínios Estruturais  | Principal Período Colisional   |
|----|---|-------------------|---|--|
| E  | Orógeno Brasília                          | Autóctone         |   | Colisão I<br>ca. 630 Ma.   |
|    |   | Nappes Inferiores | Klippe/Nappe Carrancas<br><br>Nappe Luminárias<br><br>Nappe São tome das letras<br><br>Nappe Carmo da Cachoeira<br><br>Nappe Varginha |  |
| W  |   | Nappe Superior    | Nappe Guaxupé   |  |
| NW | Zona de Interferência com Orógeno Ribeira | Nappe Inferiores  | Nappe Andrelândia<br>Nappe Liberdade<br>(Inseridas no domínio andrelândia do Orógeno Ribeira)   | Colisão I<br>ca. 630 Ma.<br>(vestígios)<br>Colisão II<br>ca. 580 Ma. |
| SE |   | Nappe Superior    | Nappe Socorro   | Colisão I<br>ca. 630 Ma.<br>Colisão II<br>ca. 580 Ma.                |

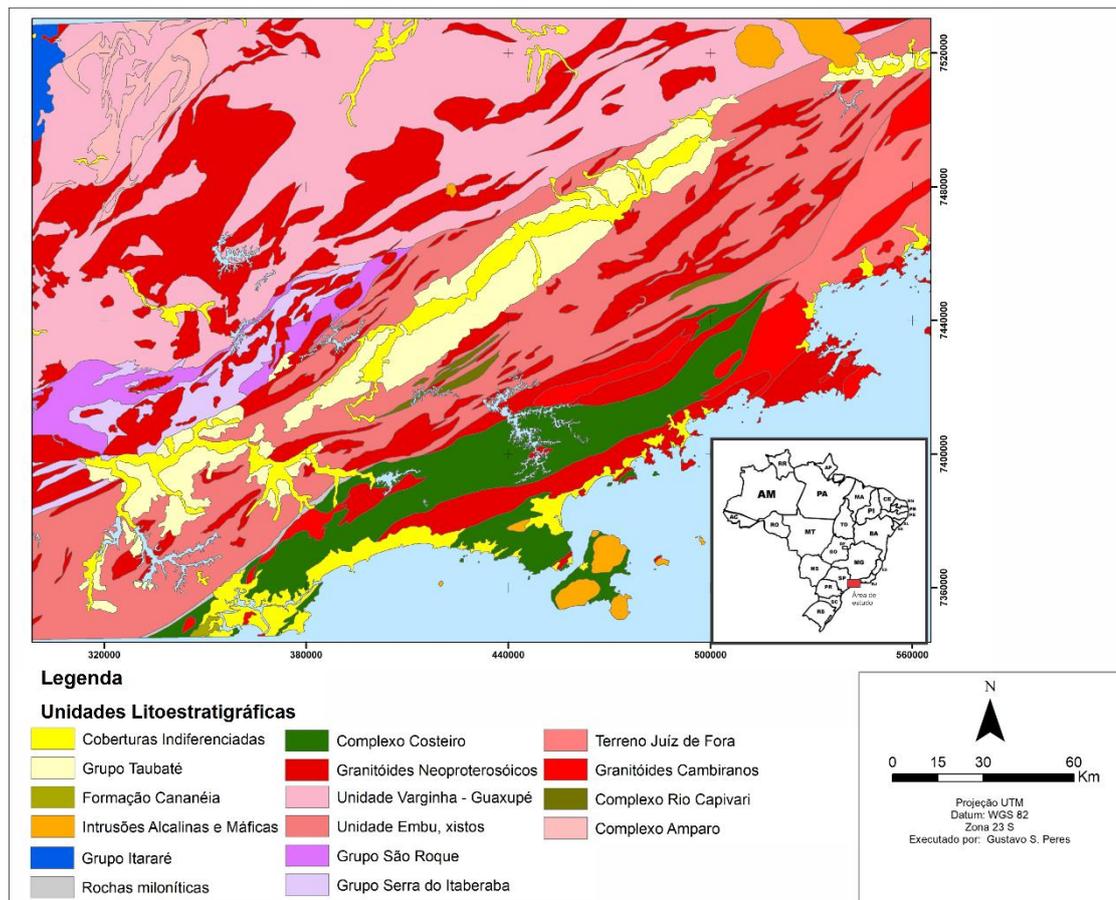
O Orógeno Ribeira apresenta a segunda etapa de colisão continental de idade 580 Ma., sendo subdividido em cinco terrenos tectono-estratigráficos: Ocidental, Paraíba do Sul, Embu, Oriental e Cabo Frio (Tabela 4).

**Tabela 4:** Compartimentação tectônica da parte central do Orógeno Ribeira. Fonte: Heilbron et al. (2004).

|      | Terrenos   | Domínios Estruturais   | Principal período colisional              |
|------|--|--|---|
| N-NW | Terreno Ocidental                                  | Domínio Autoctone<br>Domínio Andrelândia<br>Domínio Juíz de Fora | Colisão II<br>ca. 580 Ma.<br>(605 - 560)  |
|      | Klippe Paraíba do Sul                              |  |   |
|      | Terreno Ocidental<br>ou<br>Microplaca Serra do Mar | Domínio Cambuci<br>Domínio Costeiro<br>Domínio Italva            |   |
| S-SE | Terreno Cabo Frio                                  |  | Colisão III<br>ca. 520 Ma.<br>(535 - 510) |

#### 4.1.1 Caracterização Litoestratigráfica do Embasamento

De modo geral, as rochas do embasamento da Bacia de Taubaté variam do Mesoproterozoico (idades pré 1,7 Ga), a sequências metassedimentares neoproterozóicas/ordovicianas e intrusões graníticas pré- a tardi-colisionais. Todos os litotipos são descritos adiante e podem ser observados no mapa geológico apresentado na figura 10.



**Figura 10:** Mapa geológico da área estudada. Compilado de CPRM (2001).

#### 4.1.1.1 Complexo Capivari

O Complexo Capivari é considerado um *inlier* retrabalhado do embasamento paleoproterozóico no Domínio Embu, resultado do evento Transamazônico na região sendo composto por ortognaisses migmatíticos, granodioríticos ou graníticos e intercalações de anfibólitos e calciossilicáticas (MOTIDOME, 1993). Com base em datações U-Pb SHRIMP (BABINSKY *et al.* 2001) a idade do Complexo Capivari de aproximadamente 2,04 Ga (Paleoproterozóico)

#### 4.1.1.2 Grupo Serra do Itaberaba

O Grupo Serra do Itaberaba foi descrito por Juliane (1986, 1993), representado por rochas metavulcânicas, metapelíticas, metabásicas, calciossilicáticas e carbonáticas restritas. Datações realizadas por Juliani *et al.* (2000), pelo método U-Pb em zircões sugerem uma idade de cristalização de  $1,395 \pm 10$  para o Grupo Serra do Itaberaba.

#### 4.1.1.3 Grupo São Roque

O Grupo São Roque é um conjunto metassedimentar com predominância de filitos róseos, alaranjados e acastanhados (JULIANI *et al.*, 1986), sendo dividido em quatro formações: Poragibu, Pirapora do Bom Jesus, Estrada dos Romeiros e Boturuna

(JULIANI & BELJAVSKIS, 1983). Diversos autores atribuem idade deposicional para Paleo a Mesoproterozóico correlacionado ao Grupo Serra do Itaberaba (VAN SCHUMMUD et al., 1986; TASSINARI, 1988; SADOWSKY & TASSINARI, 1988; HACHSPACHER et al., 1993)

#### 4.1.1.4 Complexo Embu

O Complexo Embu faz parte do Domínio Embu junto do Complexo Rio Capivari, balizado pelos falhamentos de Taxaquara e Cubatão, sendo agrupadas em três unidades estratigráficas constituídas por rochas orto- e para-gnáissicas e xistosas: Unidade Rio Uma, Unidade Rio Paraibuna e Unidade Redenção da Serra (FERNANDES et al., 1990). Segundo Hackspacher *et al.* (2000), baseado em idades de zircões dendríticos, a idade de deposição do Complexo Embu é de cerca de 750 Ma.

#### 4.1.1.5 Complexo Varginha-Guaxupé

O Complexo Varginha-Guaxupé está inserido em um contexto de *nappes*, na borda do Cráton São Francisco e é dividido em três unidades da base para o topo: Unidade Granulítica Basal, gnaisses e rochas metamórficas da fácies granulito acompanhado de magmatismo básico máfico; Unidade Ortognaissica Migmatítica Intermediária, rochas ortoderivadas metamorfisadas de diferentes graus de migmatização; e Unidade Paragnaissica Migmatítica Superior, Intercalações de metassedimentos de alto grau e ortognaisses de composição básica (TROUW *et al.*, 2008). A idade do Complexo segundo datações pelo método U-Pb varia de 640 a 610 Ma. (CAMPOS-NETO, 2000; JANASI, 1999).

#### 4.1.1.6 Granitóides Neoproterozóicos

Os Granitóides Neoproterozóicos são representados pelas suítes intrusivas *sin* a pós-colisionais do Terreno Serra do Mar, Orógeno Paranapiacaba e Domínio Embu sendo compostos por variedades cálcio-alcálicas de alto K, variedades crustais subalcalinas (tipo - A) e variedades alcalinas e shoshoníticas e apresentam idades que variam de 640 Ma a 550 Ma (BITTENCOURT & NARDI, 1993)

#### 4.1.1.7 Complexo Costeiro

O Complexo Costeiro é constituído por três conjuntos litológicos (CHIODI *et al.*, 1983; SOBREIRO NETO *et al.*, 1983): Conjunto Gnáissico Migmatítico composto por ortognaisses variados e migmatitos; Conjunto Paraderivado composto por metassedimentos silto-argilosos, arcoseanos e calciossilicáticos; Conjunto Granulítico composto por charnockitos e norito associados a gnaisses ofalmiticos e aos corpos

graníticos presentes na área. Sua porção basal segundo Passareli (2001) apresenta idades de 612 Ma a 593-571 Ma.

#### 4.1.1.8 Rochas Miloníticas

As rochas miloníticas são representadas por granitoides e metassedimentos em diferentes graus de milonitização delimitando o Terreno Embu (PASSARELLI et al., 2004). Ainda segundo o autor, através do método U-Pb as idades de geração desses corpos variam em torno de 596-571 Ma.

## 4.2 Rift Continental do Sudeste do Brasil (RCSB)

O *Rift* Continental do Sudeste do Brasil (RCSB), é uma feição alongada segundo a direção ENE que consiste em um conjunto de depressões continentais de idade Paleogena-Neogena, com extensão de mais de 900 km, entre as cidades de Curitiba, no Paraná e Barra de São João no Rio de Janeiro, por vezes com preenchimento sedimentar, de origem aluvial, fluvial e ocasionalmente lacustre, de idades cenozóicas, também de origem continental (Hasui e Ponçano, 1978). Tais preenchimentos compreendem cinco principais bacias de idade Cenozóica: Curitiba, São Paulo, Taubaté, Resende e Volta Redonda (RICCOMINI, 1989).

Localizado sob o Cinturão de Dobramentos Ribeira (HASUI et al. 1975), o RCSB pode ser dividido em três segmentos, ocidental, central e oriental (RICCOMINI *et al.* 2004), sendo o de interesse, o segmento central onde localiza-se a Bacia de Taubaté.

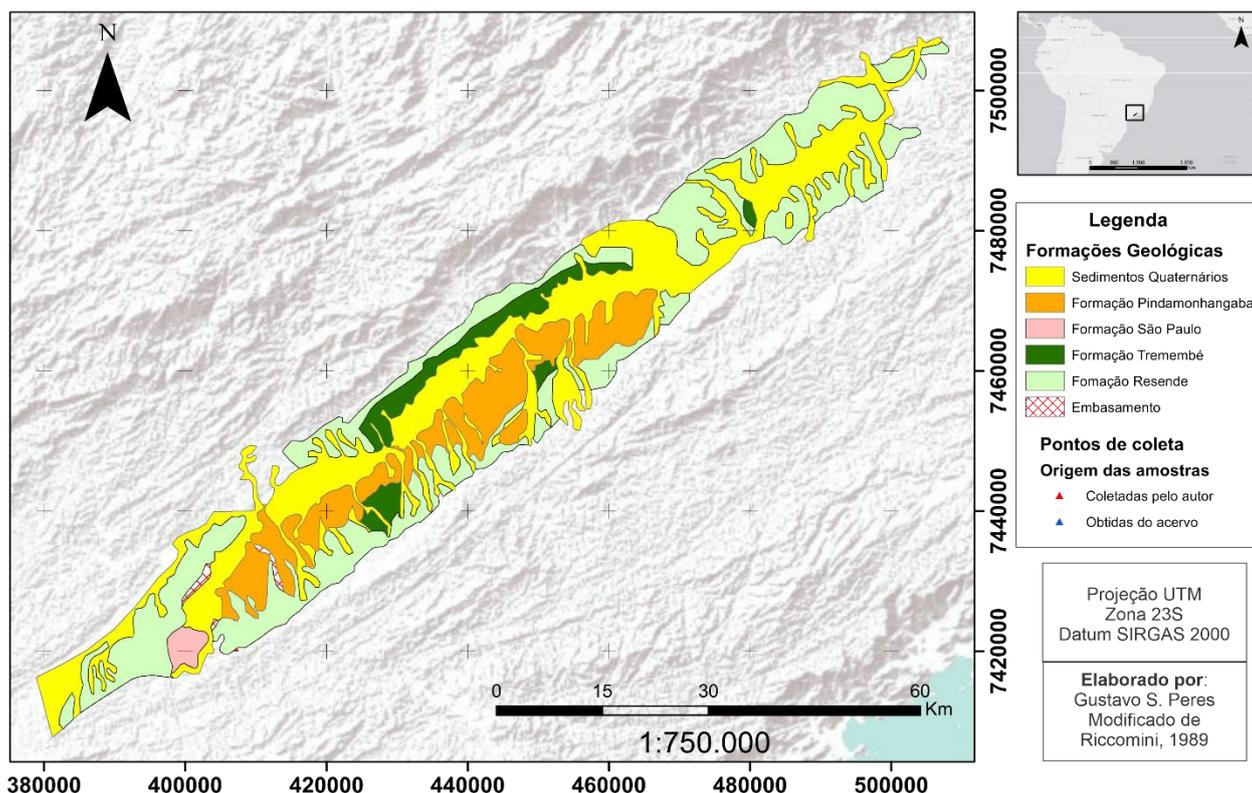
O primeiro termo utilizado para a feição, foi proposto por Almeida (1976), como Sistema de *Rifts* da Serra do Mar, devido principalmente às regiões montanhosas da Serra do Mar. Riccomini (1989), devido a abrangência da estrutura que está além dos limites da Serra do Mar sugeriu o nome de “*Rift* Continental do Sudeste do Brasil”, amplamente aceito. Zalán e Oliveira (2005), propõe ainda a denominação Sistema de *Rifts* Cenozóicos do Sudeste do Brasil” considerando a feição como uma sucessão de serras com vales intervenientes constituídos assim por quatro *rifts*., Paraíba do Sul, Litorâneo, Ribeira e o Marítimo. Devido a maior usabilidade do termo “*Rift* Continental do Sudeste do Brasil”, optou-se por sua utilização neste trabalho.

