

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Introdução

Os resultados obtidos serão apresentados a partir de uma compartimentação que considerou: a) os resultados das análises de termocronologia de baixa temperatura (U-Th)/He em apatita e a necessidade de se avaliar a consistência do conjunto de dados e discutir o seu significado no contexto da área de estudos e regionalmente; b) a modelagem inversa das histórias térmicas das amostras; e c) análises e interpretações sobre os efeitos dessa evolução em processos de denudação na área, com foco na relação termocronologia-evolução do relevo. A apresentação dos resultados é seguida de uma síntese, integrando resultados e discussões apresentadas em trabalhos prévios, com o objetivo principal de identificar, a partir da termocronologia de baixa temperatura (U-Th)/He em apatita, os eventos de reativação no intervalo Mesozoico-Cenozoico na margem continental do sudeste do Brasil, nessa seção entre a Serra da Mantiqueira e o Gráben da Guanabara.

### 5.2 Termocronologia de baixa temperatura (U-Th)/He em apatita aplicada à margem continental sudeste do Brasil na Seção Serra da Mantiqueira - Gráben da Guanabara

#### 5.2.1 Amostragem

As análises termocronológicas foram realizadas a partir de amostras coletadas nos pontos destacados nas Figuras 3 e 74. Os pontos de coletas estão dispostos em uma seção entre a Serra da Mantiqueira e o Gráben da Guanabara, transversal aos segmentos do sistema de riftes na área (Paraíba do Sul e Litorâneo e grábens associados) e que cruza a zona de falhas transversais com orientação NW-SE (Figura 74).

A partir de 33 amostras coletadas, 18 foram selecionadas para aplicação do método de termocronologia (U-Th)/He. Não foram encontrados cristais de apatita ou grãos de apatita em condições de serem analisados em 15 amostras submetidas à etapa de preparação inicial descrita detalhadamente no capítulo 3.2, que apresenta os procedimentos analíticos. As fotomicrografias de cada cristal, com as respectivas medidas de comprimento e largura dos

dois lados estão apresentadas no anexo A. Como observado no item 3.2.5, tais medidas são fundamentais para a determinação do fator de correção morfométrico ( $F_T$ ) (FARLEY et al., 1996) utilizado na correção da idade de cada cristal.

### 5.2.2 Idades (U-Th)/He

Os dados analíticos, sintetizados no Anexo B, destacam a idade de alíquotas com 3 a 8 cristais, totalizando 107 cristais analisados com sucesso, assim como o cálculo da idade média para cada amostra. As idades incluídas no cálculo das médias estão apresentadas na tabela em destaque (negrito). Foi realizada uma seleção de idades com base em considerações importantes para a aplicação do método (FITZGERALD et al., 2006). As idades muito antigas e/ou muito jovens, assim como idades anômalas foram excluídas do cálculo das idades médias. Porém, essas idades foram mantidas no conjunto dos resultados. Embora seja importante avaliar os resultados das idades médias para cada amostra, já que foram analisados um total que varia entre 3 a 8 cristais para cada uma delas, resultados excluídos do cálculo das idades médias foram investigados e serão discutidos no subcapítulo sobre a dispersão de idades AHe. A amostra 05 foi excluída da análise do conjunto de dados, uma vez que apenas um cristal foi analisado e qualquer consideração sobre essa idade poderia ser inconsistente; a informação sobre o total de 107 cristais considera a exclusão dessa amostra. Outros cristais que apresentaram problemas identificados durante o processo de execução das análises não estão apresentados na tabela, o que justifica a numeração não sequencial para os cristal em algumas situações (Anexo B).

A partir da execução das etapas do método de termocronologia (U-Th)/He em apatita, como descrito no capítulo 3, foram obtidas idades em 107 cristais de apatita de amostras do embasamento coletadas no perfil com orientação NW-SE, numa seção entre a Serra da Mantiqueira e o Gráben da Guanabara. As **idades não corrigidas** variam de **174,13 ± 3,03 Ma a 27,07 ± 0,60 Ma (1  $\sigma$ )** e as **idades corrigidas** estão entre **250,1 ± 8,7 Ma e 43,5 ± 1,9 Ma (2  $\sigma$ )** (Anexo B).

### 5.3 Análise da dispersão das idades AHe

Os resultados indicam uma dispersão de idades moderada. No total, 18 amostras foram submetidas ao método de termocronologia (U-Th)/He, com 107 cristais analisados e, a partir desse total, 72 resultados foram considerados mais consistentes entre si e, por isso, foram utilizados nos cálculos das médias de idades das respectivas amostras. Os outros 35 cristais foram desconsiderados para esse cálculo com o propósito de não interferir nas médias que representam a idade geral de cada amostra ou ponto coletado. Entretanto, é fundamental observar que as idades excluídas desse cálculo estão incluídas em algumas discussões considerando-se que possam ter significado geológico importante para a área na medida em que tenham registrado algum evento importante ao longo da sua história tectono-termal. Além da idade do resfriamento da rocha, ocorre ainda a possibilidade de registro da idade da cristalização de minerais (Farley et al., 1996; Reiners e Brandon, 2006).

Embora essas idades possam parecer anômalas numa primeira observação, já que apresentam idades mais antigas ou mais jovens do que a média obtida para a amostra, tais idades devem ser discutidas. A dispersão das idades analisadas pode ser relacionada a vários fatores que podem ocorrer de forma combinada, conforme sintetizados por Fitzgerald et al. (2006) e apresentados na Tabela 1 (Capítulo 3).

#### 5.3.1 Relação idade AHe x tamanho do cristal

A variação no tamanho do cristal de apatita é uma potencial causa de dispersão nas idades AHe. Nota-se que o tamanho do cristal aqui referido é o raio ( $r$ ) calculado com base nas medidas de comprimento e largura de dois lados do cristal. O raio é utilizado nos estudos termocronológicos como referência para a avaliação e interpretação dos dados. Uma fração da perda do He é controlada pelo tamanho do cristal que influencia a difusividade (Farley, 2000) e, portanto, espera-se uma correlação positiva entre idade e dimensão do cristal (Reiners e Farley, 2001). A associação entre zonamento e variabilidade do tamanho dos cristais também pode justificar a dispersão de dados em algumas situações apresentadas em alguns estudos (Flowers et al., 2011).

Com o propósito de reduzir os riscos de obtenção de resultados anômalos gerados por esse fator, a etapa de seleção de cristais foi executada de maneira criteriosa para que cristais com boa qualidade morfológica e em intervalo de tamanho restrito fossem analisados.

O raio dos cristais apresentam variação de tamanho entre 30 - 52  $\mu\text{m}$ . No entanto, os valores extremos estão representados apenas por duas amostras. O conjunto maior de dados está compreendido no intervalo entre 32 - 48  $\mu\text{m}$  de raio (Figura 60). Esse intervalo de raio é considerado adequado com base na discussão sobre a influência do tamanho do cristal, já que diversos fatores podem interferir no registro de idades mais antigas ou mais jovens, na medida em que cristais maiores podem reter uma maior fração do He radiogênico e os menores, por outro lado, podem perder uma fração significativa (REINERS e FARLEY, 2001). Assume-se que uma menor dimensão para os cristais de apatita (raio) se aproxima mais apropriadamente do domínio de difusão efetivo (FARLEY, 2000; REINERS e FARLEY, 2001).

De uma maneira geral, as variações observadas nas idades não estão associadas ao tamanho dos cristais, indicando outros efeitos atuantes na dispersão de idades das alíquotas de uma mesma amostra (Figuras 61, 62 e 63). Os casos de exceção são as amostras PA-LM-12, VR-LM-18, RE-LM-25 e BA-LM-29, que indicam o aumento da idade com o aumento do raio do cristal. Os gráficos de idade x raio para essas amostras isoladamente destacam tal correlação. Na amostra PA-LM-12 (Figura 61), quatro entre cinco cristais apresentam correlação entre idade e raio. A amostra BA-LM-29 (Figura 63) apresenta correlação positiva entre idade e raio apenas quando se observa um grupo de quatro cristais de um total de 7. A amostra VR-LM-18 (Figura 62) apresenta uma correlação positiva alta entre idade e raio, no entanto o cristal com raio menor e idade mais jovem ( $53,8 \pm 1,9$  Ma) foi excluído do cálculo da média dessa amostra. Os outros dois cristais apresentam consistência entre as idades registradas ( $85,5 \pm 2,6$  Ma e  $85,7 \pm 3,2$  Ma).

Figura 60 - Gráfico Idade x Raio para todas as idades obtidas (Idades corrigidas = Idades  $F_t$ ).

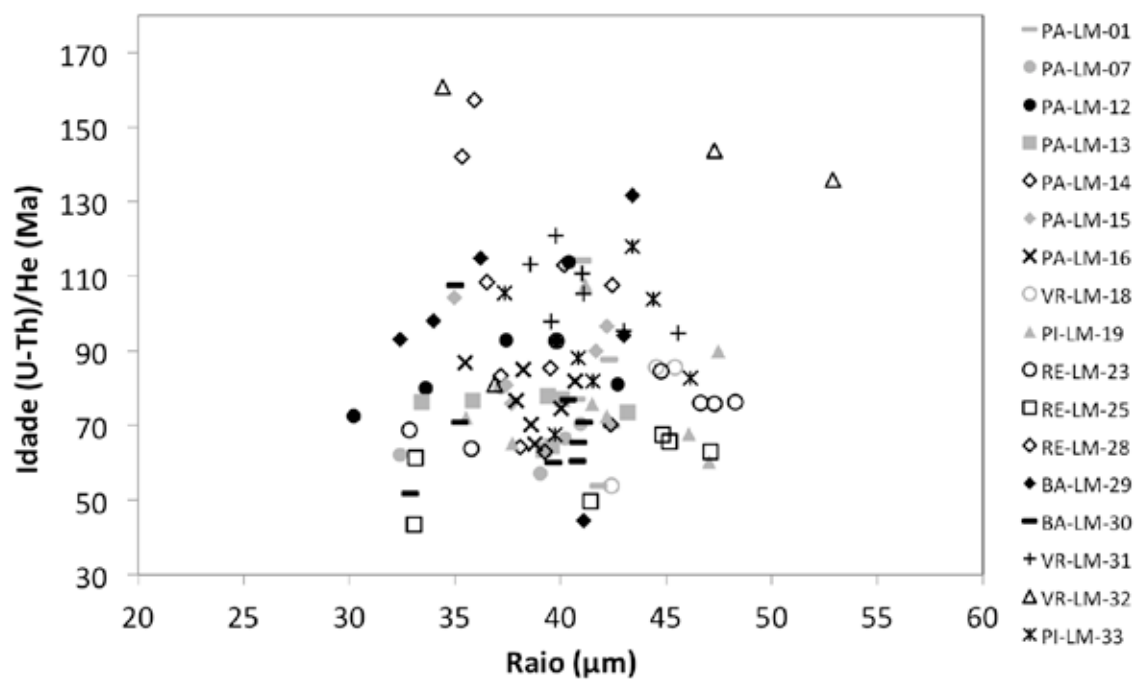


Figura 61 - Gráficos Idade x Raio individual por amostra (PA-LM-01, PA-LM-07, PA-LM-12, PA-LM-13, PA-LM-14 e PA-LM-15) com todas as idades obtidas (Idades corrigidas = Idades  $F_1$ ).