Um dos pacotes sedimentares de maior expressão em tamanho e espessura, presentes no RCSB, é a Bacia de Taubaté. Inserida em seu segmento central, com idade entre o Paleogeno ao Neogeno, a bacia de Taubaté possui arcabouço formado por hemigrabens separados por zonas de transferência em típica geometria de bacia do tipo rifte (CARVALHO A. *et al.* 2010), com um pacote sedimentar que atinge até 800 m de espessura (RICCOMINI *et al.*, 2004).

#### 4.2.1 Bacia de Taubaté

A Bacia de Taubaté, uma das maiores depressões do RCSB, atinge até 800 metros de espessura sedimentar (FERNANDES & CHANG, 2001), e está inserida no Vale do Paraíba que por sua vez se caracteriza por uma região deprimida entre rochas Pré-Cambrianas que fazem parte da Serra do Mar a sudeste, e a Serra da Mantiqueira, a nordeste. A figura 11 apresenta o mapa geológico da Bacia.

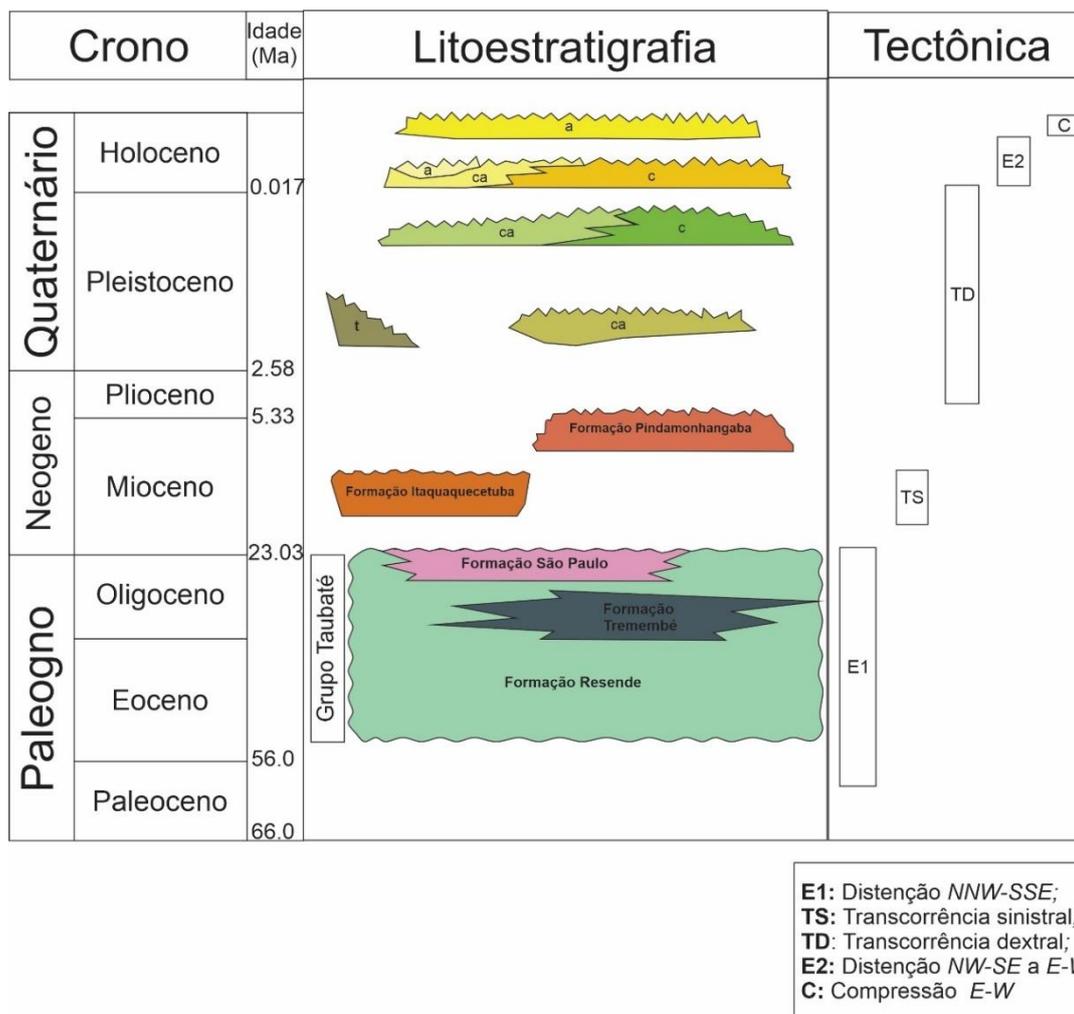
### Mapa Geológico da Bacia de Taubaté



**Figura 11:** Mapa geológico da Bacia de Taubaté

Riccomini (1989), denomina o principal pacote tectono-sedimentar da Bacia de Taubaté como Grupo Taubaté, englobando as formações: Resende (Leques aluviais-proximais e fluviais-distais), Tremembé (Lacustre) e a Formação São Paulo (fluvial meandrante). Além destas outros dois pacotes sedimentares de deposição posterior são significativos, sendo eles a Formação Pindamonhangaba (fluvial) e a Formação Itaquaquecetuba (fluvial entrelaçado). O enfoque deste trabalho será a formação Resende, de idade paleógena pertencente ao Grupo Taubaté.

A coluna estratigráfica ilustra os eventos tectônicos e os períodos deposicionais para a Bacia de Taubaté no período Cenozoico (RICCOMINI, 2004; RIBEIRO, 2010; RIBEIRO, 2015), sendo resultado de uma adaptação das idades propostas por Riccomini (2004) e adição de novos dados existentes na literatura (Figura 12).



**Figura 12:** Coluna litoestratigráfica contendo os eventos tectônicos para a Bacia de Taubaté. Letras: t - depósitos de tálus; c - depósitos colúviais; ca - depósitos colúvio-aluviais; a - depósitos aluviais. Modificado de Riccomini (1989).

#### 4.2.1.1 Formação Resende

A Formação Resende leva esse nome devido a semelhança litológica com a Bacia de Resende observada pela primeira vez por Amador (1975). Riccomini (1989), a define como resultado de um sistema de leques aluviais associados à planície fluvial de rios entrelaçados, sendo suas porções distais predominantemente composta por arenitos intercalados com lamintos e suas fácies proximais compostas por conglomerados polimíticos interdigitados com arenitos de granulometria grossa e lamitos.

Esta Formação apresenta grande extensão temporal ocorrendo quase durante todo o processo deposicional do Grupo Taubaté, do início do Eoceno ao final do Oligoceno (RICCOMINI, 1989).

#### 4.2.1.2 Formação Tremembé

A Formação Tremembé é composta por fácies pelíticas ricas em fósseis, compreendendo argilitos verdes maciços, ritimitos com alternância de folhelhos e margas, dolomitos tabulares arenitos com estratificação cruzada sigmoidal e granodecrescência de areia média até silte e arenitos grossos. (RICCOMINI, 1989; CAMPANHA, 1994).

Quanto a idade deposicional, sedimentos oriundos de um paleolago de significativa expressão, tectonicamente ativo durante a sedimentação, foram datados do Oligoceno com base em seu conteúdo polínico das argilas com matéria orgânica. (RICCOMINI *et al.* 1987a apud RICCOMINI *et al.* 2004; LIMA & MELO, 1989; RICCOMINI, 1989).

Entretanto trabalhos mais recentes demonstram uma maior precisão para a idade da formação. Análises fossilíferas de mamíferos e um novo táxon confirmaram uma idade que atinge o Oligoceno Superior ao Mioceno inferior (RIBEIRO, 2010; RIBEIRO, 2015).

#### 4.4.1.3 Formação São Paulo

A Formação São Paulo compreende um sistema fluvial meandrante, sendo restrita a porção sudeste da Bacia de Taubaté. Litologicamente é composta por fácies sedimentares areníticas de granulometria grossa, conglomeráticas, com estratificações cruzadas, siltitos e argilitos laminados.

Análises palinológicas realizadas em linhitos na região de Guararema, SP, revelam idade Oligocênica Superior para o depósito (LIMA *et al.* 1985 apud RICCOMINI, 2004; YAMAMOTO (1995)).

### 4.3 Evolução da região sudeste brasileira

#### 4.3.1 Ciclo Brasileiro

A área de estudo insere-se na Província Mantiqueira Central, região orogênica Brasileira. O ciclo Brasileiro é um amplo período orogênico Neoproterozóico-Cambriano responsável pela estruturação do embasamento da plataforma Sul-Americana.

A evolução da Província Mantiqueira Central, é representada pela junção de um conjunto de interações entre o Orógeno Ribeira e o extremo sul da Faixa Brasília, envolvendo formação de arcos magmáticos, processos acrescionários, colisionais e a

exumação e colapso dos orógenos, com duração entre 880 Ma. a 480 Ma. (HEIBRON *et al.* 2004)

Duas etapas podem ser destacadas:

- Colisão e formação do Orógeno Ribeira (590 Ma – 560 Ma.) (HEIBRON & MACHADO, 2003; MACHADO *et al.*, 1996)
- Amalgamento do Terreno Cabo Frio ao Orógeno Ribeira. (535 Ma. – 510 Ma.) (SCHIMITT *et al.*, 1999)
- Início de um regime extensional e formação de bacias antefossas e marginais (ZALÁN, 2004), associados a Magmatismo bimodal (510 Ma. - 480 Ma.)
- Fim do ciclo brasileiro com início de um período de quiescência tectônica e formações de grande sinécises como a Bacia do Paraná. (Paleozóico – Mesozoico) (ZALÁN, 2004)

#### 4.3.2 Eventos Triássicos/Jurássicos

A região Sul-Sudeste, durante o Triássico-Jurássico, sofreu um arqueamento evidenciado em atividades tectônicas ao longo do Arco de Ponta Grossa e por altos que dividiram os sedimentos da Bacia do Paraná, denominados como Formação Pirambóia ao norte e Grupo Rosário do Sul ao sul (ZALÁN *et al.*, 1990; MELO *et al.*, 1985). Tal soerguimento antecedeu os processos de ruptura continental e formação do Oceano Atlântico Sul, na região Sudeste. Para Almeida *et al.* (2000) os primeiros indícios da tafrogênese do Atlântico Sul ocorrem no período Triássico, culminando no Cretáceo Inferior (120-130 Ma), sendo então denominado por “reativação Wealdeana” (ALMEIDA, 1967) e posteriormente de “ativação Mesozóica” (ALMEIDA, 1972).

#### 4.3.3 Ruptura do Gondwana e Abertura do Atlântico

O final do Triássico é marcado por intensa reativação tectônica, que perduraram até o início do Cretáceo Superior, gerando processos de rifteamento que posteriormente iriam resultar na ruptura do continente Gondwana e abertura do Oceano Atlântico, (ALMEIDA, 1972). Essa reativação é representada por três eventos distintos temporalmente: **Rifteamento I**, atuante no Atlântico Central de idade Triássico-Cretácea (220 Ma. – 98 Ma.); **Rifteamento II** atuante na margem atlântica leste, área de estudo, de idade Cretácea Inferior (140Ma. – 110Ma.); **Rifteamento III** atuante na margem atlântica equatorial de idade Cretácea (113 Ma. – 98 Ma.) (ZALÁN, 2004).

Associado aos processos de *rifteamento* encontra-se o magmatismo basáltico toleítico continental no Cretáceo Inferior (Formação Serra Geral) (MOHRIAK, 2004).

#### 4.3.4 Soerguimento Cretáceo

Posterior ao rifteamento do Gondwana e a abertura do Oceano Atlântico estabelece-se um ambiente de margem passiva no sudeste brasileiro caracterizado pelas bacias sedimentares de Santos, Campos e Espírito Santo a *offshore*, e pelo grande escarpamento com limite abrupto entre a planície costeira e os planaltos interiores elevados (Serra do Mar e Mantiqueira) (ZALÁN, 2004).

A configuração geológica supracitada pode ser explicada por reativações tectônicas pós-rift das principais estruturas intracontinentais. Tais reativações apresentam embasamento em trabalhos como de Gallaguer *et al.* (1994) onde traços de fissão em apatita revelam fases de intensa exumação neste período com o soerguimento isostático da Serra da Mantiqueira.

Macedo (1989) em seu artigo referente a Bacia de Santos, evidencia uma formação de uma proto Serra do Mar no início do Cretáceo devido aos processos distensionais que deram origem a separação do Gondwana. Durante o Albiano, a subsidência termal presente na Bacia de Santos, produz um basculamento generalizado na região adjacente. Evidências estruturais e litológicas presentes na bacia de Santos, segundo o autor são indícios de novo soerguimento da Serra do Mar por volta de 100 Ma.

Diversos autores a partir de trabalhos termocronológicos de baixa temperatura, registram um rápido resfriamento no Cretáceo Superior (GALLAGUER *et al.*, 1994, TELLO SAENZ *et al.*, 2003; HACKSPACHER *et al.*, 2004; HIRUMA *et al.*, 2010; COGNÉ *et al.* 2011), correlatos a eventos de alto fluxo de aporte sedimentar na Bacia de Santos no intervalo Santoniano – Coniaciano (ALMEIDA & CARNEIRO, 1998; ZALÁN & OLIVEIRA, 2005; ASSINE *et al.*, 2008), possivelmente resultado dos processos denudacionais mais intensos nas montanhas costeiras (Serra da Mantiqueira e Serra do Mar).

Concomitantamente, uma sequência de corpos alcalinos, denominados Alinhamento Poços de Caldas – Cabo Frio (Almeida, 1991), com alinhamento WNW para ESE, apresentando decréscimo de idade e tamanho em direção ao oceano, sugere a passagem da placa Sul-Americana sobre uma anomalia Térmica à pluma de trindade (GIBSON *et al.*, 1995; THOMPSON *et al.*, 1998), provável causa do soerguimento supracitado.

Trabalhos como de Hackspacher *et al.* (2004), Guedes *et al.* (2000) e Ribeiro (2003), sugerem eventos de soerguimento da Serra da Mantiqueira em 120 Ma.,

soerguimento da serra do Mar em 80 Ma. Novo soerguimento da baixa Mantiqueira entre 60 Ma. a 20 Ma. concomitante a abertura do RCSB, e mais dois pulsos de soerguimento para a Serra do Mar, 30 Ma. e 20 Ma.

#### 4.3.5 *Rift* Continental do Sudeste Brasileiro (RCSB)

Durante o Cenozoico a margem continental do sudeste do Brasil adquire duplo escarpamento formado pelas serras do Mar e da Mantiqueira, intercalados por bacias Paleogenas. (RICCOMINI, 1989).

Neste contexto. Riccomini (1989), sugere uma sequência de eventos geológicos para explicar o surgimento e evolução do RCSB do Paleogeno ao Holoceno:

- 1) Paleogeno (Eoceno – Oligoceno): Surgimento dos hemi-grabens como resultado do campo de esforços extensionais de direção NNW-SSE, imposto pelo basculamento termodinâmico na Bacia de Santos. Preenchimento Vulcano-sedimentar sintectônico do Grupo Taubaté, resultado de um sistema de leques aluviais associados a planície aluvial de rios entrelaçados (Formação Resende), sistema *Playa-Lake* (Formação Tremembé) em um ambiente semiárido e sistema fluvial meandrante (Formação São Paulo) em condições úmidas.
- 2) Neogeno: Transcorrência sinistral de direção E-W, com extensão NW-SE e compressão local NE-SW. Bacias *pull-apart* (sistema fluvial meandrante da Formação Itaquaquetuba) relacionadas à transtração. Separação das drenagens dos rios Tietê e Paraíba do Sul pelo Alto de Arujá e erosão na Porção central da Bacia de Taubaté.
- 3) Plioceno a Pleistoceno Inferior: Prováveis condições quentes e úmidas e implantação de um novo sistema meandrante na Bacia de Taubaté (Formação Pindamonhangaba).
- 4) Pleistoceno Superior: Início marcado por estabilidade tectônica e remodelamento do relevo, posteriormente, nova fase transcorrente E-W, destal, com compressão NW-SE com geração de novas soleiras.
- 5) Holoceno: Extensão NW(WNW) – SE(ESSE), afetando depósitos de baixos terraços ligados a evolução de redes de drenagens do Rio Paraíba do Sul.

## 5. RESULTADOS

A seguir encontram-se compilados os dados obtidos neste trabalho.

### 5.1 Bacia de Taubaté

#### 5.1.1 Formação Tremembé

##### 5.1.1.1 Amostra TA02

A amostra em questão está inserida no contexto da Formação Tremembé, onde obteve-se apenas dados referentes a um grão da amostra (tabela 5), com idade Jurássica Inferior.

**Tabela 5:** Idades para os grãos da amostra TA02

| Amostra: TA02 |             |            |                   |
|---------------|-------------|------------|-------------------|
| Grão          | Idade (Ma.) | Erro (Ma.) | Erro relativo (%) |
| 1             | 176         | 79         | 44.9              |

Com a datação de apenas um grão, aplicou-se o conceito de *lag-time* apenas para este, resultando em um valor mínimo e máximo apresentado na tabela 6.

**Tabela 6:** Valor mínimo e máximo de *Lag-time* para a amostra TA02

| <i>Lag-time</i> (TA02) |           |           |
|------------------------|-----------|-----------|
| Picos                  | Min (Ma.) | Max (Ma.) |
| P1                     | 143       | 149       |

Com base no valor da tabela 7, obteve-se a taxa de *lag-time* (Tabela 8)

**Tabela 7:** Valor da taxa de *Lag-time* para diferentes profundidades e temperaturas para a amostra TA02

| Taxa de <i>Lag-time</i> (m/Ma) - TA02 |               |               |               |
|---------------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| Pico                                  | 25°C (8,6 km) | 30°C (7.1 km) | 35°C (6.1 km) |
| P1                                    | 70 - 78       | 58 - 64       | 50 - 55       |

#### 5.1.2 Formação Resende

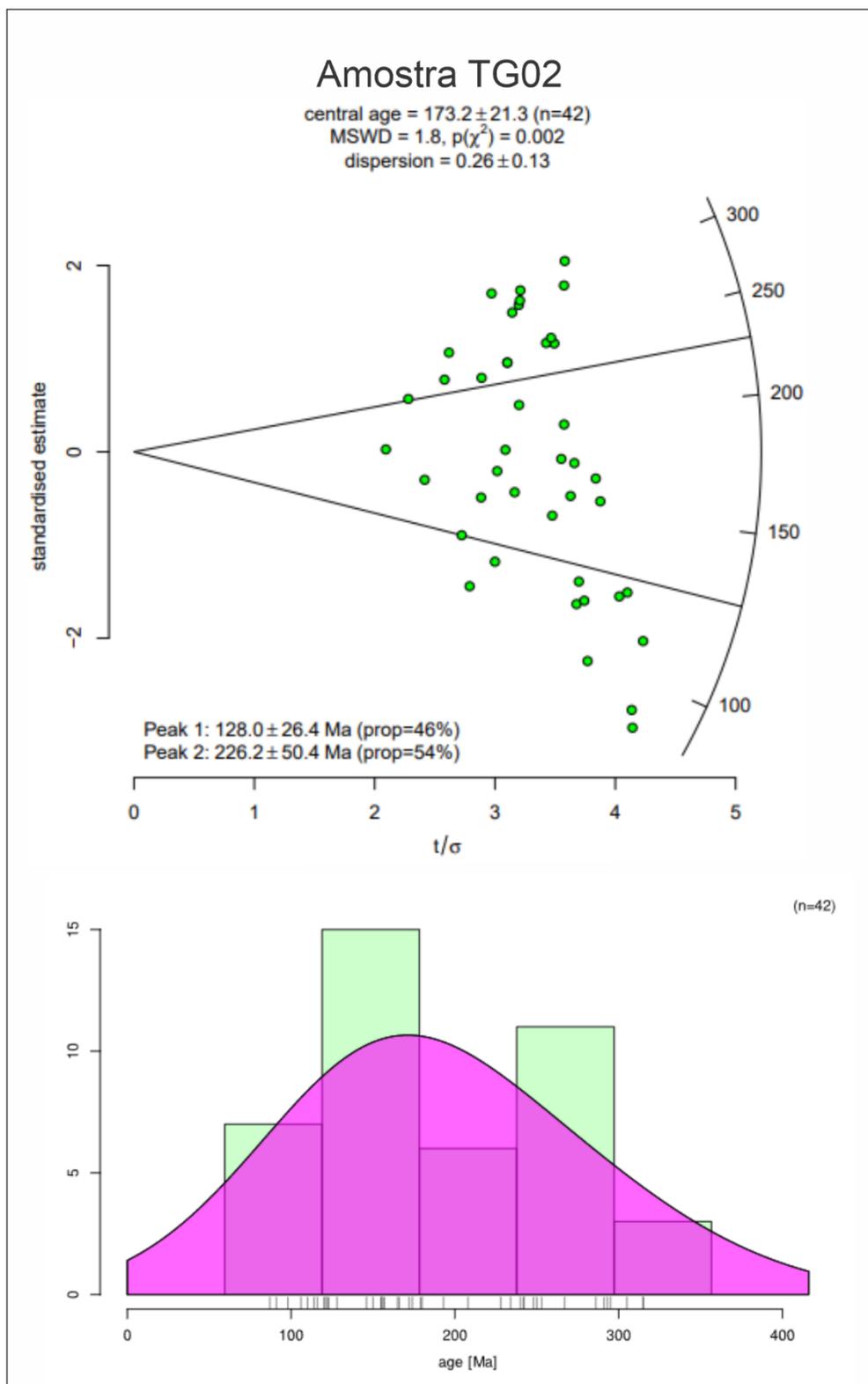
##### 5.1.2.1 Amostra TG02

A mostra em questão é representativa da fácies conglomerática da Formação Resende localizada a SW da bacia. Obteve-se como resultado a datação de 42 grãos de zircões (tabela 8), com idades que variam do Carbonífero ao Cenozoico.

**Tabela 8:** Idades para os grãos da amostra TG02.

| Amostra: TG02 |            |           |                   |
|---------------|------------|-----------|-------------------|
| Grão          | Idade (Ma) | Erro (Ma) | Erro relativo (%) |
| 1             | 87         | 21        | 24.1              |
| 2             | 91         | 22        | 24.2              |
| 3             | 98         | 26        | 26.5              |
| 4             | 106        | 38        | 35.8              |
| 5             | 110        | 26        | 23.6              |
| 6             | 114        | 31        | 27.2              |
| 7             | 116        | 31        | 26.7              |
| 8             | 120        | 40        | 33.3              |
| 9             | 121        | 30        | 24.8              |
| 10            | 122        | 33        | 27                |
| 11            | 123        | 30        | 24.4              |
| 12            | 128        | 47        | 36.7              |
| 13            | 146        | 42        | 28.7              |
| 14            | 150        | 52        | 34.7              |
| 15            | 155        | 40        | 25.8              |
| 16            | 155        | 49        | 31.6              |
| 17            | 156        | 43        | 27.6              |
| 18            | 157        | 65        | 41.4              |
| 19            | 165        | 43        | 26.1              |
| 20            | 166        | 55        | 33.1              |
| 21            | 172        | 47        | 27.3              |
| 22            | 174        | 49        | 28.2              |
| 23            | 179        | 58        | 32.4              |
| 24            | 180        | 86        | 47.7              |
| 25            | 193        | 54        | 28                |
| 26            | 208        | 65        | 31.2              |
| 27            | 228        | 100       | 43.8              |
| 28            | 234        | 81        | 34.6              |
| 29            | 240        | 93        | 38.7              |
| 30            | 242        | 78        | 32.2              |
| 31            | 242        | 78        | 32.2              |
| 32            | 248        | 71        | 28.6              |
| 33            | 250        | 73        | 29.2              |
| 34            | 253        | 73        | 28.8              |
| 35            | 267        | 102       | 38.2              |
| 36            | 286        | 91        | 31.8              |
| 37            | 291        | 91        | 31.2              |
| 38            | 293        | 82        | 28                |
| 39            | 295        | 92        | 31.2              |
| 40            | 305        | 95        | 31.4              |
| 41            | 315        | 106       | 33.6              |
| 42            | 315        | 88        | 27.9              |

As idades distribuídas no histograma e plotadas no gráfico radial bem como seus picos (**P1** =  $128 \pm 26.4$ ; **P2**:  $226.2 \pm 50.4$ ) estão dispostos na figura 13.



**Figura 13:** Gráfico radial contendo os picos de idades e a distribuição cumulativa para a amostra TG03.

Com base nos valores de P1 e P2 obteve-se o valor de *lag-time* mínimo e máximo para a amostra (tabela 9).

**Tabela 9:** Valor mínimo e máximo de *Lag-time* segundo os picos obtidos para a amostra TG02

| <i>Lag-time</i> (TG02) |           |           |
|------------------------|-----------|-----------|
| Picos                  | Min (Ma.) | Max (Ma.) |
| P1                     | 72        | 105       |
| P2                     | 170.2     | 203.2     |

Com base no valor de *lag-time* obteve-se a taxa de *lag-time* (Tabela 10).

**Tabela 10:** Valor da taxa de *Lag-time* para diferentes profundidades e temperaturas segundo os picos obtidos para a amostra TG02.

| Taxa de <i>Lag-time</i> (m/Ma) - TG02 |               |               |               |
|---------------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| Pico                                  | 25°C (8,6 km) | 30°C (7.1 km) | 35°C (6.1 km) |
| P1                                    | 105 - 391     | 87 - 323      | 74 - 277      |
| P2                                    | 48 - 76       | 39 - 59       | 34 - 51       |

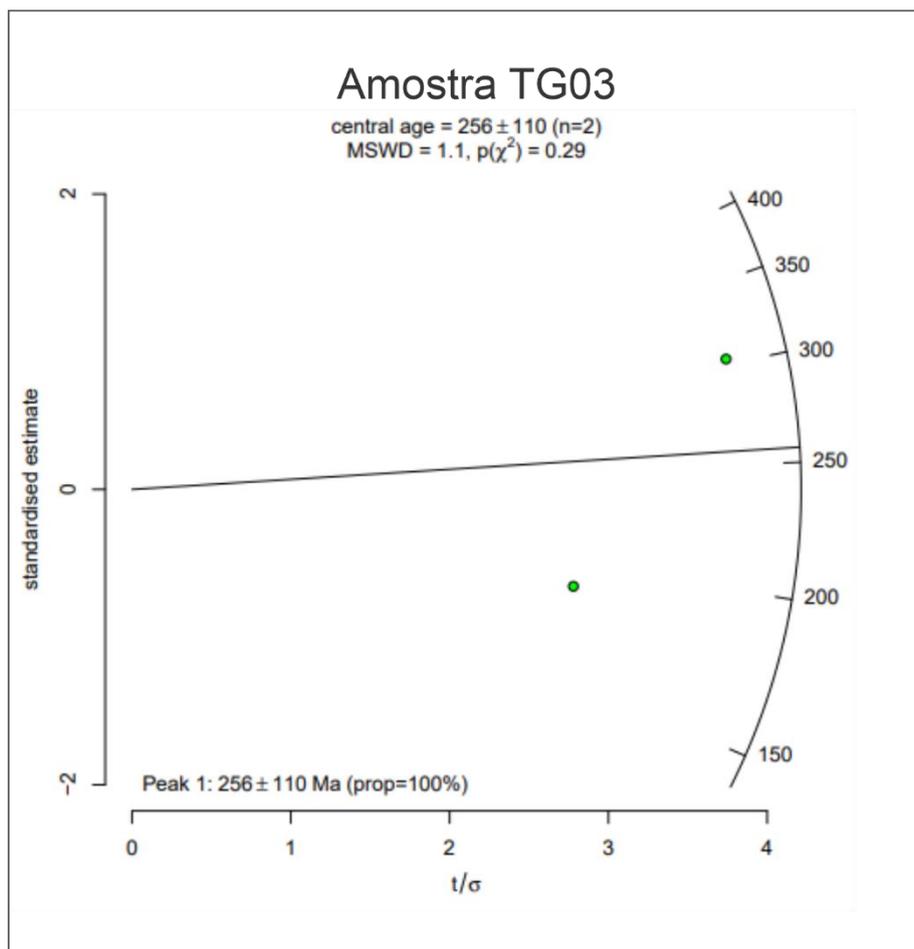
#### 5.1.2.2 Amostra TG03

Assim como a amostra TG02, a amostra TG03 também representa as fácies conglomeráticas da Formação Resende. Obteve-se, entretanto, datação de apenas dois grãos (tabela 11) com idades variando do Carbonífero ao Jurássico inferior.

**Tabela 11:** Dados de idade obtidos para a amostra TG03

| Amostra: TG03 |            |           |                   |
|---------------|------------|-----------|-------------------|
| Grão          | Idade (Ma) | Erro (Ma) | Erro relativo (%) |
| 1             | 189        | 68        | 35                |
| 2             | 303        | 81        | 27                |

As idades e plotadas no gráfico radial bem como seu pico (**P1** = 256 ± 110) estão dispostos na figura 14.



**Figura 14:** Gráfico radial contendo o pico de idade amostra TG03.

Com base no valor de P1 obteve-se o valor de *lag-time* mínimo e máximo para a amostra (tabela 12).