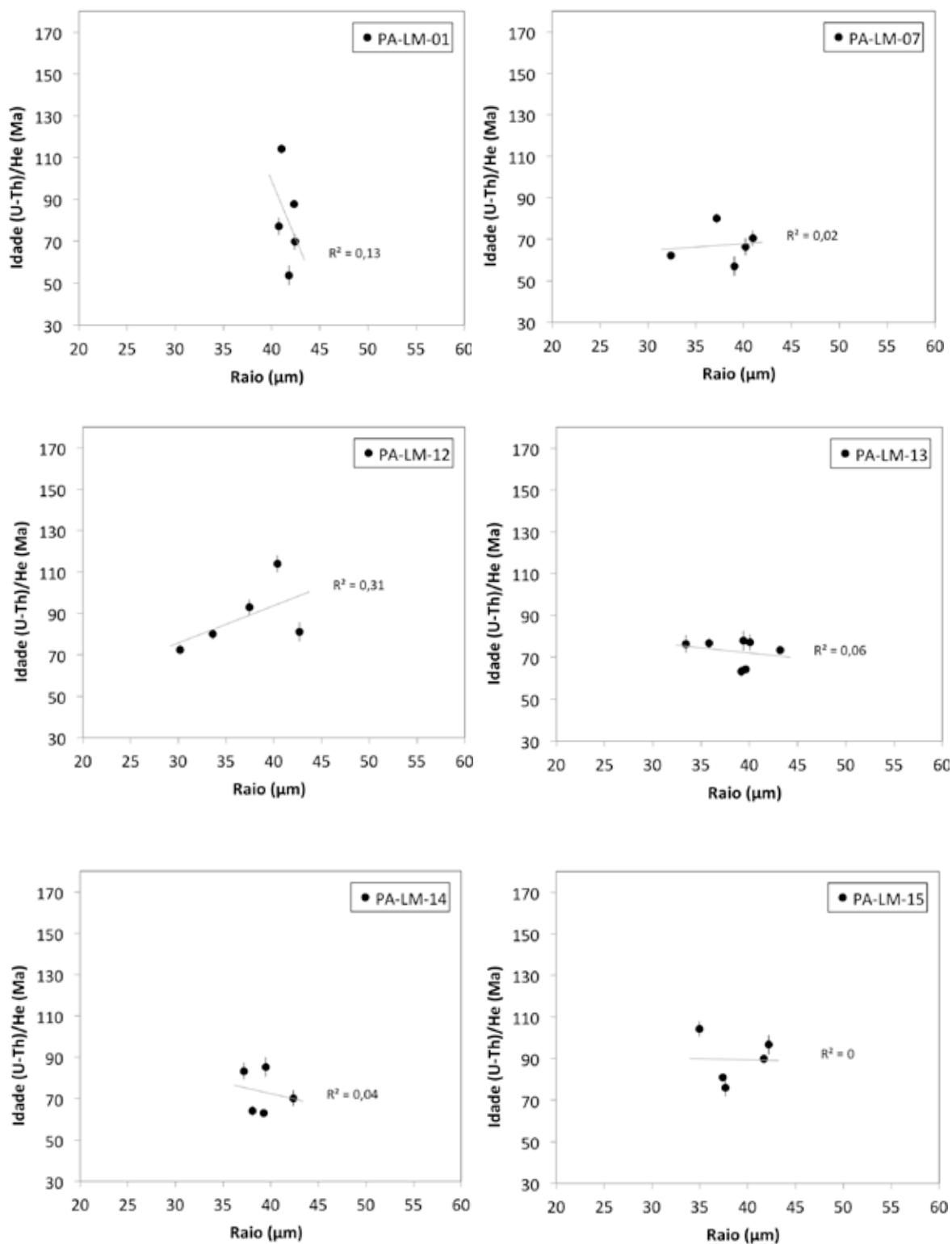


Figura 62 - Gráficos Idade x Raio individual por amostra (PA-LM-16, VR-LM-18, PI-LM-19, RE-LM-23, RE-LM-25 e RE-LM-28) com todas as idades obtidas (Idades corrigidas = Idades  $F_1$ ).

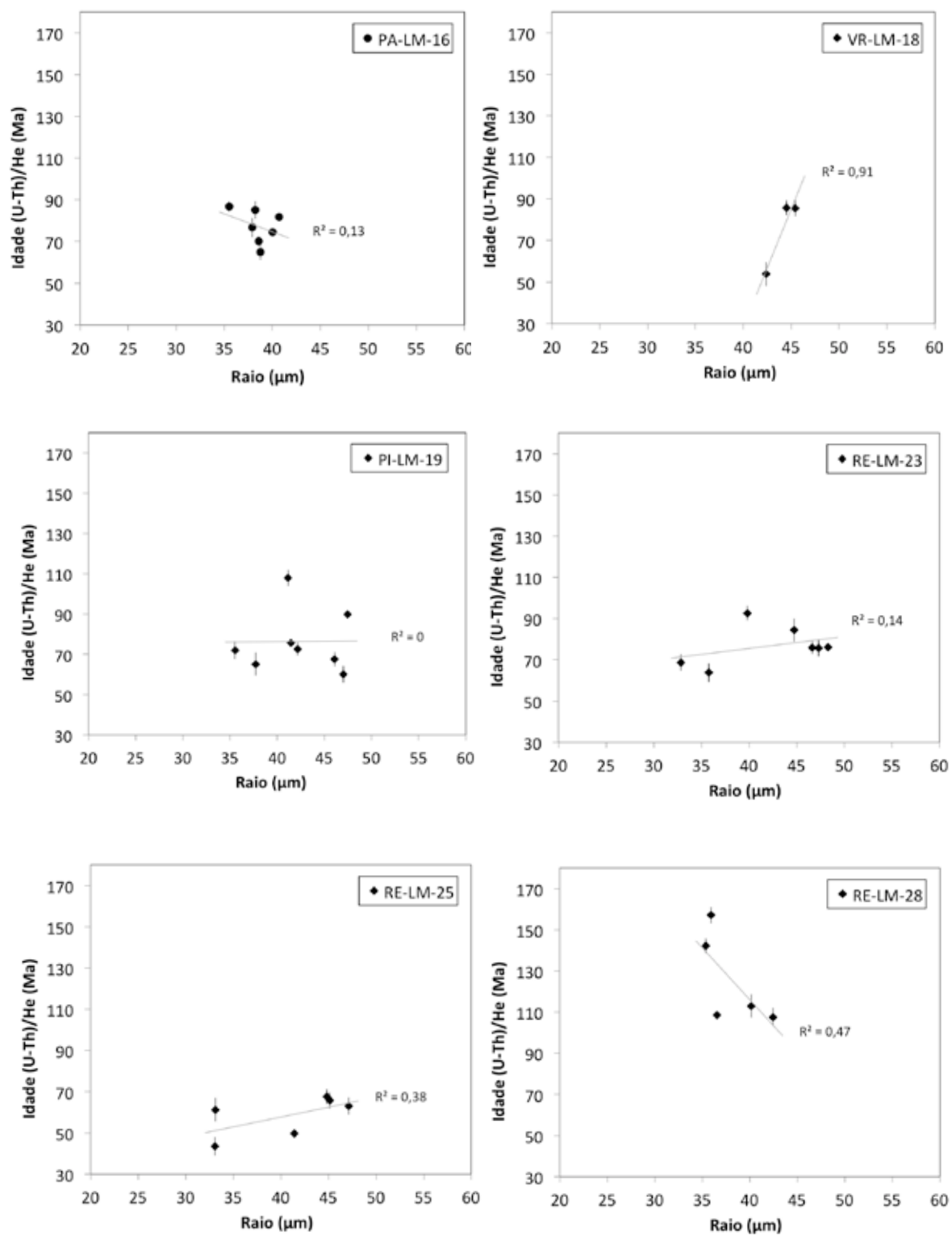
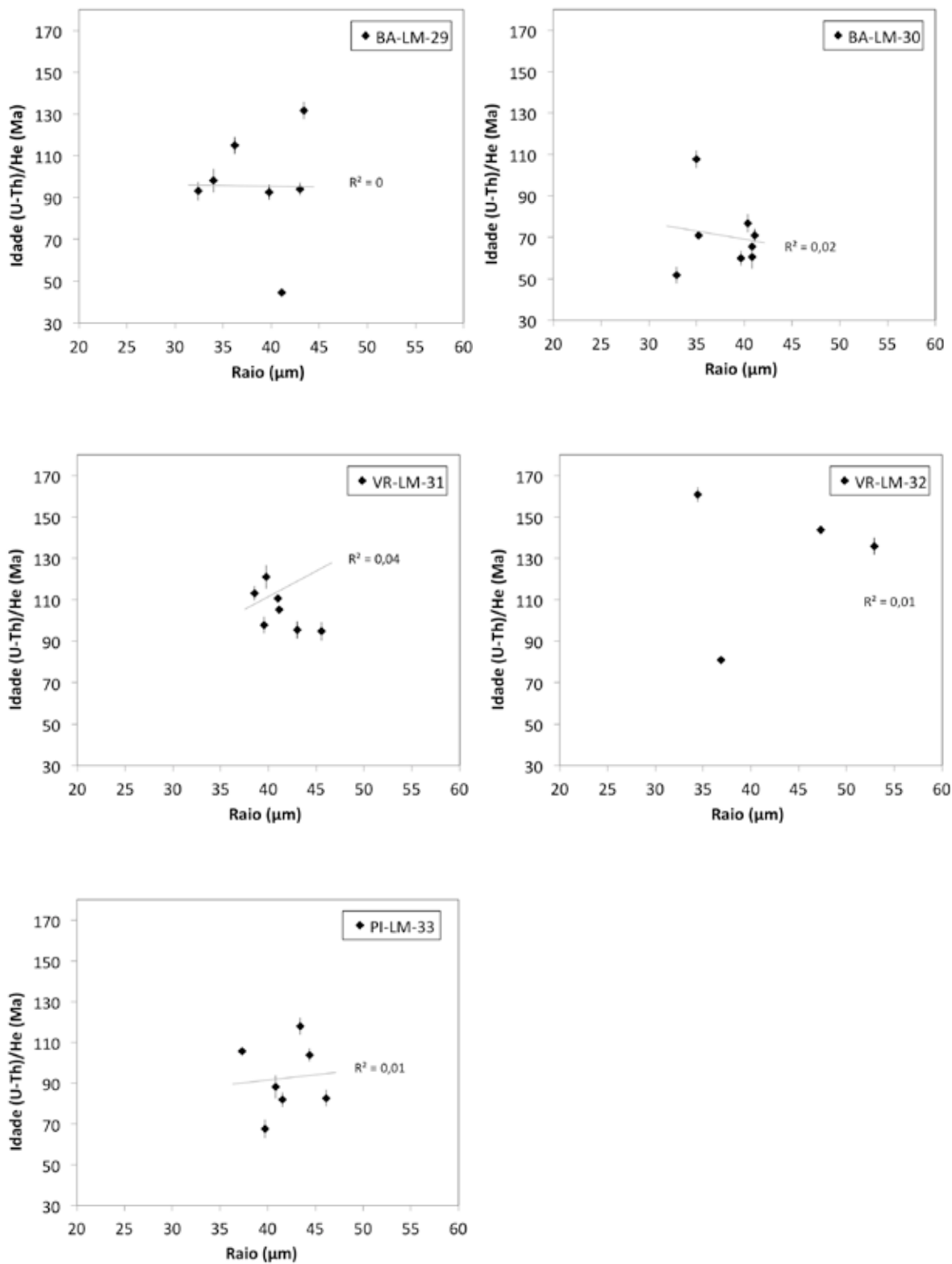


Figura 63 - Gráficos Idade x Raio individual por amostra (BA-LM-29, BA-LM-30, VR-LM-31, VR-LM-32 e PI-LM-33) com todas as idades obtidas (Idades corrigidas = Idades  $F_t$ ).





Os cristais a002 e a006 da amostra RE-LM-25 apresentam medidas de raio que são as menores da alíquota (33,1  $\mu\text{m}$ ), entretanto as idades corrigidas correspondentes são  $61,2 \pm 2,0$  Ma ( $2 \sigma$ ) e  $43,5 \pm 1,9$  Ma ( $2 \sigma$ ), respectivamente. A idade mais jovem da amostra RE-LM-25 (a006) também representa a idade mais jovem do conjunto total de dados da pesquisa, considerando-se apenas as idades corrigidas. Os dados obtidos para essa amostra não parecem indicar a influência da perda de He radiogênico associada ao tamanho do cristal, já que a segunda idade mais jovem obtida para a amostra RE-LM-25 (a005), com raio de 41,4  $\mu\text{m}$ , resultou em  $49,7 \pm 1,7$  Ma ( $2 \sigma$ ). Essas idades mais jovens indicam a possibilidade de outras interpretações para a história térmica dessa amostra a partir da perda total e parcial do  $^4\text{He}$  por difusão em cada um desses cristais e oferece significativa consistência para a discussão dessas idades, o que será discutido posteriormente.

Reconhece-se que uma fração da perda de He é atribuída ao tamanho do cristal sendo os cristais maiores os que apresentam maior capacidade de retenção do He radiogênico (REINERS e FARLEY, 2001), resultando em idades mais velhas. Um outro aspecto é o da influência da perda de partículas alfa nos cristais com dimensões menores e que poderiam resultar na subestimação das idades (FARLEY et al., 1996; STOCKLI et al., 2003). Os cristais menores demandam uma correção maior para ejeção de partículas alfa (Farley et al., 1996).

Algumas amostras indicam a possibilidade de perda de partículas alfa ( $\alpha$ ) por ejeção, resultando em idades mais jovens como, por exemplo, as amostras: a) PA-LM-12 a002, que é a amostra que possui o menor raio (30,2  $\mu\text{m}$ ); b) BA-LM-30 a002, com a menor concentração de He da alíquota e do conjunto dos dados; c) PI-LM-33 a005, que apresenta o menor raio da alíquota, assim como a mais baixa concentração de He.

Com exceção do cristal da amostra PA-LM-12 aqui discutidos, todos os outros cristais foram excluídos do cálculo das idades médias das respectivas amostras para não interferir nos resultados. Farley et al. (1996) observam que há perda de partículas alfa mesmo em cristais com raio maior que 250  $\mu\text{m}$  já que as partículas podem se deslocar por uma distância que varia entre 10-30  $\mu\text{m}$  (com média de 20  $\mu\text{m}$ ), dependendo da energia associada ao decaimento e a densidade e composição do meio. Cristais com raio menor que 30  $\mu\text{m}$  podem sofrer perdas significativas, que podem exceder 50%, o que limita a precisão do método nesses casos.

A consideração sobre o tamanho do cristal, forma e aspectos de zonamento é extremamente relevante na medida em que podem ser responsáveis por variações significativas nas idades, observadas com erros de  $\sim 30\%$ , mas que podem ser ainda maiores quando se considera uma correção de emissão de partículas alfa baseada na premissa de

distribuição homogênea de U e Th (HOURIGAN et al., 2005). Wang et al. (2012) discutem a ocorrência de duas idades muito jovens entre as amostras analisadas no planalto do Tibet e observam que também podem estar vinculadas à presença de fraturas internas no cristal que atuam como caminhos preferenciais para a perda de He, já que um dos grãos possui uma concentração reduzida, como também discutido por Fitzgerald et al. (2006).

Uma avaliação relevante é que a maior parte das idades obtidas não indica correlação com o tamanho do cristal o que indica, principalmente, a importância de uma seleção de cristais que tenham dimensões dentro de um intervalo restrito. A história térmica influenciará ainda mais na variação das idades em amostras que tenham longo tempo de residência na Zona de Retenção Parcial do He, especialmente em cristais com tamanho que varia entre ~30-90  $\mu\text{m}$  (REINERS e FARLEY, 2001).

Outros efeitos podem ser mais efetivos do que o tamanho do cristal como causador de dispersão nas idades como, por exemplo, os danos da radiação (*radiation damage*), que influenciam diretamente a concentração efetiva de urânio (eU) e tornam o efeito do tamanho do cristal menos relevante quando comparado ao efeito de eU (Flowers et al., 2009), como poderá ser observado mais adiante. Contudo, a seleção de cristais com uma restrição de tamanho pode ser fundamental para o sucesso de análises (U-Th)/He.

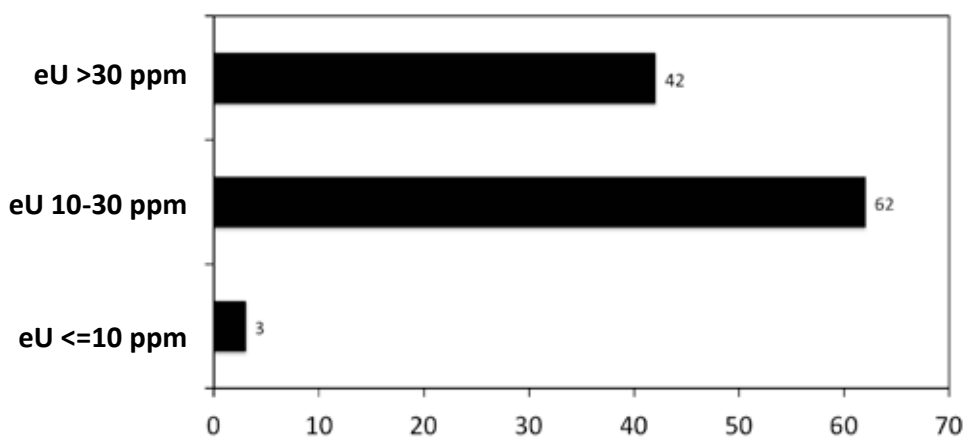
### 5.3.2 Danos da Radiação e relação com a concentração efetiva de urânio (eU)

O *Radiation Damage Accumulation and Annealing Model* (RDAAM) (FLOWERS et al., 2009) baseia-se na premissa de que a relação entre a idade AHe e a concentração de urânio efetiva (eU) que ocorre numa amostra é dependente da história térmica à qual a amostra foi submetida. A utilização desse modelo é fundamental para a interpretação dos dados na medida em que pode ajudar a explicar dados "enigmáticos" nos quais os dados de (U-Th)/He são mais antigos que os de traços de fissão ou que outras referências geológicas na área (FLOWERS et al., 2009).

Neste trabalho, as concentrações eU nas amostras variam entre 2,73 ppm e 111,78 ppm e as de tório estão entre 0,17 ppm e 52,32 ppm. Os resultados de concentração efetiva de urânio (eU) variam entre 4,1 ppm e 119,5 ppm e foram agrupados em três classes de concentração, com base em discussões que consideram valores de eU abaixo de 8 ppm como valores baixos e acima de 30 ppm como altos (GREEN et al., 2006). Alguns autores

consideram valores abaixo ou igual a 34 ppm como concentrações entre baixa e moderada (FLOWERS et al., 2011). Flowers et al. (2009) observaram dispersão significativa de idades a partir de uma concentração de eU acima de 55 ppm. Green et al. (2006) consideram a apatita "típica" de embasamento com concentração de urânio e tório entre 10 e ~30 ppm. Desta forma, as classes definidas foram eU baixa ( $\leq 10$  ppm), eU baixa a moderada (10-30 ppm) e eU alta  $\geq 30$  ppm (Figura 64), com 3, 62 e 42 cristais de apatita em cada grupo, respectivamente. Embora não esteja ilustrado nesse gráfico, uma análise mais detalhada permite constatar que na classe com alta concentração de urânio ( $\geq 30$  ppm) existem 16 cristais que apresentam eU que excede 50 ppm.

Figura 64 - Distribuição do total de cristais analisados considerando a concentração efetiva de urânio (eU): eU  $\leq 10$  (baixa), eU 10-30 (moderada) e eU  $\geq 30$  (alta) (Total de amostras = 107).



Existe correlação positiva entre a idade e a concentração efetiva de urânio (eU) para algumas amostras, embora outras não indiquem tal correlação (Figura 65). Flowers et al. (2009) confirmam a hipótese de que em condição de taxa de resfriamento lento, as apatitas caracterizadas por maior distribuição de eU apresentam uma correlação positiva entre idade AHe e eU, o que levanta a discussão sobre a possibilidade de resfriamento rápido para algumas amostras, já que a concentração eU é moderada para 62 cristais no total de 107 amostras analisadas.

A amostra VR-LM-18 ilustra essa relação. Com apenas três cristais na alíquota, resultou numa média consistente de  $85,6 \pm 0,2$  Ma ( $2 \sigma$ ). A amostra está situada no contexto da Serra

do Mar, numa extremidade do Planalto Isolado da Bocaina 3 (Serra da Carioca), definido por Hiruma (2007) e Hiruma et al. (2010), embora fora dos limites estabelecidos pelo autor para esse planalto isolado. As idades de traços de fissão obtidas pelos autores para a amostra com altitude de 1192 metros é de  $72 \pm 10$  Ma (idade média) e  $55,9 \pm 15,1$  Ma (idade central), com dispersão de 54,3%. A diferença também pode ser analisada com base no mesmo argumento apresentado pelo autor para justificar a diferença dessa idade com relação a outros dados obtidos em seu trabalho. O autor considera que a evolução tectonotermal complexa, associada às reativações ao longo do Cenozoico, seria responsável pela grande variação de idades em um mesmo planalto isolado (HIRUMA, 2007).