**Tabela 12:** Valor mínimo e máximo de *Lag-time* segundo o pico obtidos para a amostra TG03

| <i>Lag-time</i> (TG03) |           |           |
|------------------------|-----------|-----------|
| Picos                  | Min (Ma.) | Max (Ma.) |
| P1                     | 200       | 233       |

Com base no valor de *lag-time* obteve-se a taxa de *lag-time* (Tabela 13)

**Tabela 13:** Valor da taxa de *Lag-time* para diferentes profundidades e temperaturas segundo os picos obtidos para a amostra TG03.

| Taxa de <i>Lag-time</i> (m/Ma) - TG03 |               |               |               |
|---------------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| Pico                                  | 25°C (8,6 km) | 30°C (7.1 km) | 35°C (6.1 km) |
| P1                                    | 41 - 57       | 34 - 47       | 29 - 41       |

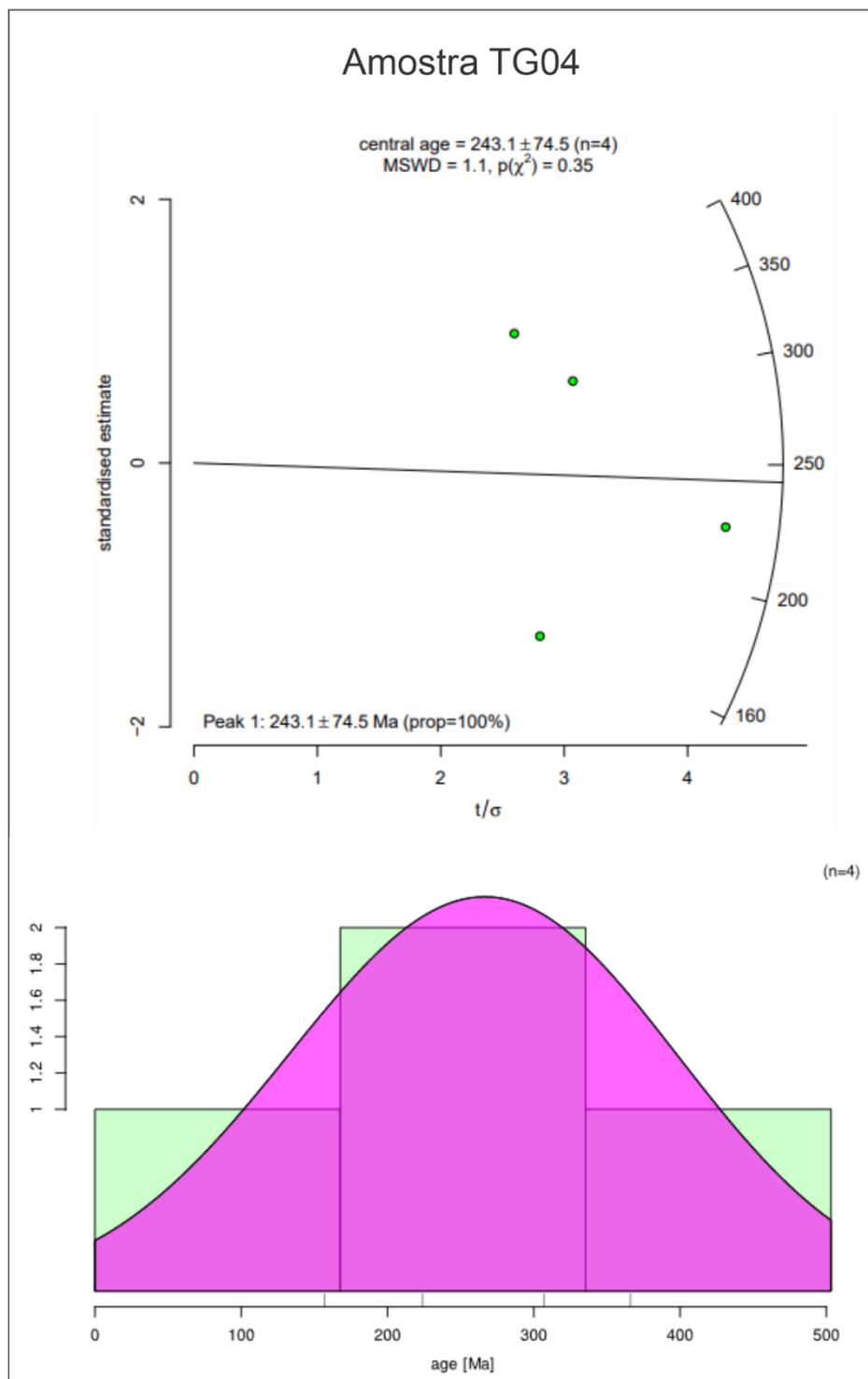
### 5.1.2.3 Amostra TG04

A amostra em questão representa as fácies areníticas da Formação Resende, sendo um arenito de granulometria grossa majoritariamente composto por grãos de quartzo. Foram datados 4 grãos (tabela 14), com idades Devonianas a Jurássicas.

**Tabela 14:** Idades para os grãos da amostra TG04.

| Amostra: TG04 |            |           |               |
|---------------|------------|-----------|---------------|
| Grão          | Idade (Ma) | Erro (Ma) | Erro relativo |
| 1             | 157        | 56        | 36            |
| 2             | 224        | 52        | 23            |
| 3             | 307        | 100       | 27            |
| 4             | 366        | 141       | 35            |

As idades distribuídas no histograma e plotadas no gráfico radial bem como seu pico ( $P1 = 243.1 \pm 74.5$ ) estão dispostos na figura 15.



**Figura 15:** Gráfico radial contendo os picos de idades e a distribuição cumulativa para a amostra TG04.

Com base no valor de P1, obteve-se o valor de *lag-time* mínimo e máximo para a amostra (tabela 15).

**Tabela 15:** Valor mínimo e máximo de *Lag-time* segundo o pico obtido para a amostra TG04.

| <i>Lag-time</i> (TG04) |           |           |
|------------------------|-----------|-----------|
| Picos                  | Min (Ma.) | Max (Ma.) |
| P1                     | 187.1     | 220.1     |

Com base no valor de *lag-time* obteve-se a taxa de *lag-time* (Tabela 16)

**Tabela 16:** Valor da taxa de *Lag-time* para diferentes profundidades e temperaturas segundo os picos obtidos para a amostra TG04.

| Taxa de <i>Lag-time</i> (m/Ma) - TG04 |               |               |               |
|---------------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| Pico                                  | 25°C (8,6 km) | 30°C (7.1 km) | 35°C (6.1 km) |
| P1                                    | 44 - 63       | 36 - 52       | 31 - 44       |

#### 5.1.2.4 Amostra TA01

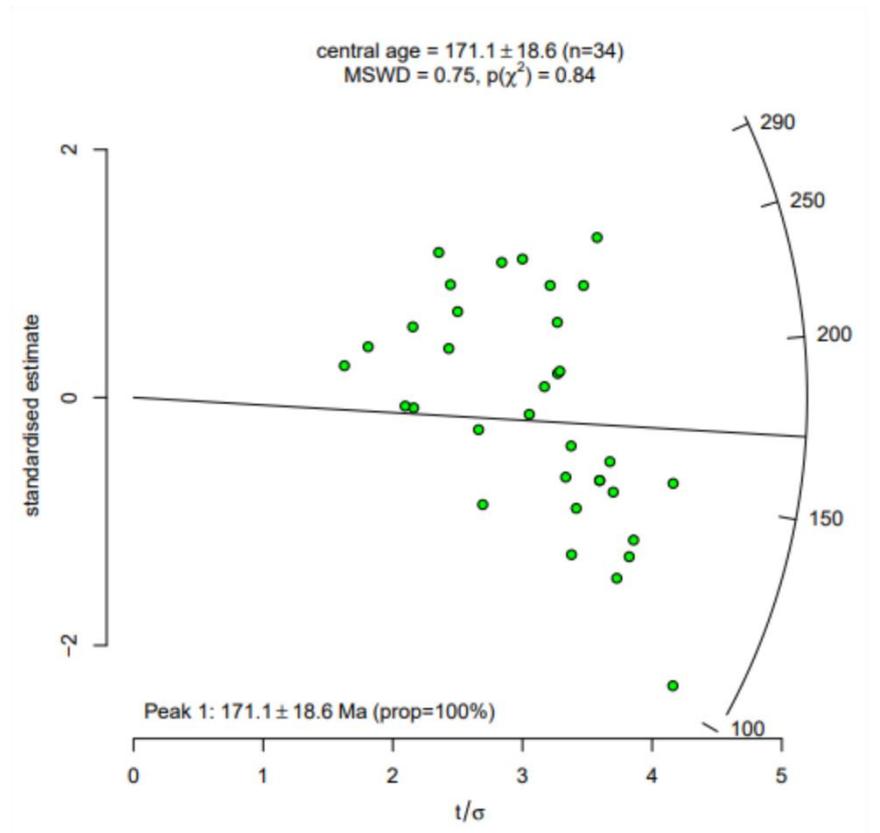
A amostra contém zircões das fácies arenosas da Formação Resende. Ao total foram datados 34 grãos (tabela 17) com idades variando do Cambriano ao Cretácio Inferior.

**Tabela 17:** Idades para os grãos da amostra TA01

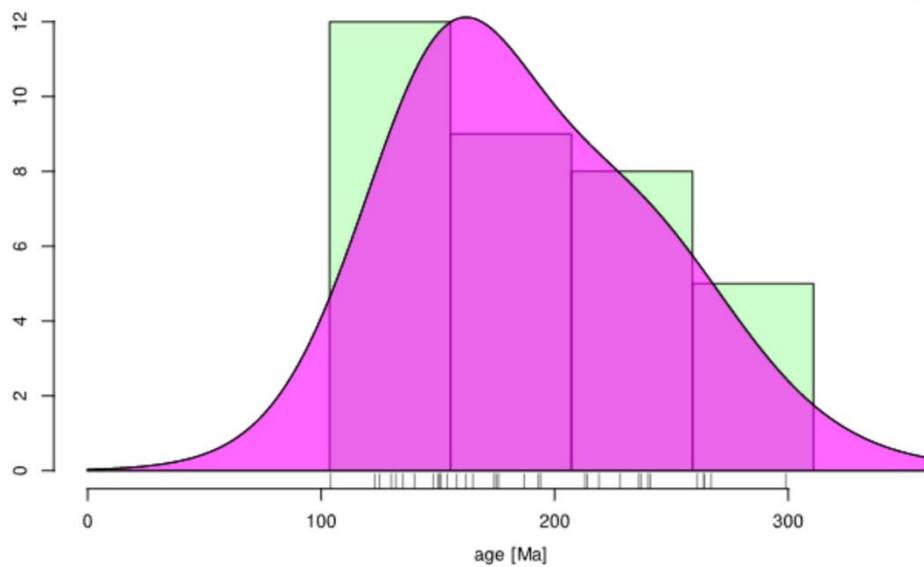
| Amostra: TA01 |            |           |               |
|---------------|------------|-----------|---------------|
| Grão          | Idade (Ma) | Erro (Ma) | Erro relativo |
| 1             | 104        | 25        | 24.1          |
| 2             | 123        | 33        | 26.8          |
| 3             | 125        | 37        | 29.6          |
| 4             | 130        | 34        | 26.2          |
| 5             | 132        | 49        | 37.1          |
| 6             | 135        | 35        | 25.9          |
| 7             | 140        | 41        | 29.3          |
| 8             | 148        | 40        | 27            |
| 9             | 150        | 45        | 30            |
| 10            | 151        | 42        | 27.8          |
| 11            | 151        | 42        | 27.8          |
| 12            | 154        | 37        | 24            |
| 13            | 158        | 43        | 27.2          |
| 14            | 162        | 48        | 29.6          |
| 15            | 165        | 62        | 37.5          |
| 16            | 174        | 57        | 32.7          |
| 17            | 175        | 81        | 46.3          |
| 18            | 176        | 84        | 47.7          |
| 19            | 187        | 59        | 31.5          |
| 20            | 193        | 59        | 30.6          |
| 21            | 194        | 59        | 30.4          |
| 22            | 213        | 131       | 61.5          |
| 23            | 214        | 88        | 41.1          |
| 24            | 219        | 67        | 30.6          |
| 25            | 228        | 126       | 55.3          |
| 26            | 236        | 68        | 28.8          |
| 27            | 237        | 110       | 46.4          |
| 28            | 240        | 96        | 40            |
| 29            | 241        | 75        | 31.2          |
| 30            | 261        | 73        | 27.9          |
| 31            | 264        | 88        | 33.3          |
| 32            | 264        | 108       | 40.9          |
| 33            | 267        | 94        | 35.2          |
| 34            | 299        | 127       | 42.7          |

As idades distribuídas no histograma e plotadas no gráfico radial bem como seu pico ( $P1 = 171.1 \pm 18.6$ ) estão dispostos na figura 16.

## Amostra TA01



(n=34)



**Figura 16:** Gráfico radial contendo os picos de idades e a distribuição cumulativa para a amostra TA01.

Com base no valor de P1 obteve-se o valor de *lag-time* mínimo e máximo para a amostra (tabela 18).

**Tabela 18:** Valor mínimo e máximo de *Lag-time* segundo os picos obtidos para a amostra TA01

| <i>Lag-time</i> (TA01) |           |           |
|------------------------|-----------|-----------|
| Pico                   | Min (Ma.) | Max (Ma.) |
| P1                     | 115.1     | 148.1     |

Com base no valor de *lag-time* obteve-se a taxa de *lag-time* (Tabela 19)

**Tabela 19:** Valor da taxa de *Lag-time* para diferentes profundidades e temperaturas segundo os picos obtidos para a amostra TA01.

| Taxa de <i>Lag-time</i> (m/Ma) - TA01 |               |               |               |
|---------------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| Pico                                  | 25°C (8,6 km) | 30°C (7.1 km) | 35°C (6.1 km) |
| P1                                    | 69 - 132      | 57 - 109      | 49 - 94       |

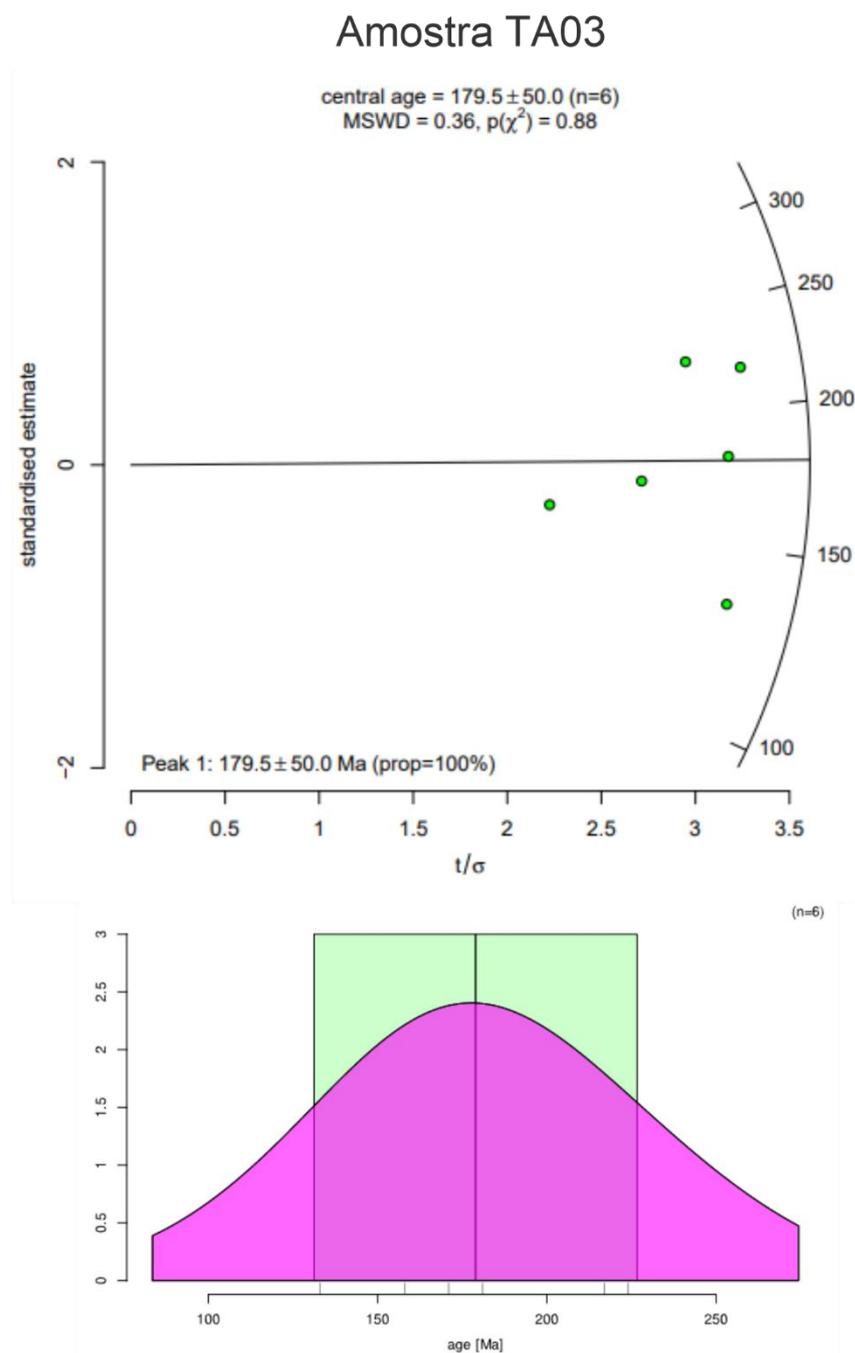
#### 5.1.2.5 Amostra TA03

A amostra em questão se encontra próxima a amostra TG02 representando a fácies conglomeráticas da Formação Resende. Foram datados um total de 6 grãos (tabela 20) com idades variando do Triássico ao Cretácio.