Figura 65 - Gráfico de correlação Idade x Concentração efetiva de urânio (eU) para todas as idades corrigidas (Erro =  $2\sigma$ )

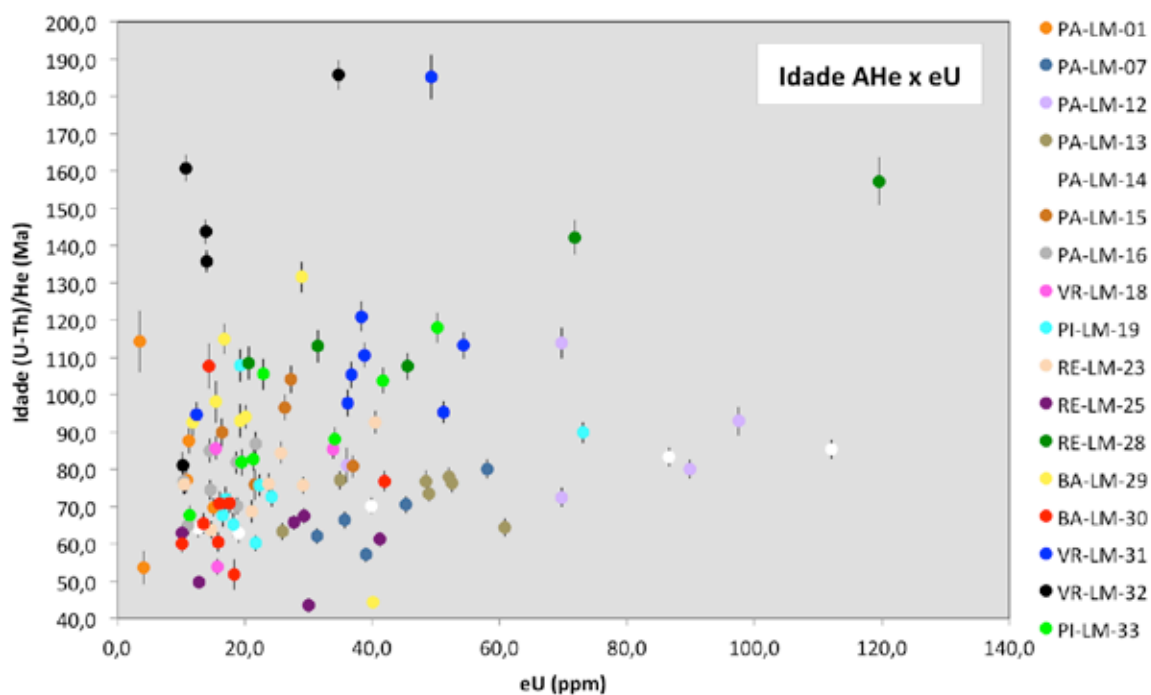


Figura 66 - Gráficos Relação Idade (U-Th)/He - Concentração Efetiva de urânio (eU) (Erro =  $2\sigma$ ) - Amostras: PA-LM-01, PA-LM-07, PA-LM-12, PA-LM-13, PA-LM-14, PA-LM-15, PA-LM-16 e VR-LM-18.

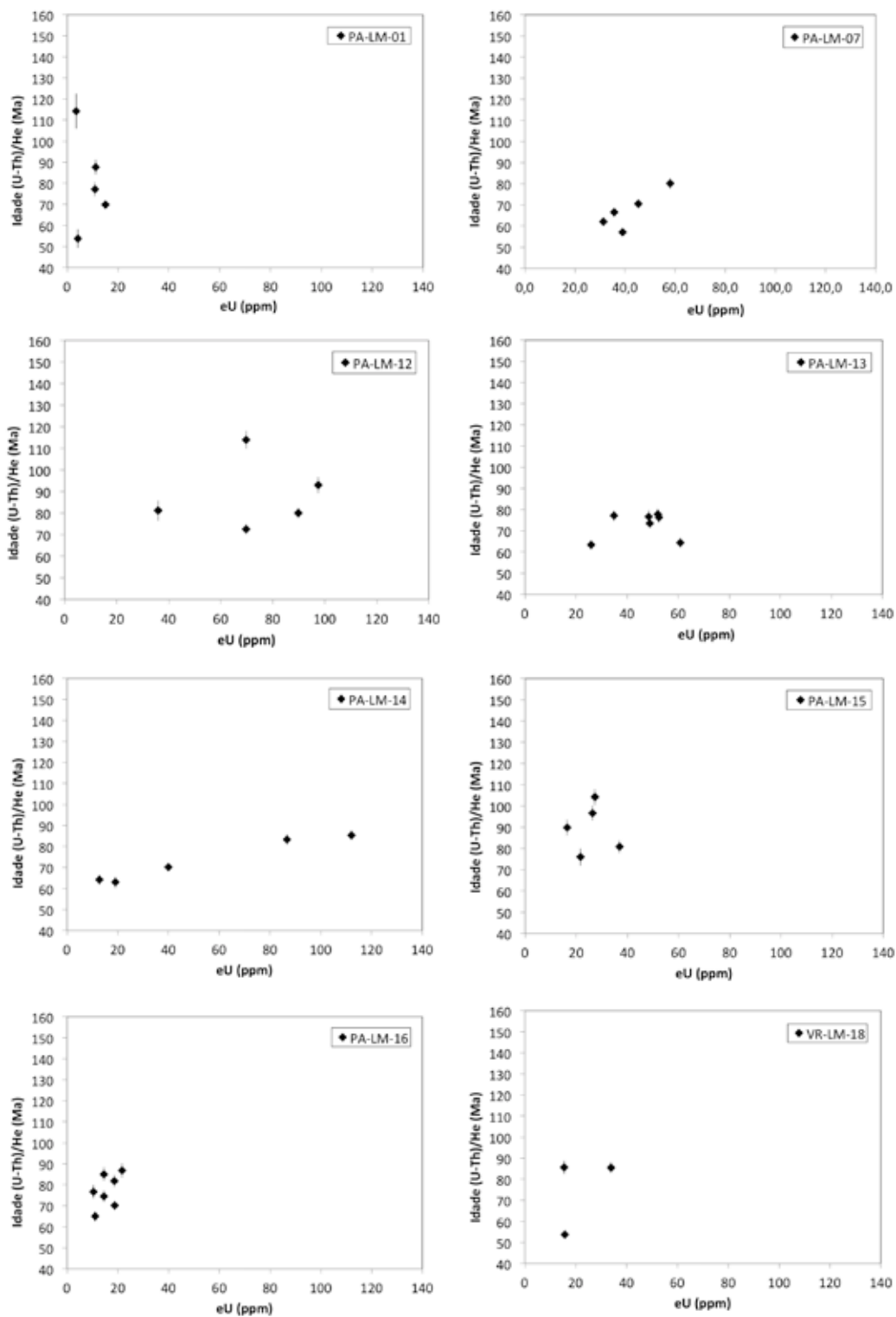
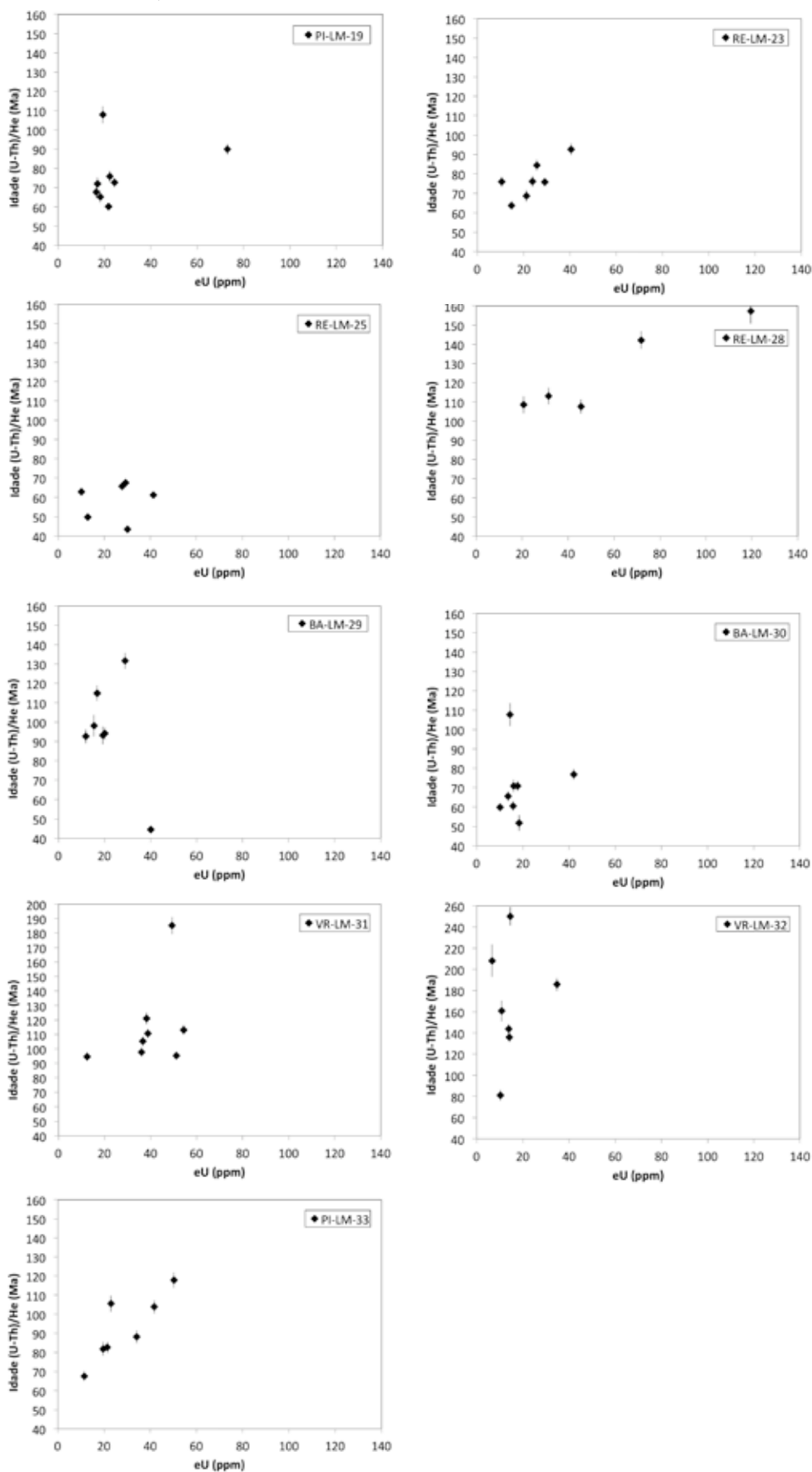


Figura 67 - Gráficos Relação Idade (U-Th)/He - Concentração Efetiva de urânio (eU) (Erro = 2σ) - Amostras PI-LM-19, RE-LM-23, RE-LM-25, BA-LM-29, BA-LM-30, VR-LM-31, VR-LM-32 e PI-LM-33.



Os cristais com concentrações eU mais elevadas estão nas amostras PA-LM-14 a001 (eU = 112,1 ppm) e amostra RE-LM-28 a002 (eU = 119,5 ppm). As concentrações de  $^{238}\text{U}$  dessas amostras também são elevadas, 106,28 ppm e 111,78 ppm, respectivamente, o que justifica os valores de concentração eU. Consequentemente, as idades desses cristais são as mais antigas entre as alíquotas analisadas das respectivas amostras (Anexo B). Na amostra RE-LM-28, a idade com a mais alta concentração eU entre todas as amostras analisadas para a pesquisa (119,5 ppm) resultou numa idade de  $157,2 \pm 6,5$  Ma, indicando a possibilidade de interferências nesse resultado.

Numa situação distinta, a amostra RE-LM-25 a006, discutida anteriormente no que se refere ao tamanho do cristal, apresenta a idade mais jovem ( $43,5 \pm 1,9$  Ma) com uma concentração eU de 30,0 ppm. Essa é a segunda mais alta concentração entre as alíquotas dessa amostra, o que corrobora ainda mais para a discussão sobre a relevância dessa idade. As outras idades são consistentes entre si e definiram a média de  $64,4 \pm 5,7$  Ma ( $2\sigma$ ).

A amostra PA-LM-01 apresenta análises para 5 cristais com uma média de idade de 78,2 Ma. Nesse caso não se observa uma correlação idade-eU positiva, resultando numa interpretação direcionada para a influência de outros fatores que contribuíram para a dispersão dos dados. É interessante notar que as concentrações de eU para todos os cristais são significativamente baixas. Talvez a análise de mais cristais pudesse oferecer outra interpretação, entretanto não foi possível incluir mais análises no conjunto dessa amostra. Essa dispersão também pode estar relacionada com a sua localização, adjacente à falha de borda do gráben do Rio Santana (Gontijo-Pascutti et al., 2010). A permeabilidade da estrutura das rochas, permitindo a influência de fluídos pode ser fator importante na dispersão de idades observada nessa amostra.