**Tabela 20:** Idades para os grãos da amostra TA03.

| Amostra: TA03 |            |           |                   |
|---------------|------------|-----------|-------------------|
| Grão          | Idade (Ma) | Erro (Ma) | Erro relativo (%) |
| 1             | 133        | 42        | 31.6              |
| 2             | 158        | 71        | 44.9              |
| 3             | 171        | 63        | 36.8              |
| 4             | 181        | 57        | 31.5              |
| 5             | 217        | 67        | 30.9              |
| 6             | 224        | 76        | 33.9              |

As idades distribuídas no histograma e plotadas no gráfico radial bem como seu pico (**P1** =  $179.5 \pm 50$ ) estão dispostos na figura 17.



**Figura 17:** Gráfico radial contendo os picos de idades e a distribuição cumulativa para a amostra TA03.

Com base no valor de P1 obteve-se o valor de *lag-time* mínimo e máximo para a amostra (tabela 21).

**Tabela 21:** Valor mínimo e máximo de *Lag-time* segundo os picos obtidos para a amostra TA03.

| <i>Lag-time</i> (TA03) |           |           |
|------------------------|-----------|-----------|
| Picos                  | Min (Ma.) | Max (Ma.) |
| P1                     | 126.5     | 156.5     |

Com base no valor de *lag-time* obteve-se a taxa de *lag-time* (Tabela 22)

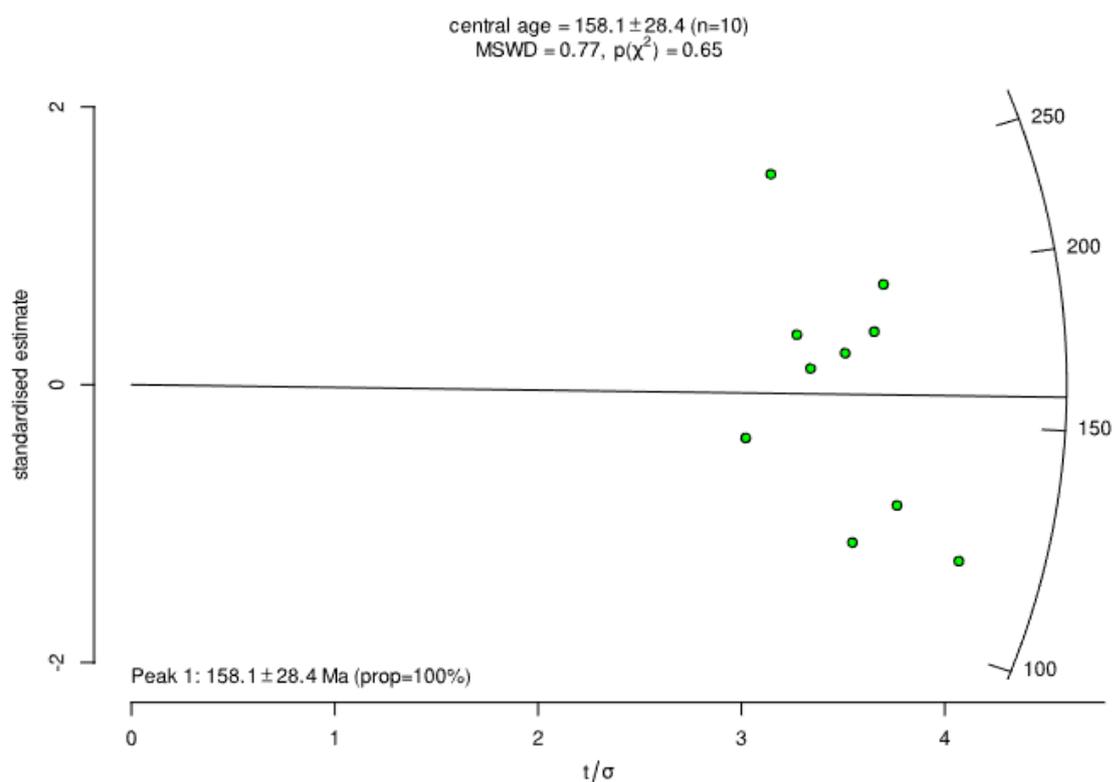
**Tabela 22:** Valor da taxa de *Lag-time* para diferentes profundidades e temperaturas segundo o pico obtido para a amostra TA03.

| Taxa de <i>Lag-time</i> (m/Ma) - TA03 |               |               |               |
|---------------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| Pico                                  | 25°C (8,6 km) | 30°C (7.1 km) | 35°C (6.1 km) |
| P1                                    | 64 - 117      | 53 - 96       | 46 - 83       |

## 5.2 Embasamento

### 5.2.1 Amostra TA04

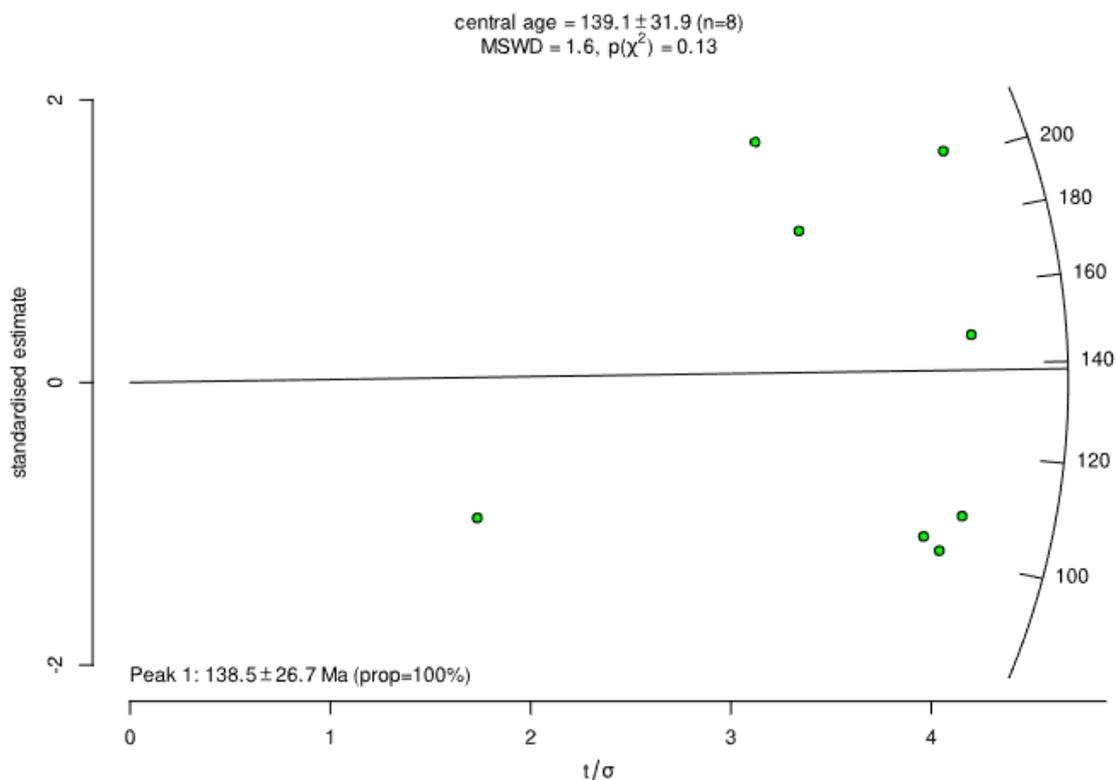
A amostra em questão representa grãos de zircão oriundos do acervo do grupo de termocronologia do Departamento de Geologia/ Unesp Rio Claro. Foram datados 10 grãos obtendo-se uma idade central para o traço de fissão de  $158,1 \pm 28,4$  Ma correspondendo ao Jurássico Superior (Figura 18).



**Figura 18:** Gráfico radial apresentando dados estatísticos para a amostra TA04.

### 5.2.2 Amostra TA05

A amostra em questão, assim como a anterior, representa grãos de zircão oriundas do acervo do grupo de termocronologia do Departamento de Geologia/ Unesp Rio Claro. Foram datados 8 grãos obtendo-se uma idade central para o traço de fissão de  $139,1 \pm 31,9$  Ma. correspondendo ao Cretáceo Inferior (Figura 19).



**Figura 19:** Gráfico radial apresentando dados estatísticos para a amostra TA05.

### 5.2.3 Amostra TG01

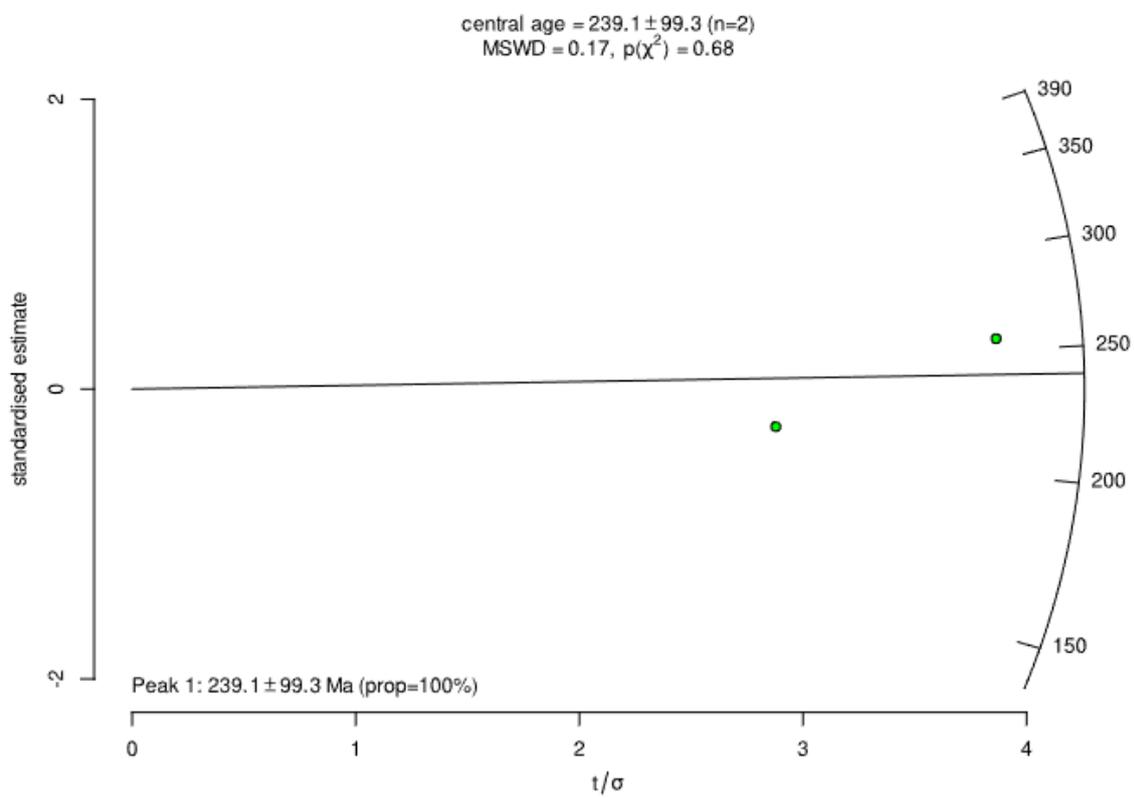
A amostra em questão representa grãos de zircão oriundos de um ortognaisse do embasamento próximo as amostras TA03 e TG02. Foi datado 1 grão (tabela 23) não sendo gerados dados estatísticos devido a pouca quantidade de grãos.

**Tabela 23:** Idade para os grãos da amostra TG01

| Amostra: TG01 |            |           |                   |
|---------------|------------|-----------|-------------------|
| Grão          | Idade (Ma) | Erro (Ma) | Erro relativo (%) |
| 1             | 132        | 40        | 30.3              |

### 5.2.4 Amostra TG05

A amostra em questão representa grãos de zircão oriundos de um ortognaisse do embasamento próximo a amostra TG05. Foram datados 2 grãos obtendo-se uma idade central para o traço de fissão de  $239.1 \pm 99.3$  Ma. correspondendo ao Triássico Médio (Figura 20).



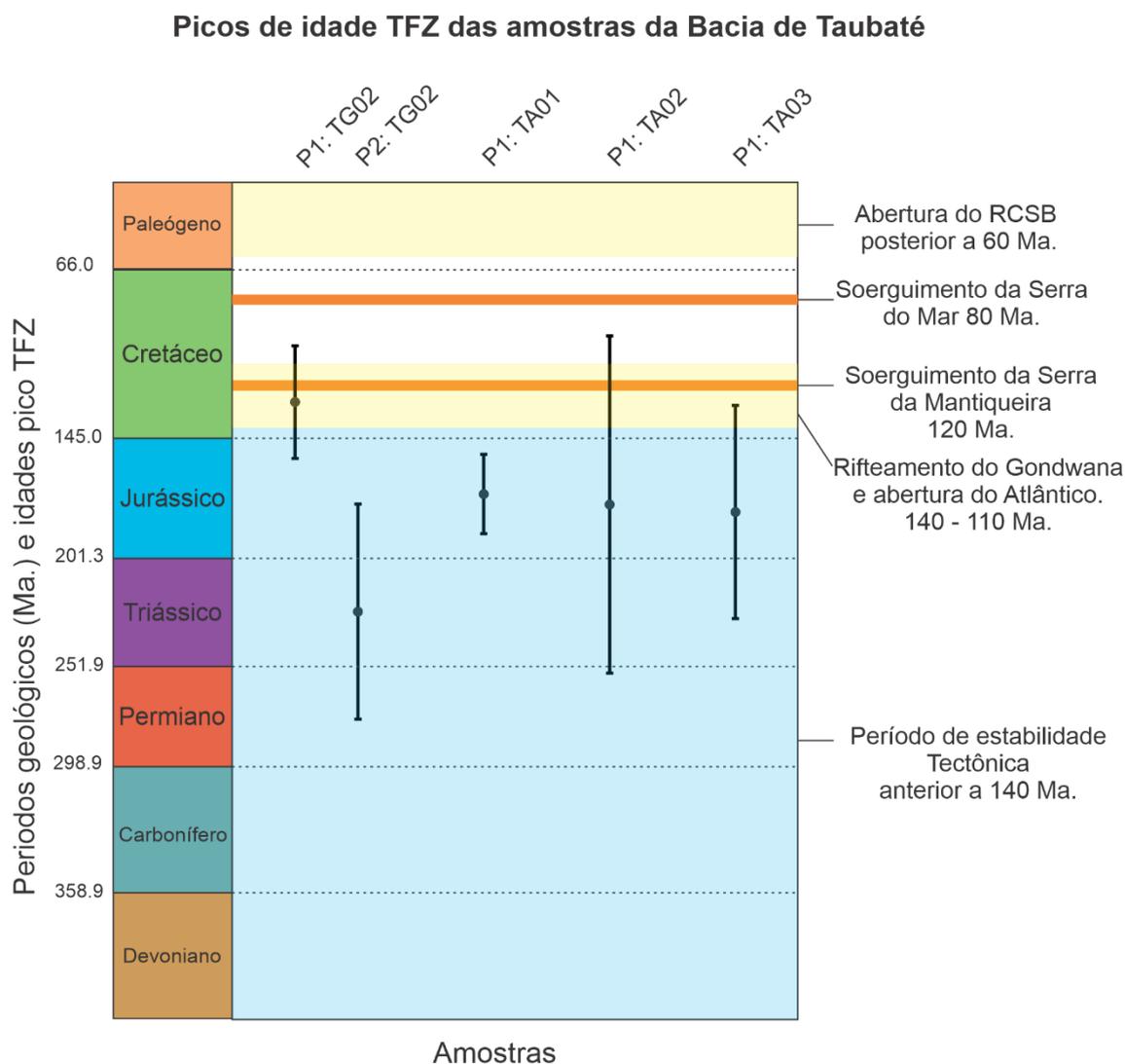
**Figura 20:** Gráfico radial apresentando dados estatísticos para a amostra TG05.