Observa-se a influência da concentração eU na dispersão das idades da amostra PA-LM-14. As concentrações mais altas (112,1 ppm e 86,6 ppm) resultam nas idades mais antigas (85,4 e 83,3 Ma).

Outras situações de dispersão nas idades das alíquotas também podem ser indicativos de efeitos dos danos da radiação durante a história tectono-termal das amostras, mas representam casos isolados numa determinada amostra. A amostra **RE-LM-23**, por exemplo, apresenta o cristal a003 com idade de  $92,6 \pm 3,1$  Ma ( $2\sigma$ ) e eU de 40,5 ppm.

Enquanto na amostra PA-LM-07 o cristal com maior concentração eU (58,1 ppm) pode ser responsável pela idade mais antiga, na amostra PA-LM-12 isso não ocorre, o que indica que outros fatores podem ser responsáveis pelas idades mais antigas nessa amostra.

Observa-se uma consistência expressiva nas idades da amostra PA-LM-13, com idade média de  $76,3 \pm 3,4$  Ma ( $2 \sigma$ ). As idades excluídas do cálculo da média também mostram consistência entre si ( $63,3 \pm 2,3$  Ma e  $64,4 \pm 2,5$  Ma) e podem indicar, alternativamente, o registro de um evento mais recente. A concentração de eU para o cristal a002, que resultou na idade mais jovem, é o mais baixo da amostra (25,9 ppm). Já o cristal a007, embora apresente a maior concentração de eU, resultou em idade consistente com a do cristal a002, o que também ratifica a consistência das idades.

Na amostra PI-LM-15, a idade mais antiga não é a que apresenta maior concentração eU, assim como ocorre na amostra PI-LM-19, na qual a idade do cristal a002 é de  $107,9 \pm 4,4$  Ma ( $2 \sigma$ ) e apresenta eU de 19,3 ppm. Por outro lado, o cristal a004, com idade de  $89,9 \pm 2,8$  Ma ( $2 \sigma$ ) possui eU de 73,1 ppm.

Algumas amostras mostram consistência significativa entre idades de cristais das alíquotas. Na amostra VR-LM-18, apenas três cristais foram datados, entretanto a consistência entre duas idades é marcante, com  $85,5 \pm 2,5$  Ma ( $2 \sigma$ ) e  $85,7 \pm 3,2$  Ma ( $2 \sigma$ ). A idade mais jovem é de  $53,8 \pm 2,3$  Ma ( $2 \sigma$ ) e foi excluída para o cálculo da média.

Outros fatores merecem atenção na interpretação da dispersão das idades, como observado em algumas amostras. Na amostra **BA-LM-30**, por exemplo, a idade mais antiga ( $107,7 \pm 6,0$  Ma) não está vinculada à alta concentração de eU, como observado em alíquota da mesma amostra. A amostra **PI-LM-33**, embora a dispersão seja evidente, apresenta idades consistentes entre si, considerando-se grupos de idades.

A dispersão na amostra **VR-LM-32** é a mais expressiva e, portanto, foi considerado apenas um cristal para representá-la, entretanto não oferece confiabilidade para a interpretação dessa amostra. No geral, as idades dessa amostra são muito antigas e podem estar associadas com uma diversidade de fatores como será discutido a seguir.

### 5.3.3 Considerações sobre a dispersão de idades

A dispersão de idades, muitas vezes, não pode ser justificada apenas por variação no tamanho dos cristais ou presença de inclusões (FITZGERALD et al., 2006), embora as inclusões sejam reconhecidamente responsáveis por idades (U-Th)/He erradas (VERMEESCH et al., 2007). Alguns casos observados podem estar associados a outros efeitos, além dos que são causados pelos danos da radiação.



O zonamento gerado por isótopos pais nos cristais é um outro efeito possivelmente responsável pela dispersão nas idades (BOYCE e HODGES, 2005). Muitas amostras analisadas nessa pesquisa mostraram consistência na replicabilidade das análises, mas algumas variações observadas podem estar associadas a tal efeito. O zoneamento de U e Th nos cristais não foi analisado mas é um fator fundamental causador de dispersão nas idades e que tem recebido atenção cada vez maior na interpretação das variações observadas e deverá ser considerado em pesquisas futuras. Considerando-se duas zonas adjacentes de um cristal, o decaimento radioativo produzirá uma maior concentração de  $^4\text{He}$  na zona com mais U e Th do que na zona que possui concentração menor desses isótopos e, posteriormente, ocorre a redistribuição do  $^4\text{He}$  entre as zonas do cristal promovida pelo processo de difusão e/ou pela ejeção de partículas alfa, resultando na inversão da situação inicial, com maior concentração de  $^4\text{He}$  na zona com baixo U e Th e vice-versa. Esse processo se reflete em idades mais antigas em zonas com baixa concentração de U e Th ou idades mais jovens em zona com alta concentração, o que seria uma condição que indica anomalia e destaca a importância da análise do zonamento e redistribuição, principalmente em situações de resfriamento lento, já que o resfriamento rápido após a cristalização parece tornar o problema desprezível (BOYCE e HODGES, 2005). A ocorrência de cristais zonados, com decréscimo da concentração de He do centro para a borda do cristal, é consistente com a retenção na Zona de Retenção Parcial por um longo período (REINERS e FARLEY, 2001).

As alíquotas de um mineral podem apresentar diferenças relacionadas à dimensão do cristal, à composição, aos danos de radiação, além de outras propriedades que são variações naturais e oferecem, assim, informações que não se limitam a uma idade única e temperatura. Essas diferenças podem resultar em distintas taxas de perda dos produtos do decaimento e, conseqüentemente, são importantes nas análises dos padrões de tempo-Temperatura (t-T) para a interpretação das histórias térmicas (REINERS e SHUSTER, 2009). Enfim, a variabilidade nas idades também pode ser analisada numa perspectiva positiva, especialmente quando se tem como objetivo a análise das histórias térmicas das amostras.

A difusividade do He na apatita pode ser influenciada por fatores como a temperatura, a sensibilidade da difusão com relação ao tamanho do cristal, danos da radiação, velocidade na taxa de resfriamento, combinada aos efeitos dos danos da radiação acumulados que, por sua vez, influenciam significativamente a temperatura de fechamento, assim como os efeitos do zoneamento (FLOWERS e KELLEY, 2011). A dispersão causada por variações na composição do mineral também pode ser fator relevante (REINERS e FARLEY, 2001) por influenciar na difusividade.

As condições gerais de forma, claridade e tamanho dos cristais analisados nesta pesquisa são consideradas muito boas. No entanto, micro-inclusões que não foram identificadas na seleção dos cristais também podem ser responsáveis por variações nas idades AHe. Wang et al. (2012) observam que a presença de microinclusões pode não representar um problema tão significativo, mas apatitas com concentrações baixas de U e Th, especialmente com inclusões de alguns minerais como zircão, monazita, xenotima, torita e uranita, podem ter um enriquecimento desses elementos na ordem de magnitude estimada em 3-4 vezes, o que torna-se significativo para a alteração da idade do cristal. Associada à ocorrência de implantação originada pela emissão de partículas de minerais situados próximos (FARLEY, 2000) e zoneamento (FARLEY et al., 2011), os efeitos da presença de microinclusões são exacerbados (WANG et al., 2012).

Os resultados aqui apresentados confirmam a importância da análise de diferentes alíquotas de uma mesma amostra para avaliar a consistência dos dados obtidos e a influência de possíveis problemas. As amostras que apresentam um maior número de resultados e uma média calculada com base em, no mínimo, três cristais com idades próximas oferecem uma relativa consistência para a análise dos resultados obtidos. A maior parte das idades médias foi calculada com resultados de quatro ou mais cristais (11 amostras no total de 17, considerando-se a exclusão da amostra CA-LM-05 para a qual não foi calculada uma média).

Deve-se ressaltar, ainda, que os danos da radiação e sua influência na dispersão de idades, podem ser mascarados ou potencializados pelos efeitos causados pelo zoneamento de U e Th (FARLEY et al., 2011) e pelo tamanho dos cristais, que podem introduzir uma dispersão adicional nas idades (FLOWERS et al., 2011). Numa situação em que a influência de diferentes fatores é significativa, especialmente os danos de radiação, a concepção de uma única "idade AHe verdadeira" é irrelevante e todas as idades tornam-se válidas, como bem destacado por Peyton (2009).

#### **5.4 Distribuição cronológica dos dados AHe**

Foi possível definir grupos de idades/eventos a partir dos dados de termocronologia (U-Th)/He em apatita. Os histogramas apresentados a seguir foram gerados com o objetivo de analisar a distribuição geral dos dados e estão organizados em intervalos de idades baseados na Tabela Estratigráfica Internacional (ICS, 2012). Inicialmente, o conjunto total de idades foi

utilizado e, em seguida, efetuou-se a seleção de cristais de forma a "excluir" idades anômalas e definir a idade média por amostra. A partir desse procedimento foram definidos os grupos de idades que compreendem:

- **Eocretáceo**, com um total de 20 cristais, quando o total dos dados foi considerado (107 cristais) (Figura 68), com redução para 7 cristais quando foi feita a seleção de idades, com exclusão de idades anômalas (Figura 70).

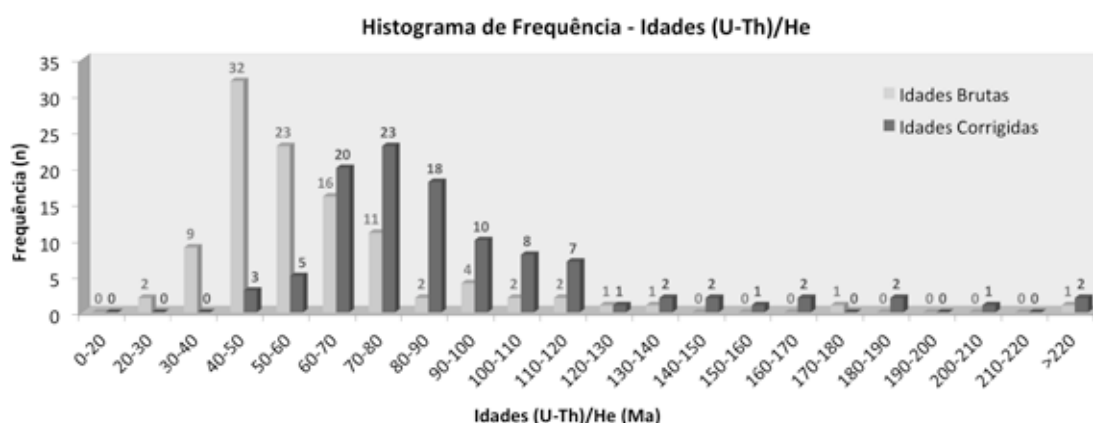
- **Neocretáceo**, com 57 cristais a partir do total de dados analisados (107 cristais) (Figura 69) e com redução para 52 a partir da seleção de idades (Figura 70), com destaque para o período final, entre 86,3 Ma e 66,0 Ma, que apresenta um maior número de idades AHe (42). O maior destaque é o do Andar Campaniano (72,1 -83,6 Ma), com 24 cristais com idades nesse estágio (Figura 73). Os registros do Maastrichtiano e Santoniano também estão presentes, embora com menor destaque.

- **Paleogeno**, com um grupo de idades com 22 cristais no total de 107 cristais, no intervalo Eoceno-Paleoceno (Figura 69), a amostragem foi reduzida para 13 cristais restritos ao Paleoceno quando as idades dispersas foram excluídas (Figura 70).

A distribuição das idades será apresentada a seguir:

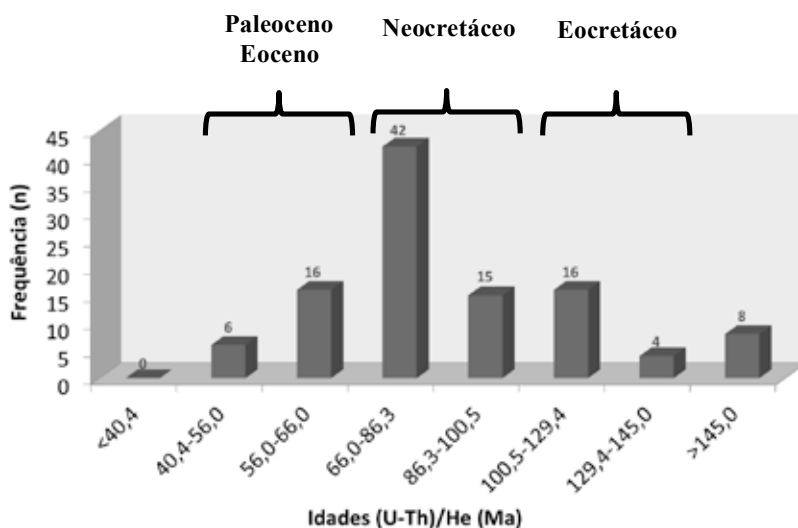
1) Idades brutas e idades corrigidas pelo fator  $F_T$ , considerando o total de dados obtidos (107 cristais), mesmo os que indicavam dispersão (Figura 68).

Figura 68 - Histograma de frequência para idades (U-Th)/He brutas e das idades corrigidas pelo fator  $F_T$ , com intervalos de 10 Ma (Total de cristais = 107).



## 2) Conjunto total de idades corrigidas agrupadas em intervalos (Figura 69).

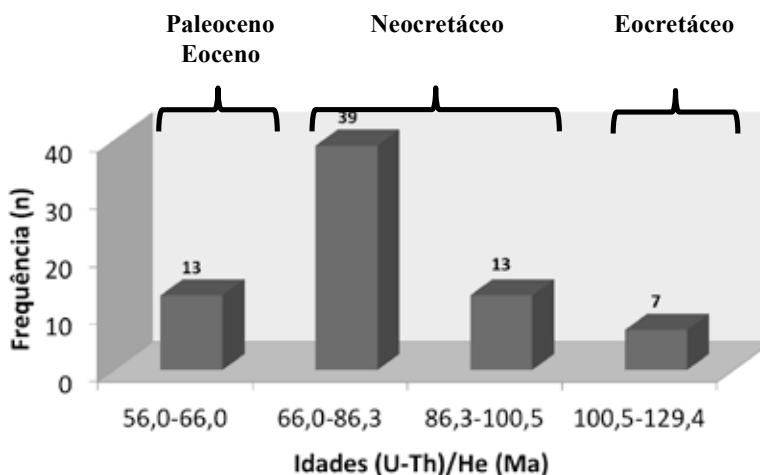
Figura 69 - Histograma de frequência para todas as idades (U-Th)/He corrigidas, com intervalos definidos de acordo com a Tabela Estratigráfica Internacional (ICS, 2012) (Total de cristais = 107).



Embora não definam grupos específicos, devido à dispersão dos dados, idades maiores que 145 Ma também foram registradas, compreendendo um total de 8 cristais quando se considera a totalidade dos dados (Figuras 68 e 69).

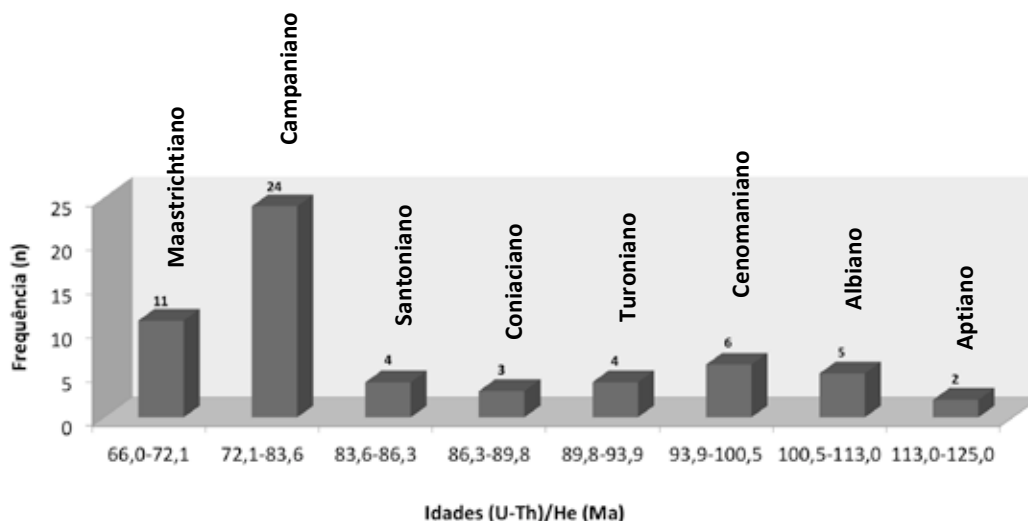
## 3) Seleção de idades na qual foram excluídas as idades muito antigas e/ou muito novas (72 idades selecionadas) (Figura 70).

Figura 70 - Histograma de frequência para as idades (U-Th)/He selecionadas (com exclusão das idades muito antigas e/ou muito novas) (Total de cristais = 72).



#### 4) Detalhamento das idades no intervalo do Período Cretáceo (145-66 Ma) (Figura 71).

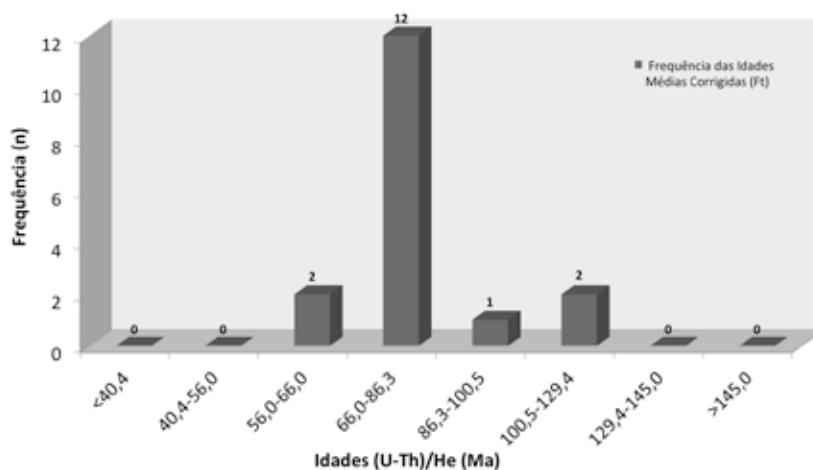
Figura 71 - Detalhamento da distribuição das idades do Cretáceo (145 - 66 Ma) (Total de amostras = 59).



#### 5) Detalhamento das idades médias para cada amostra (Figura 72).

A partir da definição das idades médias para cada amostra foi possível agrupá-las seguindo os mesmos critérios adotados anteriormente. Isso destacou ainda mais a importância dos registros correspondentes ao Neocretáceo no conjunto de resultados obtidos, em especial a fase final desse período (Figura 72). Observa-se que o erro associado é maior quando apenas as idades médias são analisadas.

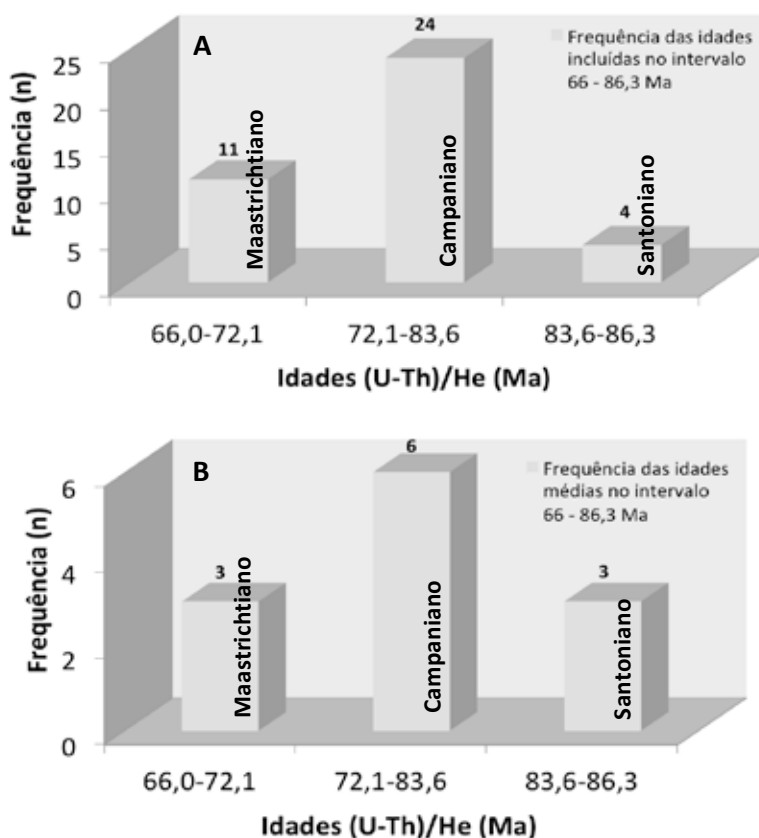
Figura 72 - Histograma de frequência para as idades (U-Th)/He médias corrigidas pelo fator  $F_T$ , com intervalos definidos de acordo com a Tabela Estratigráfica Internacional (ICS, 2012) (Total de amostras = 17).



## 6) Detalhamento do intervalo 86,3 a 66 Ma (Figura 73).

A análise da frequência de idades do intervalo entre 86,3 a 66 Ma, que é o de maior destaque quando analisados o conjunto de idades corrigidas, assim como as idades selecionadas e idades médias (Figuras 69, 70 e 72), permite identificar o intervalo de idades de maior ocorrência na área que está representado pelo intervalo entre 83,6 e 72,1 Ma (Campaniano), embora os outros registros também estejam presentes e sejam significativos (Figura 73).

Figura 73 - A) Histograma de frequência para as idades (U-Th)/He corrigidas selecionadas (Total de cristais = 39) e B) idades médias corrigidas por amostra (Total de amostras = 17). Intervalos com base na Tabela Estratigráfica Internacional (ICS, 2012).



### **5.5 Distribuição espacial dos dados AHe**

A distribuição das idades na área de estudos pode ser observada na Figura 74. Optou-se por apresentar as idades médias diretamente no mapa e localizar as amostras e idades obtidas por outros autores. As idades dessas amostras compiladas estão apresentadas na tabela que acompanha o mapa, com informações adicionais.





Tabela 3 - Tabela de referências do mapa de idades (Figura 74).