## 6. DISCUSSÕES E INTERPRETAÇÕES

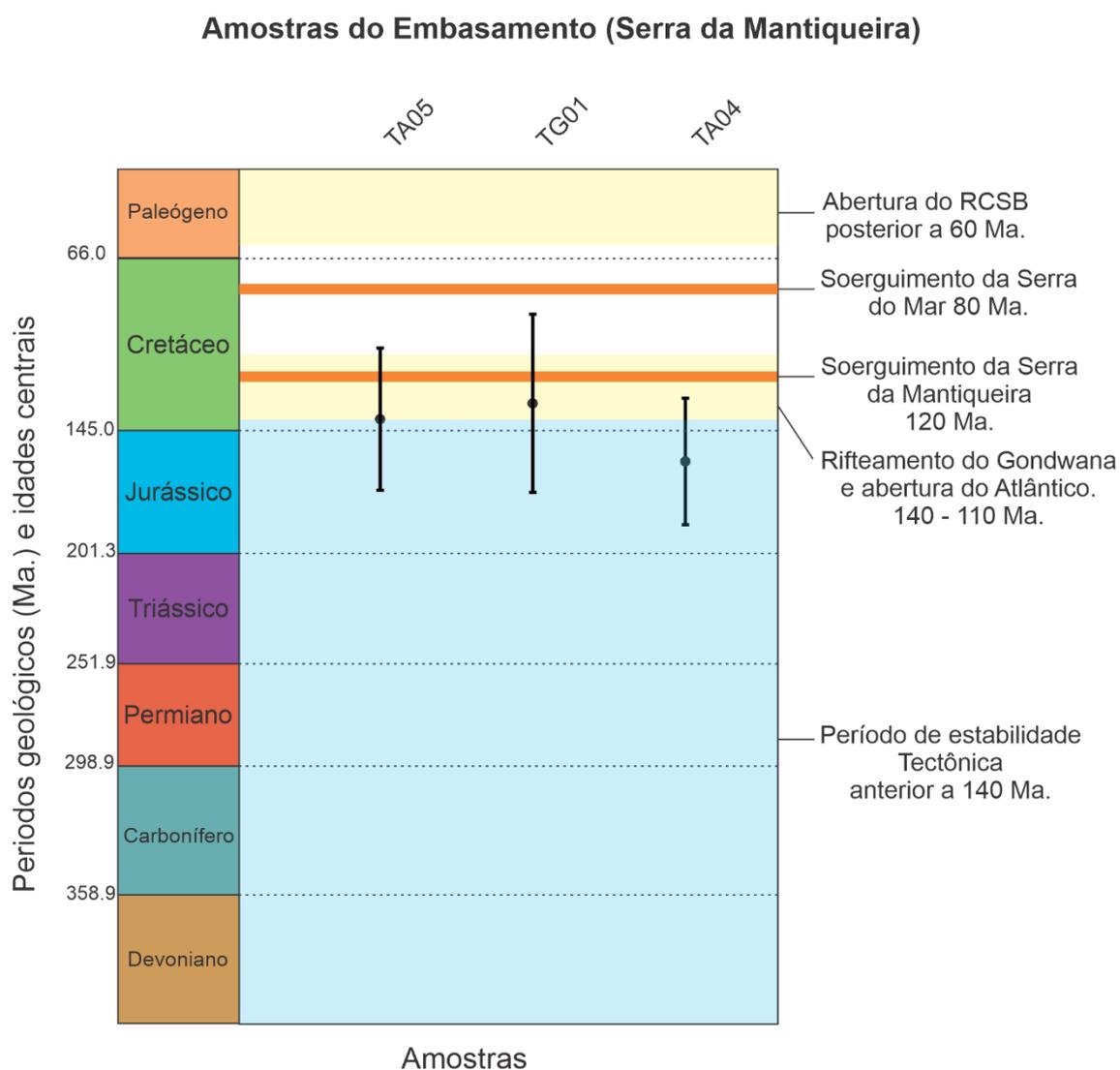
Com base nos resultados obtidos por meio da técnica de traço de fissão em zircão nas amostras da Fm. Resende, Fm. Tremembé e embasamento adjacente, pode-se realizar algumas considerações quanto a área de estudo, expostas a seguir. Devido à baixa quantidade de grãos presentes nas amostras TG04 (Bacia de Taubaté) e TG06 (Embasamento), ambos os resultados não foram considerados nas discussões.

### 6.1 Correlações dos eventos geológicos com as idades TFZ

O compilado de picos de idades TFZ, apresenta variação do Permiano ao Cretáceo para a Bacia de Taubaté, e Triássico ao Cretáceo, para o embasamento cristalino. Os principais eventos geológicos da área junto a variação de idades para as amostras analisadas podem ser observados nos gráficos da figura 21 (Picos de idade da Bacia de Taubaté) e figura 22 (Idades centrais do embasamento adjacente).



**Figura 21:** Gráfico da distribuição dos picos de idade associado aos principais eventos geológicos da área de estudo.



**Figura 22:** Gráfico da distribuição das idades centrais do embasamento associadas aos principais eventos geológicos da área de estudo.

Com base nos dados nota-se que tanto a Formação Resende, quanto a Formação Tremembé, apresentam uma população de grãos com idades pré-Cenozóicas. Devido a temperatura de fechamento associada ao sistema de Traços de Fissão em Zircão, fica evidente que não houveram fenômenos termotectônicos pós-Cretáceos de grande magnitude, que envolvam grandes profundidades capazes de apagar as idades TFZ nos grãos detríticos da Bacia de Taubaté. Neste contexto dois intervalos distintos de atividade termotectônica são registrados pelas idades TFZ tanto para a bacia quanto para o embasamento: limite Permiano-Triássico ao Jurássico Inferior e Jurássico Superior ao Cretáceo Inferior.

- **Permiano ao Jurássico Inferior**

As amostras representativas deste período são para a bacia (TG02 (P2), TA01, TA02, TA03 e TG03) e para o embasamento (TA04). Os picos de idade TFZ para os grãos da bacia, apresentam quase em sua totalidade idades Permo-Jurássicas, com maior população entre o Triássico ao Jurássico (Amostras TG02 (P2), TA01, TA02 e TA03).

A área de estudo no período entre o Permiano ao fim do Jurássico é marcada por uma estabilidade tectônica, seguida por uma nova fase de reativação do embasamento observada no Jurássico Superior. Nos sedimentos da Bacia de Taubaté, a estabilidade Permo-Jurássica é registrada pelos picos de idade superiores a 200 Ma., fato já esperado para o TFZ levando em consideração sua maior resistência a eventos de alta temperatura.

As idades Inferiores a 200 Ma. e superiores a 145 Ma. considerando o erro associado (Figuras 19 e 20), tanto do embasamento quanto da bacia, corroboram e registram a reativação tectônica já abordada no capítulo 4.3, e os eventos iniciais de rifteamento do Gondwana e abertura do Atlântico (ALMEIDA, 1976).

### Jurássico Superior ao Cretáceo Inferior

As amostras representativas deste período são para a bacia (TG02(P1)) e para o embasamento (TG01 e TA05). O fim do Jurássico é marcado pela reativação tectônica do embasamento responsável pelos processos de rifteamento do Gondwana e abertura do Atlântico (HERZ, 1977; ZALAN & OLIVEIRA, 2005;), vulcanismo Serra Geral (TURNER et al.,1994;) e soerguimento da Serra da Mantiqueira (120 Ma.) e Serra do Mar 80 (Ma) durante o Cretáceo.

O evento registrado pelo pico 1 da amostra TG02 (128 Ma.), está de acordo com a proposta de soerguimento da Serra da Mantiqueira a cerca de 120 Ma. (Hackspacher et al. ,2004). As idades centrais, no limite Jurássico-Cretáceo das amostras da Serra da Mantiqueira (132 – 170 Ma.), registram o intervalo de rifteamento do Gondwana e abertura do Atlântico, que como observado nas figuras 19, e 20 também está associado ao período de soerguimento da Serra da Mantiqueira. (GALLAGUER *et al.* 1994; ZALÁN 2004).

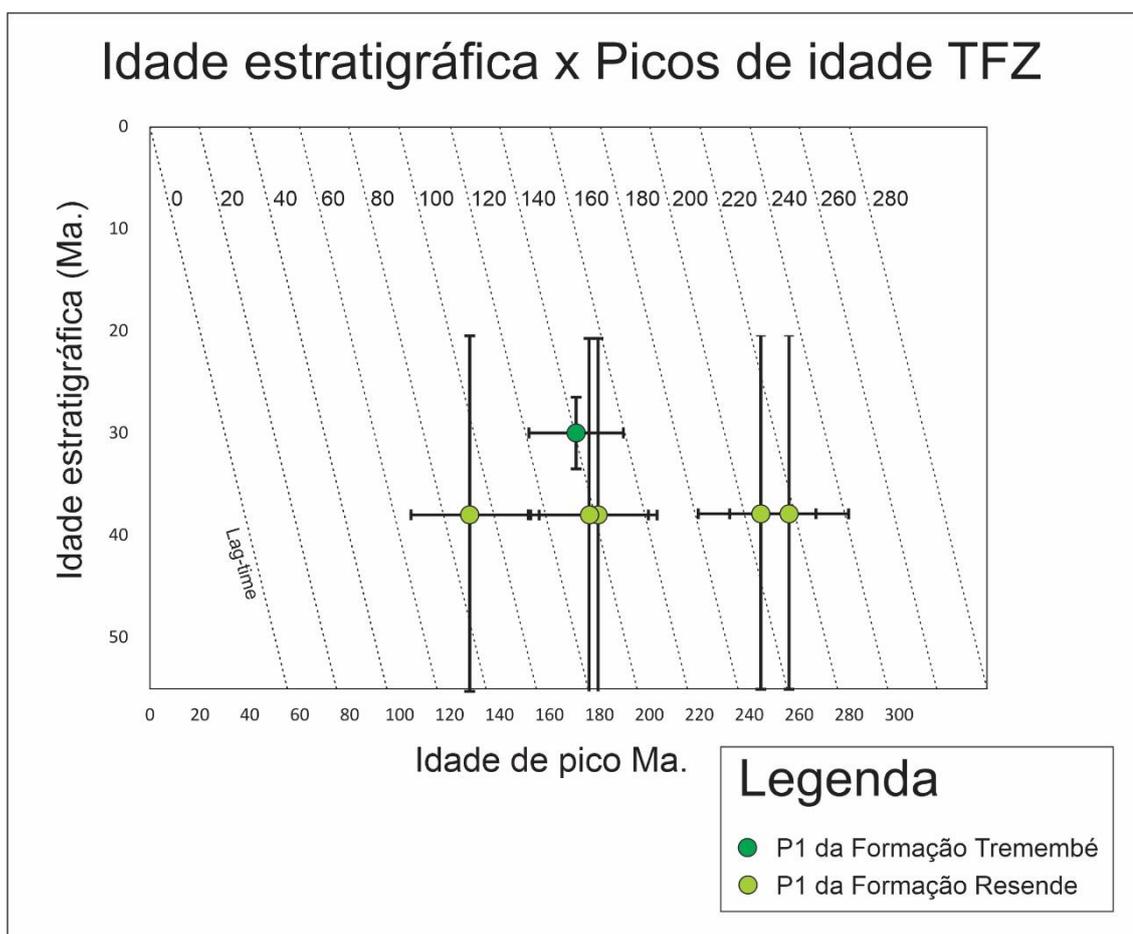
### 6.2 Considerações e correlações quanto as taxas de *lag-time*

As idades TFZ das amostras sedimentares Eocenic a Miocenic da Bacia de Taubaté (Formação Resende e Tremembé) revelam idades pré-deposicionais registrando eventos pretéritos herdados do embasamento cristalino. O tempo decorrente entre o fechamento do sistema termocronológico (240° C no caso do zircão), soerguimento da rocha, exposição na superfície, erosão, transporte e deposição denominado *lag-time*, é da ordem de 75 a 200 Ma. (tabela 24)

**Tabela 24:** Compilado dos valores de *lag-time* para a Fm. Resende e Fm. Tremembé

| <i>Lag-time</i> |      |           |          |
|-----------------|------|-----------|----------|
| Amostra         | Pico | Min (Ma.) | Max(Ma.) |
| TG02            | P1   | 75        | 105      |
|                 | P2   | 173.2     | 203.2    |
| TA01            | P1   | 118.1     | 148.1    |
| TA03            | P1   | 126.5     | 156.5    |
| TA02            | P1   | 143       | 149      |
| TG03            | P1   | 203       | 233      |

Em um conceito ideal, o embasamento cristalino, apresenta um comportamento de rejuvenescimento da idade TFZ com o aumento da profundidade. Com aos processos de exumação, erosão, e deposição os estratos sedimentares que não sofreram reaquecimento, adquirem característica inversa tendo idades mais antigas em estratos mais antigos. Entretanto a pluralidade de áreas fontes para as bacias sedimentares podem alterar esse conceito, coexistindo tanto grãos antigos como mais recentes no mesmo estrato. Esse comportamento é observado para a Fm. Resende que apresenta uma gama de idades entre 130 a 220 Ma. Os gráficos Idade de pico TFZ vs Idade estratigráfica apresentados na figura 23 e 24, ilustram muito bem essa situação e mostra o comportamento da área fonte em um intervalo de tempo específico (no caso entre 23 e 53 Ma.) com base nas idades TFZ obtidas para diferentes estratos.



**Figura 23:** Gráfico idade deposicional vs idade de pico para Formação Resende e Formação Tremembé.

A figura 23, apresenta um rejuvenescimento do pico de idade TFZ para Fm. Tremembé (estrato mais novo) se comparado a Fm. Resende (estrato mais antigo), com base nisso, espera-se dois comportamentos distintos para área fonte sintetizados na figura 24.