Amostra	Localização		Z	Idade	Método		Idade	Referências
G-50	556589	7516120	366	125.4±12	TFA	MDE	zeta	Galagher <i>et al.</i> , 1994
G-51	580162	7498302	396	67.2±3.0	TFA	MDE	zeta	Galagher <i>et al.</i> , 1994
G-52	555387	7468522	190	78.3±3.0	TFA	MDE	zeta	Galagher <i>et al.</i> , 1994
G-53	547382	7450836	30	64.5±3.0	TFA	MDE	zeta	Galagher <i>et al.</i> , 1994
G-54	545057	7444201	30	66.2±4.0	TFA	MDE	zeta	Galagher <i>et al.</i> , 1994
CBL-02	557682	7458434	15	60.7±3.4	TFA	MDE	zeta	Silva, 2006
CBL-284	552309	7461740	1592	84.9±3.4	TFA	MDE	zeta	Silva, 2006
RML-84	534935	7481828	2088	145.7±9.7	TFA	MDE	zeta	Silva, 2006
F-2	544430	7508400	460	58.5±2.8	TFA	MDE	zeta	Silva, 2006
VQ-54	668944	7466112		124±10	TFA			Fonseca & Poupeau, 1984
PE-48C	663568	7464357		85±5	TFA			Fonseca & Poupeau, 1984
ESO-233	674497	7458358		117±5	TFA			Fonseca & Poupeau, 1984
UB-1	498177	7411433	45	25,6 ± 1,4	TFA	MDE	central	Pinter, 2011
LD-2	577223	7471275	602	21,1 ± 1,4	TFA	MDE	central	Pinter, 2011
LD-1	585892	7478655	636	22,2 ± 1,8	TFA	MDE	central	Pinter, 2011
SBS-1	576590	7492962	645	29,8 ± 1,5	TFA	MDE	central	Pinter, 2011
IT-4	551051	7520610	670	25,5±1,4	TFA	MDE	central	Pinter, 2011
WT-8	475047	7686878	930	109 ± 8,1	TFA	MDE	central	Pinter, 2011
TF-685	*	*	98	62±26	TFA	MDE	corrigida	Ribeiro, 2007
TF-685	*	*		59	AHe	-	-	Ribeiro, 2007
TF-753	*	*	302	61±17	TFA	MDE	corrigida	Ribeiro, 2007
TF-755	*	*	661	73±15	TFA	MDE	corrigida	Ribeiro, 2007
TF-756	*	*	458	85±17	TFA	MDE	corrigida	Ribeiro, 2007
TF-758	*	*	73	61±6	TFA	MDE	corrigida	Ribeiro, 2007
Bra 850-2	*	*	396	67.2±3	TFA	MDE	zeta	Cogné <i>et al.</i> , 2011
Bra 850-2	*	*	396	77.8±3.2	AHe	-	-	Cogné <i>et al.</i> , 2011
Bra 850-3	*	*	396	75.3±3.2	AHe	-	-	Cogné <i>et al.</i> , 2011
Br24	*	*	*	?	AHe	-	-	Cogné <i>et al.</i> , 2012
Br25	*	*	*	?	AHe	-	-	Cogné <i>et al.</i> , 2012
BOC-94	*	*	1192	72±10	TFA	MDE	central	Hiruma <i>et al.</i> , 2010
BOC-100	*	*	1063	46±5	TFA	MDE	central	Hiruma <i>et al.</i> , 2010
BOC-152	*	*	1000	137±25	TFA	MDE	central	Hiruma <i>et al.</i> , 2010
BOC-197	*	*	456	72±8	TFA	MDE	central	Hiruma <i>et al.</i> , 2010

(\*) Amostra sem dados de localização publicados (Localização aproximada no mapa da figura 74)

(?) Os dados da amostra não constam na tabela principal do artigo e o material suplementar não está disponível (aguardando a divulgação do material suplementar).

(AHe) (U-Th)/He em apatita

(TFA) Traços de Fissão em Apatita

### 5.5.1 Perfil idade AHe x elevação

A análise de perfis verticais é uma estratégia muito útil nos estudos termocronológicos, principalmente na interpretação de processos superficiais (ENGLAND e MOLNAR, 1990; BRAUN, 2002ab; EHLERS e FARLEY, 2003). A análise de perfis idade-elevação, conhecidos como AER (*Age-elevation relationship*) (WAGNER e REIMER, 1972; PARRISH, 1983) também fornecem informações sobre a taxa de resfriamento, assim como o início do evento de denudação. O perfil de idade-elevação é caracterizado por um ponto de inflexão que indica, além do início da denudação na área, a posição da Zona de Retenção Parcial.

Os perfis foram elaborados considerando o total de amostras (cristais) analisados, o conjunto de dados selecionados, com exclusão de idades mais antigas e/ou mais jovens e as idades médias obtidas para cada amostra.

Os perfis idade-elevação da área de estudo apresentam correlação positiva, embora não seja muito expressiva quando o total de amostras foi considerado (Figura 75). A correlação positiva se aplica aos dados selecionados (Figuras 76 e 77) e torna-se mais evidente a partir da inclusão das idades médias (Figura 78). A mudança no padrão de resfriamento ocorre no nível topográfico de 500 metros, há 65 Ma, e é interpretada como o início do evento de denudação. Esse ponto também registra a localização da base da Zona de Retenção Parcial exumada do termocronômetro. Observa-se uma mudança no padrão de resfriamento de 19 m/Ma para 100 m/Ma quando ambos os segmentos são analisados.

Figura 75 - Correlação Idade (U-Th)/He x Elevação para todas as idades (erro = 2  $\sigma$ ).

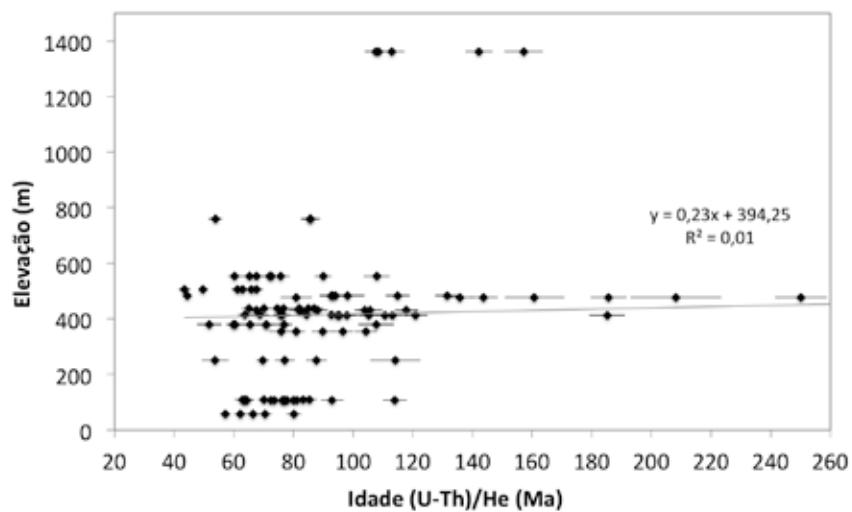


Figura 76 - Gráfico de correlação Idade (U-Th)/He x Elevação para amostras selecionadas (com exclusão de idades mais antigas e/ou mais jovens) (erro = 2  $\sigma$ ).

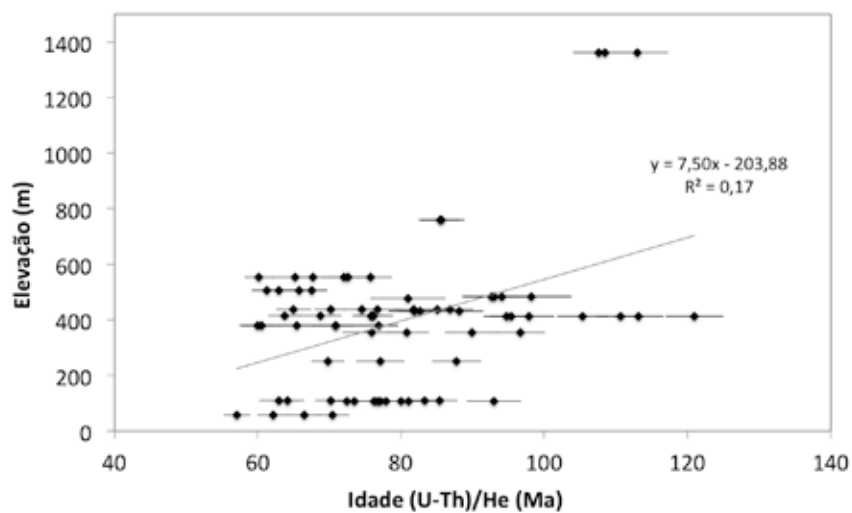


Figura 77 - Gráfico de correlação Idade (U-Th)/He x Elevação com identificação das amostras, com exclusão de idades mais antigas e/ou mais jovens (Ma) para cada amostra (erro = 2  $\sigma$ ).

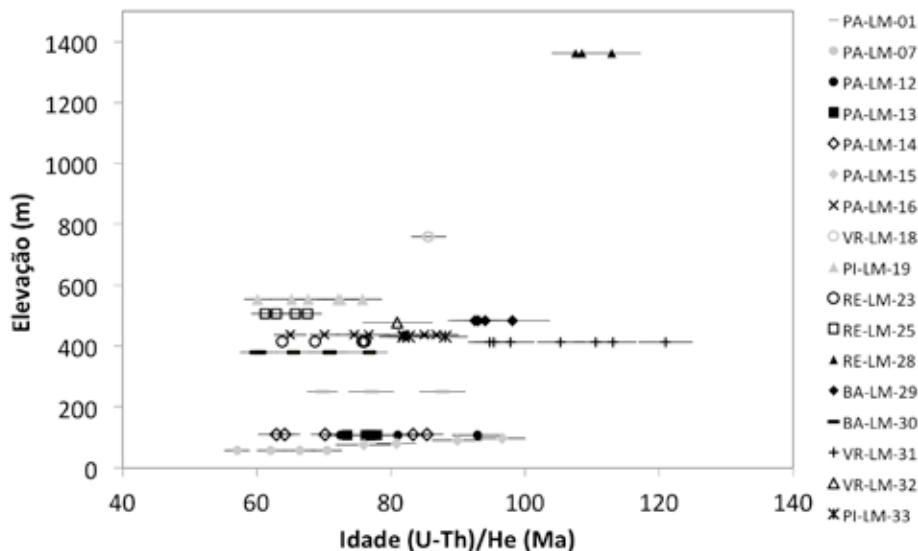
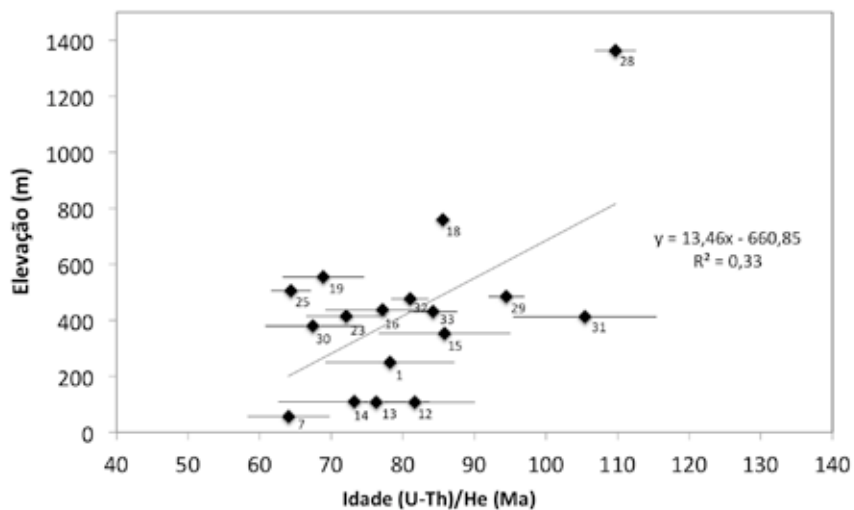


Figura 78 - Gráfico de correlação Idade (U-Th)/He x Elevação, considerando idades médias (Ma) para cada amostra (erro = 1  $\sigma$ ).