**Tabela 25:** Compilado de dados de taxa de *lag-time* para as amostras da Formação Resende e Tremembé.

| Compilado de valores de taxa <i>lag-time</i> |       |                             |                             |                             |                                   |
|--|-------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| Amostra                                      | Picos | Taxa para 8,6 km<br>(m/Ma.) | Taxa para 7.1 km<br>(m/Ma.) | Taxa para 6.1 km<br>(m/Ma.) | Intervalo estratigráfico<br>(Ma.) |
| TA02   | P1    | 70 - 78                     | 58 - 64                     | 50 - 55                     | 33 - 27                           |
| TG04   | P1    | 41 - 57                     | 34 - 47                     | 29 - 41                     | 53 - 23                           |
| TG05   | P1    | 44 - 63                     | 36 - 52                     | 31 - 44                     |                                   |
| TA03   | P1    | 64 - 117                    | 53 - 96                     | 46 - 83                     |                                   |
| TA01   | P1    | 69 - 132                    | 57 - 109                    | 49 - 94                     |                                   |
| TG03   | P1    | 105 - 391                   | 87 - 323                    | 74 - 277                    |                                   |
|  | P2    | 48 - 76                     | 39 - 59                     | 34 - 51                     |                                   |

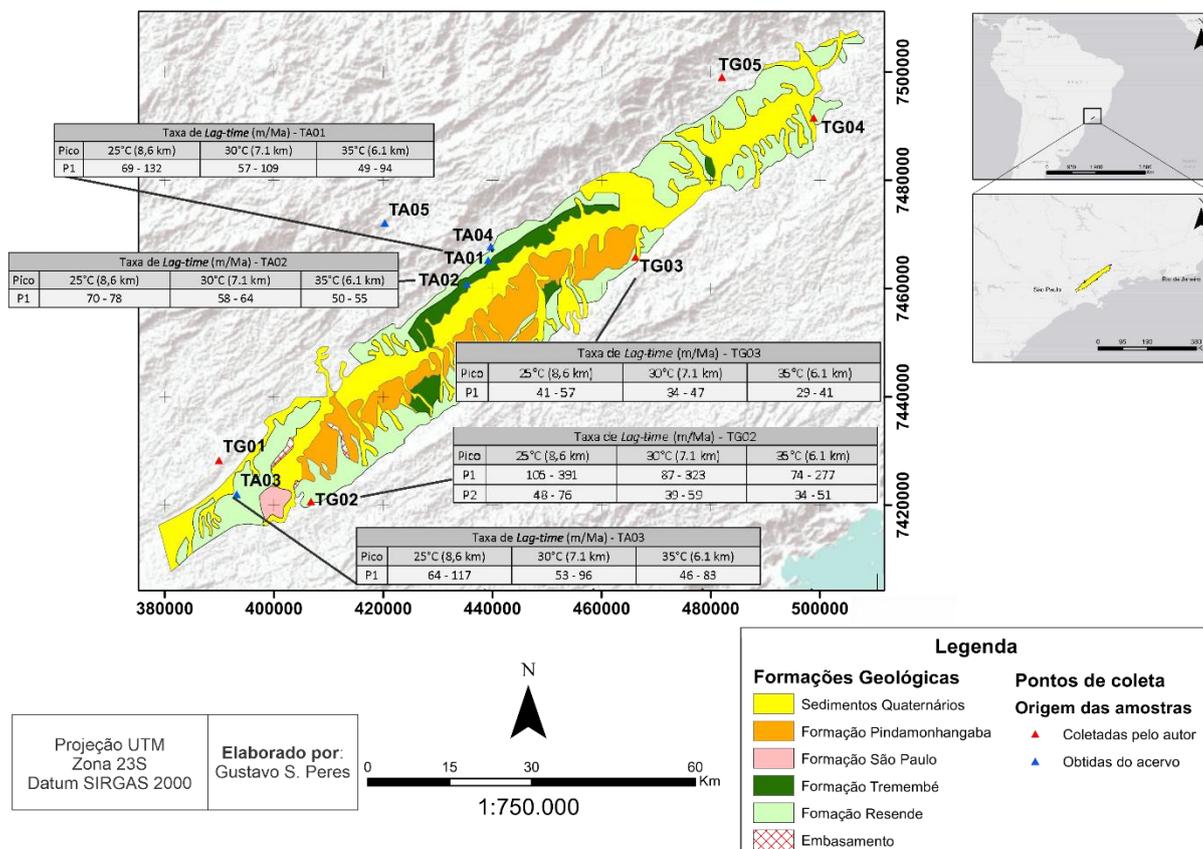
**Idades TFZ Pré-Cretáceas:** apresentam uma taxa média de *lag-time* de 71.1 m/Ma. (Gradiente geotérmico de 25 °C), 58.2 m/Ma. (gradiente geotérmico de 30 °C) e 50.2 m/Ma. (gradiente geotérmico de 35 °C) para a Formação Resende e 71.1 m/Ma. (Gradiente geotérmico de 25 °C), 61 m/Ma. (gradiente geotérmico de 30 °C) e 50.2 m/Ma. (gradiente geotérmico de 35 °C) para Formação Tremembé.

**Idade TFZ Cretácea:** Apresenta uma taxa média de *lag-time* de 248 m/Ma. (gradiente geotérmico de 25 °C), 205 m/Ma. (gradiente geotérmico de 30 °C) e 175.5 m/Ma. (gradiente geotérmico de 35 °C) para a Formação Resende.

Dados referentes a Taxa de *lag-time* obtidas de apatitas foram apresentados por Genaro (2008). Segundo a autora as taxas para a Formação Resende são de 78 m/Ma. (gradiente geotérmico de 25 °C), 66 m/Ma. (gradiente geotérmico de 30 °C) e 56 m/Ma. (gradiente geotérmico de 35 °C). Esses valores estão muito próximos aos dados pré-cretáceos aqui apresentados.

Para Almeida (1983) e Macedo 1989, no Neocretáceo três grandes eventos prográdantes são registrados na Bacia de Santos, o que ocasionou grande recuo da linha de costa mar a dentro, tal evento estaria associado as expressivas movimentações da área adjacente (Serra do Mar). Os valores presentes na Fm. Resende podem apresentar registros oriundo da Serra do Mar, o que explicaria o comportamento de rápida exumação (figura 24) e as altas taxas de *lag-time* obtidas neste trabalho para o período

Valores de taxa de *lag-time* muito altos revelam rápida exumação, já valores menores o inverso (BERNET & GAVER, 2005). Se faz muito pertinente a análise destes dados com base na posição espacial das amostras na bacia e no embasamento. Para tal, os dados de idade TFZ (bacia e embasamento) e as taxas médias de *lag-time* (a partir de uma média simples) foram associadas aos pontos de coleta e apresentados na figura 25.



**Figura 25:** Mapa geológico da Bacia de Taubaté contendo as taxas de *lag-time* com base nos picos e localização das amostras

As taxas de *lag-time* não se diferenciam com base nas fácies conglomeráticas e areníticas da Formação Resende, mas sim, regionalmente onde as maiores taxas encontram-se na borda leste da bacia (amostras TA03 e TA01) se comparado a borda oeste (amostras TG02, TG03). Os dados referentes as idades TFZ (tabela 26), divididos pelo posicionamento leste/oeste, também apresentam uma divisão clara entre picos mais novos para a porção leste e mais antigos para a oeste. Tanto as idades quanto as taxas de *lag-time*, corroboram para uma diferenciação da origem dos sedimentos para as duas regiões.

**Tabela 26:** Compilado de idades dispostos conforme a região de localização da Formação dentro da Bacia de Taubaté

| Idades      |         |      |           |
|-------------|---------|------|-----------|
| Região      | Amostra | Pico | Min (Ma.) |
| Borda leste | TA01    | P1   | 171.1     |
|             | TA03    | P1   | 179.5     |
|             | TA02    | P1   | 176       |
| Borda oeste | TG02    | P1   | 128       |
|             |         | P2   | 226.2     |
|             | TG03    | P1   | 256       |

## 7. CONCLUSÕES

Os dados obtidos permitem as seguintes conclusões:

- A resistência física aos processos de erosão e transporte, e a resistência aos processos de *annealing* em altas temperaturas, faz do zircão um ótimo geotermômetro para a compreensão dos processos atuantes na área fonte de bacias sedimentares como o caso da Bacia de Taubaté.
- As idades TFZ obtidas para a Bacia de Taubaté são pré-Cenozoicas, o que significa que a bacia não sofreu processos de aquecimento durante e posteriormente a sua deposição, registrando eventos desde o Permiano até o Cretáceo. Entretanto, os picos de idade se concentram próximos ao limite Juro-Cretáceo revelando grande densidade de eventos neste período, momento que marca os processos de reativação tectônica após longo período de estabilidade. A presença de idades entre 130 Ma. a 120 Ma. marcam o momento de início do soerguimento da Serra da Mantiqueira.
- O valor de *lag-time* para a Bacia de Taubaté, revela uma variação de 75 a 220Ma.
- Com base nos picos de idade e as taxas de *lag-time*, especialmente a bacia de Taubaté apresenta idades mais jovens (180 a 171 Ma.) com taxas maiores na borda oeste e idades mais antigas (226 – 256 Ma.) com taxas menores para a borda leste. Indicando uma diferença de área fonte para ambas localidades.
- As taxas de *lag-time*, obtidas neste trabalho estão dentro das taxas obtidas em apatitas, na literatura (Genaro, 2008).
- Observa-se um rejuvenescimento nas idades TFZ presentes em estratos superiores da bacia (Fm. Tremembé) se comparada a unidade basal (Fm. Resende).
- Os processos tectônicos atuantes na área fonte durante a deposição do Grupo Taubaté (53 a 23 Ma) são revelados a partir das idades TFZ e os valores de *lag-time*, obtendo-se dois comportamentos distintos. Comportamento 1: uma taxa constante de exumação, devido ao baixo *lag-time* existente entre os picos TFZ. Comportamento 2: Aumento progressivo da exumação, devido ao *lag-time* existente entre os picos TFZ. A diferença de comportamento para os picos, corrobora também com a existência de múltiplas áreas fontes para bacia.
- A coleta e análise de zircões da Serra do Mar, colaborariam para que houvesse uma melhor compressão da área fonte dos sedimentos da Fm. Resende.
- As idades TFZ para o embasamento cristalino da Serra da Mantiqueira, revelam os últimos eventos termotectônicos de alta temperatura registrados para a região, entre 160 a 130 Ma, idade correspondente aos processos de reativação tectônica, rifteamento do Gondwana e abertura do Oceano Atlântico e início do soerguimento da Serra da Mantiqueira.
- Os dados obtidos através do método TFZ por microsonda eletrônica se demonstram eficientes para a finalidade proposta. Os desafios encontrados durante o processo de aplicação metodológica foram sanados devido a grande quantidade de material disponível. A heterogeneidade de grãos sedimentares de zircão, faz com que seja necessária uma coleta minuciosa do material que será utilizado, sendo indispensável uma quantidade entre 2 a 5 kg por amostra a ser analisada.

## 8. REFERÊNCIAS

ALMEIDA F.F.M. de. 1972. Tectono-magmatic activation of the South American Platform and associated mineralization. In: IUGS, Int. Geol. Congress, 24, Montreal, Proc Section, 3:339-346.

ALMEIDA, F.F.M. de. 1976. The system of continental rifts bordering the Santos Basin, Brazil. Anais da Academia Brasileira de Ciências, vol. 48 (suplemento), p. 15-26.

ALMEIDA, F.F.M. 1977. O Cráton do São Francisco. Revista Brasileira de Geociências, 7: 349-364.

ALMEIDA, F. F. M. 1981. O Craton do Paramirim e suas relações com o do São Francisco. In: COM, Simpósio sobre o Cráton do São Francisco e suas Faixas Marginais, 1, Salvador, Anais, 1-10.

ALMEIDA, F. F. M. de; CARNEIRO, C. D. R. 1998. Origem e evolução da Serra do Mar. Revista Brasileira de Geociências, São Paulo, v. 28, n. 2, p. 135-150.

AMADOR, E.S. (1975) Estratigrafia e sedimentação na Bacia de Resende - RJ. Anais da Academia brasileira de Ciências (Supl.), 47:181-223, Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil

ALMEIDA, F. F. M. de; CARNEIRO, C. D. R. 1998. Origem e evolução da Serra do Mar. Revista Brasileira de Geociências, São Paulo, v. 28, n. 2, p. 135-150.

BABINSKY, M; TASSINARI, C.C.G.; NUTMAN, A.P.; SATO, K.; MARTINS, P.O.R.; IYER, S.S. 2001. U/Pb SHRIMP zircon ages of migmatites from the basement of the Embu Complex, Ribeira Fold Belt, Brazil: indications for 1.4-1.3 Ga Pb-Pb and RbSr “isochron” of geological ages of no geological meaning. In: SENAGEOMIN, Simpósio Sudamericano em Geologia Isotópica, 3, Pucón, p. 91 – 93.

BERNET M.; GARVER J.I. - Fission-track analysis of detrital zircon. 2005. In: P.W. Reiners and T. Ehlers, Editors, Low-temperature Thermochronology, Reviews in Mineralogy and Geochemistry Series vol. 58, pp. 205–238.

BITTENCOURT, M. F., NARDI, L. V. S. 1993. Late to post-collisional Brasileiro magmatism in southernmost Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 65: 4- 16, Suplemento 1.

Bizzi L. A, C. Schobbenhaus, R. M. Vidotti e J. H. Gonçalves (eds.), cap V, CPRM, Brasília, 2003.

BRANDON M.T.; RODEN-TICE M.K.; GARVER J.I. 1998. Late Cenozoic exhumation of the Cascadia accretionary wedge in the Olympic Mountains, Northwest Washington State. *Geol. Soc. Am. Bull.* Vol.110, p.985–1009.

CAMPANHA, V.A. (1994). A arquitetura deposicional da Bacia Sedimentar de Taubaté, SP, como subsídio à delimitação das Zonas de Produção Mineral. Rio Claro: IGCE-UNESP, 2 v. (Tese de Doutorado – IGCE – UNESP).

CAMPOS-NETO, M.C. 2000. Orogenic systems from southwestern Gondwana. Na approach to Brasileiro-Pan-Africa Cycle and orogenic collage in southeastern Brasil. In: U.G. Cordani, E.J Milani. A. Thomaz Filho, D.A. Campos (eds). *Tectonic Evolution of South America*. 31<sup>o</sup> Int. Geol. Congr., Rio de Janeiro, p. 335-365.

CARVALHO, A. M. A. de, VIDAL, A. C., & KIANG, C. H. 2011. Delimitação do embasamento da Bacia de Taubaté. *Geologia USP. Série Científica*, 11(1), 19-32.

CARTER A., BROSTOW. C.S. 2000. Detrital zircon geochronology: Enhancing the quality of sedimentary source" information through improved methodology and combined U-Pb and fission-track techniques: *Basin Research*, v. 12. p. 47- 57.

CHIODI FILHO, C.; CHIEREGATI, L. A.; THEODOROVICZ, A. M. G.; THEODOROVICZ, A.; MENEZES, R. G.; RAMALHO, R.; BATOLLA JR., F. 1983. Geologia e recursos minerais das folhas Natividade da Serra e Caraguatatuba. *In: JORNADA SOBRE A CARTA GEOLÓGICA DO ESTADO DE SÃO PAULO EM 1:50000*, 1., São Paulo, Atas... São Paulo; P'ro-Minério, IPT. P. 8-29.

COGNÉ, N., GALLAGHER, K., COBBOLD, P. R. 2011. Post-rift reactivation of the onshore margin of southeast Brazil: evidence from apatite (U–Th)/He and fission-track data. *Earth Planet Sci Lett* 309:118– 130. doi:10.1016/j.epsl.2011.06.025

FERNANDES, A. J.; CAMPOS-NETO, M.C.; FIGUEREDO, M.C.H. 1990. O Complexo Embu no leste do estado de São Paulo: limites e evolução geológicas. In: SGB, Congresso Brasileiro de Geologia, 36, Natal. Anais..., Natal, v.6 p. 2755-2763.

FERNANDES, Flávio L.; CHANG, Hung K. (2001) Modelagem gravimétrica da Bacia de Taubaté: vale do rio Paraíba do Sul, leste do Estado de São Paulo. Revista Brasileira de Geofísica, v. 19, p. 131-144,

GALLAGHER, K., HAWKESWORTH, C.J., MANTOVANI, M.S.M., 1994. Denudation, fission track analysis and the long-term evolution of passive margin topography: application to the southeast Brazilian margin. Journal of South American Earth Sciences 8 (1), 65–77

GALBRAITH, R. F.; LASLETT, G. M., 1988. Some calculations relevant to thermal *annealing* of fission tracks in apatite. Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences, v. 419, n. 1857, p. 305-321.

GALBRAITH R.F., GREEN. P.F. 1990 Estimating the component ages in a finite mixture Nucl. Tracks Radiat. Meas., v. 17, p. 197-206

GALBRAITH, R., 2005. Statistics for Fission Track Analysis. Chapman & Hall/CRC Press, University College London, UK (219 pp.).

GARVER, J.I., BRANDON, M.T., RODEN-TICE, M., KAMP, P.J.J., (1999). Erosional denudation determined by "fission-track ages of detrital apatite and zircon. In: Ring, U., Brandon, M.T., Willett, S., Lister, G. (Eds.), Exhumation Processes: Normal Faulting, Ductile Flow, and Erosion, Geological Society of London Special Publication, Vol. 154, p. 283–304,

GLEADOW, A. J. W., 1974. Fission Track Dating and the interpretation of Thermal and Tectonic Histories. University of Melbourne, Melbourne, Australia (283 pp.).

GIBSON. S.A.; THOMPSON, R.N.; DICKIN, A.P.; LEOMARDOUS, O.H. 1995 High-Ti and Low Ti mafic potassic magmas: key to plume-lithosphere interactions and continental floodbasalt genesis. Earth and Planetary Science Letters, v. 136, p. 149 – 165.

GOMBOSI, D. J., GARVER, J. I., & BALDWIN, S. L.. 2013. On the development of electron microprobe zircon fission-track geochronology. *Chemical Geology*, 363, 312-321.

HACKSPACHER, P. C., DANTAS, E. L., SPOLADORE, A., FETTER, A. H., OLIVEIRA, M. A. F. 2000. Evidence of neoproterozoic backarc basin development in the Central Ribeir Belt, Southeastern Brazil new geochronological and geochemical constraints from São Roque Açungui groups. *Revista Brasileira de Geociências*, 30(1):110-114.

HACKSPACHER, P. C.; GODOY, A. M.; OLIVEIRA, M. A. F. 1993. Evolução crustal do bloco São Roque, na região sudeste do Estado de São Paulo. *Ver. Bras. Geoc.*, v.23, n. 3

HACKSPACHER, P.C.; RIBEIRO, L. F. B.; RIBEIRO, M.C.S.; FETTER, A.H.; HADLER NETO, J.C.; TELLO SAENZ, C.A.; DANTAS, E.L. Consolidation and Break-up of the South American Platform in Southeastern Brazil: Tectonothermal and Denudation Histories. *Gondwana Research*, v. 7, n. 1, p. 91 – 101, 2004.

HASUI, Y., CARNEIRO, C. D. R., & Coimbra, A. M. (1975). The Ribeira folded belt. *Revista Brasileira de Geociências*, 5(4), 257-266.

HEILBRON M.; MACHADO N. 2003. Timing of terrane accretion in the Neoproterozoic-Eopaleozoic Ribeira orogen (SE Brazil). *Precambrian Research* 125:87-112.

HEILBRON, M.L., PEDROSA-SOARES, A.C., CAMPOS NETO, M.C., SILVA, L.C., TROUW, R. & JANASI, V.A. 2004. Província Mantiqueira. In: V.M. MANTESSO-NETO, A. BARTORELLI, C.D.R. CARNEIRO & BRITO & NEVES, B.B. (orgs.). *Geologia do Continente Sul Americano*. São Paulo, Editora Beca, p. 203-234.

HIRUMA S.T. et al. 2010. Denudation history of the Bocaina Plateau, Serra do Mar, southeastern Brazil: Relationships to Gondwana breakup and passive margin development *Gondwana Research* 18 (2010) 674–687.

HOLDEN, N. E., HOFFMAN, D. C., 2000. Spontaneous fission Half-lives for ground-state nuclide. Technical report Pure Appl. Chem. 72(8), 1525-1562.

HUFORD A. J. 1986. Cooling and uplift patterns in the Lepontine Alps. South Central Switzerland and an age of vertical movement on the Insubric fault line: Contributions to Mineralogy and Petrology. v. 92. p. 413-427.

JAFFEY, A. H., FLYNN, K. F., GLENDENIN, L. E., BENTLEY, W. T., & ESSLING, A. M. 1971.. Precision measurement of half-lives and specific activities of U 235 and U 238. Physical review C, 4(5).

JANASSI, V.A. 1999. Petrogênese de granitos crustais na Nappe de Empurrão Socorro Guaxupé (SP-MG): uma contribuição da geoquímica elemental e isotópica. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. Tese de Livre Docência ,304 p.

JONCKHEERE, R., 1995. Absolute Age Determinations of Apatite based on Uranium Fission Tracks: a Methodical Investigation. University of Gent, Gentt (504 pp.).

JULIANI, C.; HACSPACHER, P.C.; DANTAS, E.L.; FETTER, A.H. The Mesoproterozoic vulvano-sedimentary Serra do Itaberaba Group of the Central Ribeira Belt, São Paulo State, Brazil: implications for the age of the overlying São Roque Group. RBG 30, p. 82-86. 2000.

JULIANI, C. & BELJAVSKIS, P. 1983. Geologia e evolução geológico-estrutural preliminar do Itaberaba e São Roque nas regiões das serras do Itaberaba (SP). In: SIMP. REG. DDE GEOLOGIA, 4, São Paulo. Atas..., São Paulo, SBG-NPS, p. 113-126.

JULIANI, C.; BELJAVSKIS, P.; SCHORSCHER, H. D. 1986. Petrogênese do vulvanismo e aspectos metalogenéticos associados: Grupo Serra do Itaberaba na região de São Roque – SP. IN: Congresso Brasileiro de Geologia., 34. Goiânia – Anais... Goiânia, SBG – v 2, P. 730-747.

JULIANI, C. 1993. Geologia, petrogênese e aspectos metalogenéticos dos Grupos Serra do Itaberaba e São Roque nas regiões das Serras do Itaberaba e da Pedra Branca, NE da cidade de São Paulo, SP. Instituto de Geociências. USP. Tese de Doutorado, 803 p.

JULIANI, C.; HACSPACHER, P.C.; DANTAS, E.L.; FETTER, A.H. The Mesoproterozoic vulvano-sedimentary Serra do Itaberaba Group of the Central

Ribeira Belt, São Paulo State, Brazil: implications for the age of the overlying São Roque Group. RBG 30, p. 82-86. 2000.

KOHN B.; L. CHUNG e G. ANDREW. 2019. Fission-Track Analysis: Field Collection, Sample Preparation and Data Acquisition. In: Malusà, Marco G Fitzgerald, Paul G. Fission-Track Thermochronology and its Application to Geology 1. Ed. Cham, Switzerland. p. 38-39.

LIMA, M. R. & MELO, M. S. (1989), Palinologia de sedimentos da Bacia de São Paulo. In: WORKSHOP – GEOLOGIA DA BACIA DE SÃO PAULO, SP. Coletânea de Comunicações... São Paulo: IG-USP/SBG-SP, p. 35-37

MACEDO, J. M. (1989), Evolução tectônica da Bacia de Santos e áreas continentais adjacentes. Boletim de Geociências da Petrobrás, v. 3, n. 3, p. 159-173.

MACHADO N., VALLADARES C, HEILBRON M., VALERIANO C. 1996. U-Pb geochronology of the central Ribeira Belt (Brazil) and implications for the evolution of the Brazilian Orogeny. Precambrian Research, 79:347-361.

MOHRIAK, W. U., 2004. Recursos energéticos associados à ativação tectônica mesozóicocenozóica da América do Sul. In: V. Mantesso – Neto, A. Bartorelli, C.D.R. Carneiro and B.B.Brito-Neves (eds.), Geologia do continente sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida, cap. XVIII, p. 293 – 318.

MOTIDOME, Mario Juiti. Geologia do complexo Embu na região entre Santa Isabel e Biritiba-Mirim, SP. 1993. Dissertação (Mestrado em Geoquímica e Geotectônica) - Instituto de Geociências, Universidad de São Paulo, São Paulo, 1993. doi:10.11606/D.44.1993.tde-10042015-124746. Acesso em: 2022-06-11.

DE OLIVEIRA, Christie H. ENGELMANN; JELINEK, Andréa R. História termotectônica da margem continental brasileira a partir de dados de traços de fissão em apatita. Pesquisas em Geociências, v. 44, n. 3, p. 387-400, 2017.

PASSARELLI, C. L. 2004. Caracterização estrutural e geocronológica dos domínios tectônicos da porção sul oriental do Estado de São Paulo. Instituto de Geociências, Universidade sw São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 254 p.

RIBEIRO, G. D. C. (2010). Avaliação morfológica, taxonômica e cronológica dos mamíferos fósseis da Formação Tremembé (Bacia de Taubaté), Estado de São Paulo, Brasil. Master's Dissertation, Instituto de Biociências, University of São Paulo, São Paulo.

RIBEIRO, G. D. C. (2015). Osteologia de *Taubatherium paulacoutoi* Soria & Alvarenga, 1989 (Notoungulata, Leontiniidae) e de um novo *Pyrotheria*: dois mamíferos fósseis da Formação Tremembé, Brasil (SALMA Deseadense - Oligoceno Superior). Doctoral Thesis, Instituto de Biociências, University of São Paulo, São Paulo.

RICCOMINI, C. O Rift Continental do Sudeste do Brasil. 1989. Tese (Doutorado em Geologia Sedimentar) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1990. doi:10.11606/T.44.1990.tde-18032013-105507. Acesso em: 2021-04-30.

RICCOMINI, C., SANT'ANNA, L.G., FERRARI, A.L. (2004). Evolução geológica do Rift Continental do Sudeste do Brasil. In: Geologia do Continente Sul-Americano – Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. Beca, p. 383-405,

SADOWSKI, E. D. & TASSINARI, C.C.G. 1988. The São Roque volcano-sedimentary sequence of proterozoic age in: INTERN. GOND. SYMP., 7, São Paulo, Brazil. Excursions.

SCHMITT R.S., TROUW R.A.J., VAN SCHMUS, W.R. 1999. The characterization of a Cambrian (» 520 Ma) tectonometamorphic event in the Costeiro Domain of the Ribeira Belt, using U-Pb in syntectonic veins. In: Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos. Lençóis. Extended Abstracts.

SILK E.C.H., BARNER R.S. 1959. Examination of fission fragment tracks with an electron microscope. Phil. Mag.vol. 4, p.970–71.

PRICE P.B. e WALKER R.M. 1962. Chemical etching of charged-particle tracks in solids. Journal of Applied Physics, 33:3407–3412.

TAGAMI, T., CARTER, A., HURFORD, A.J. - Natural long-term *annealing* of the zircon fission-track system in Vienna Basin deep borehole samples: constraints

upon the partial *annealing* zone and closure temperature. Chem. Geol. Vol.130, p.147–157, 1996.

TAGAMI, T., GALBRAITH, R.F., YAMADA, R., LASLETT, G.M. (1998) Revised *annealing* kinetics of fission tracks in zircon and geological implications. In: P. Van den haute and F. De Corte, Eds. Advances in fission-track geochronology, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 330 pp

TASSINARI, C.C.G. 1988. As idades das rochas e dos eventos metamórficos da porção sudeste do Estado de São Paulo e sua evolução crustal (Tese de Dout. Apres. Ao IGUSP), São Paulo, 236 p.

TELLO SAENZ, C. A.; HACKSPACHER, P. C.; HADLER NETO, J. C.; IUNES, P. J.; GUEDES, S.; RIBEIRO, L. F. B.; PAULO, S. R. 2003. Recognition of cretaceous, Paleocene and neogene tectonic reactivation through apatite fission-track analysis in precambrian areas of southeast Brasil: association with the opening of the south Atlantic Ocean. Journal of South American Earth Sciences, Oxford, v. 15, n. 7, p. 765-774.

TELLO C.A., HADLER J.C., IUNES, P.J. , GUEDES, S. HACKSPACHER, P.C. RIBEIRO, L.F.B. PAULO, S.R., OSÓRIO A.M.. Thermochronology of the South American platform in the state of São Paulo, Brazil, through apatite fission tracks, Radiation Measurements, Volume 39, Issue 6, 2005, Pages 635-640, ISSN 1350-4487.

THOMPSON, R. N.; GIBSON, S. A.; MITCHELL, J. G.; DICKIN, A. P.; LEONARDOS, O. H.; BROD, J. A.; GREENWOOD, J.C.. Migration Cretaceous-Eocene magmatism in the Serra do Mar alkaline province, SE Brazil: melts from the deflected Trindade mantle plume? Journal of Petrology, v. 39 p. 1493 – 1526, 1998.

TROUW, R. A. J., NUNES, R. P. M., CASTRO, E. M. O., TROUW, C. C., & MATOS, G. C. D. (2008). Geologia da folha Itajubá SF. 23-YB-III. CPRM

VAN SCHUMMUS, W. R.; TASSINARI, C.C.G.; CORDANI, D.G. 1986. Estudo geocronológico da parte inferior do Grupo São Roque. In: CONG. BRAS. GEOL., 34, Goiânia,. Anais Goiânia, SBG, v3, p. 1399-1406.

WAGNER, G. A., VAN DEN HAUTE, P., 1992. Fission Track Dating. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (285 pp.).

YAMADA, R., TAGAMI, T., NISHIMURA, S. - Confined fission-track length measurement of zircon: assessment of factors affecting the paleotemperature estimate. *Chem. Geol., Isot. Geosci. Sect.* vol.119, p.293–306, 1995<sup>a</sup>

YAMAMOTO, I. T. Palinologia das bacias tafrogênicas do sudeste (Bacias de Taubaté, São Paulo e Resende): análise bioestratigráfica integrada e interpretação paleoambiental. Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas da UNESP/Rio Claro, 148p. 1995

YOUNG, D.A. 1958. Etching of radiation damage in lithium fluoride, *Nature*, vol.182, p.375–377.

ZALÁN, P. V.; OLIVEIRA, J. A. B. (2005) Origem e evolução estrutural do Sistema de Riftes Cenozóicos do Sudeste do Brasil. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, v.13, n.2, p.269-300.