### 5.5.2 Relação entre idade AHe e distância da costa

Os perfis idade x distância da costa foram elaborados considerando-se a distância norte-sul da amostra em relação à linha de costa. Observando-se a orientação da costa nesse setor da região sudeste concluiu-se que essa orientação seria a mais adequada para executar a medição das distâncias.

A análise dos perfis indica uma correlação positiva entre aumento das idades da costa em direção ao interior (Figura 79) mas essa correlação é rompida por amostras com idades mais jovens em áreas do Planalto Atlântico, no gráben do Rio Paraíba do Sul e na escarpa da Serra da Mantiqueira (Figura 79), o que também podem ser observadas no perfil topográfico da área (Figura 82). Observa-se que várias rupturas ocorrem no perfil, associadas a idades mais jovens e que mostram-se mais evidentes quando a totalidade das idades corrigidas é apresentada (Figura 80). A correlação positiva é uma tendência em margens passivas e também é observada em várias regiões da margem continental brasileira em estudos termocronológicos (GALLAGHER et al., 1994; TELLO SAENZ et al., 2003; CARMO, 2004; MORAIS NETO, 2009; COGNÉ et al., 2011).

Figura 79 - Gráfico de correlação Idade (U-Th)/He x Distância da costa, considerando idades médias para cada amostra (Ma) (erro = 2  $\sigma$ ). Os números representam a identificação da amostra.

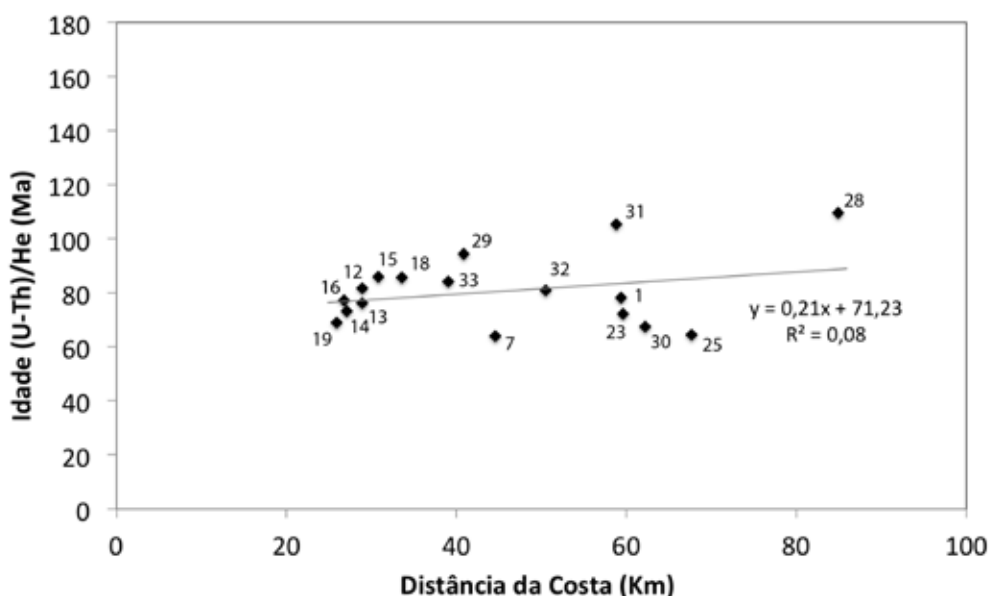


Figura 80 - Gráfico de correlação idade (U-Th)/He X distância da costa, considerando todas as idades corrigidas (Ma).

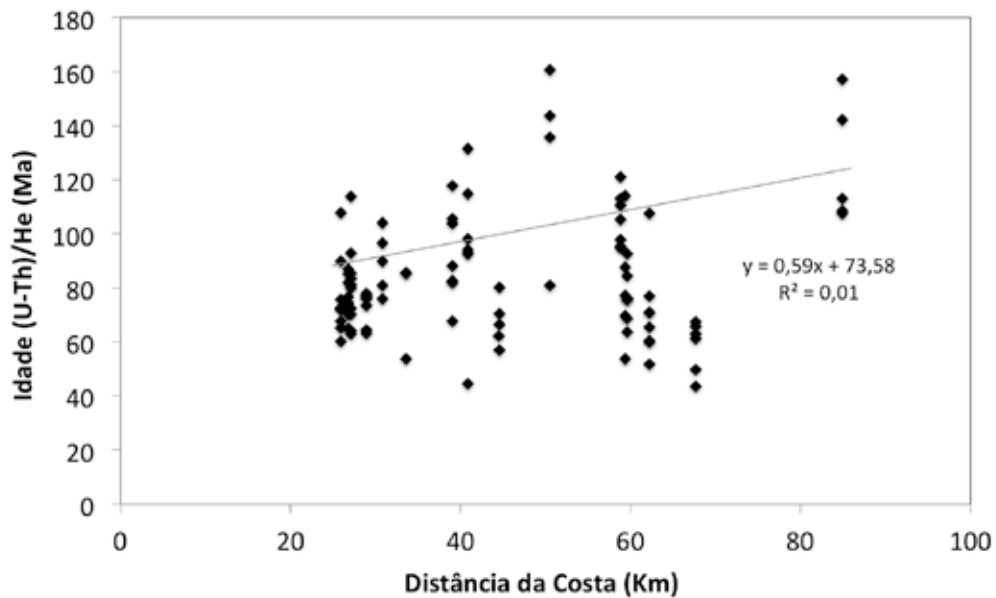


Figura 81 - Gráfico de correlação idade (U-Th)/He X distância da costa, considerando idades selecionadas (Ma).

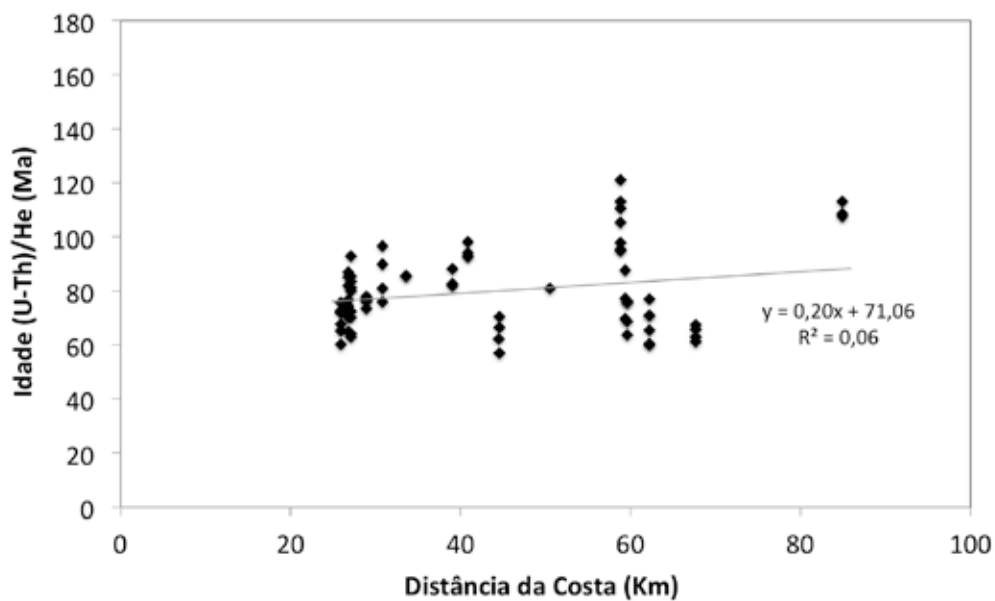
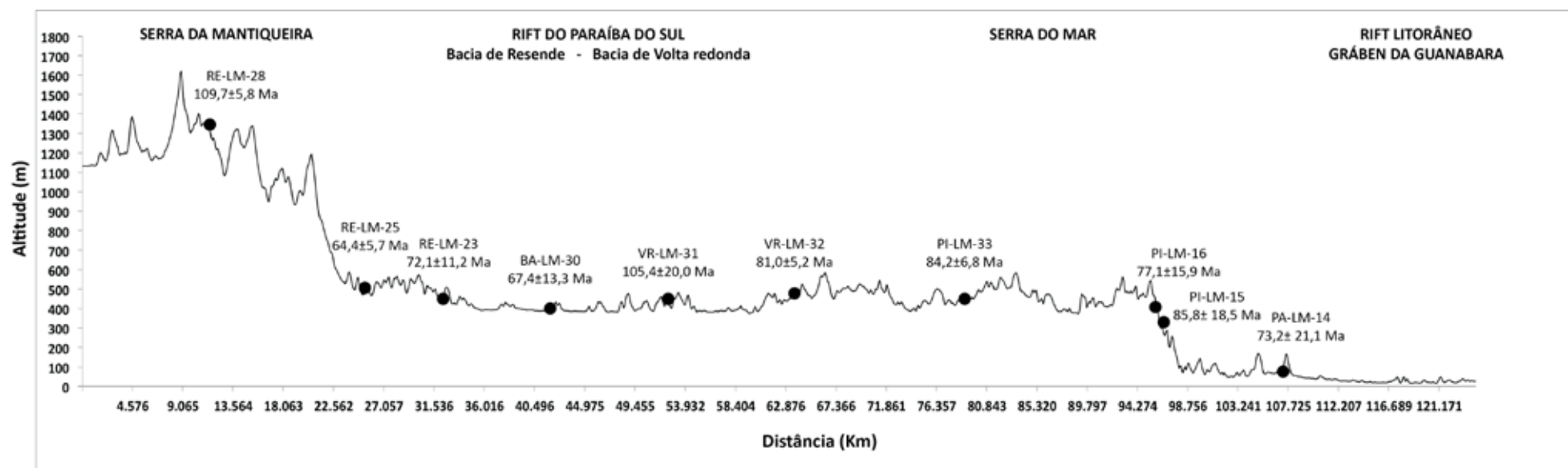


Figura 82 - Perfil topográfico da área de estudos no traçado de algumas amostras com idades médias e erro de  $2\sigma$ .



## 5.6 Modelagem das histórias térmicas a partir da termocronologia de baixa temperatura (U-Th)/He em apatita no contexto das reativações tectônicas do Mesozoico-Cenozoico

A partir da modelagem inversa das histórias térmicas com o programa HeFTy (KETCHAM, 2012) foi possível explorar ainda mais os dados obtidos pelo método (U-Th)/He em apatita. As variações nas idades e características de minerais de uma mesma amostra, tais como tamanho do cristal, composição, efeitos dos danos de radiação, além de outras propriedades que resultam em diferenças nas idades são importantes para a aplicação da técnica de modelagem das história térmica (REINERS e FARLEY, 2001; REINERS e SHUSTER, 2009).

A definição de estratégias é parte fundamental do processo de modelagem. Nesse sentido, foram consideradas as orientações de Ketcham (2000) e Ketcham et al. (2009), incluindo as que constam no manual do programa HeFTy (KETCHAM, 2012), de forma a buscar as melhores definições de parâmetros para a execução da modelagem.

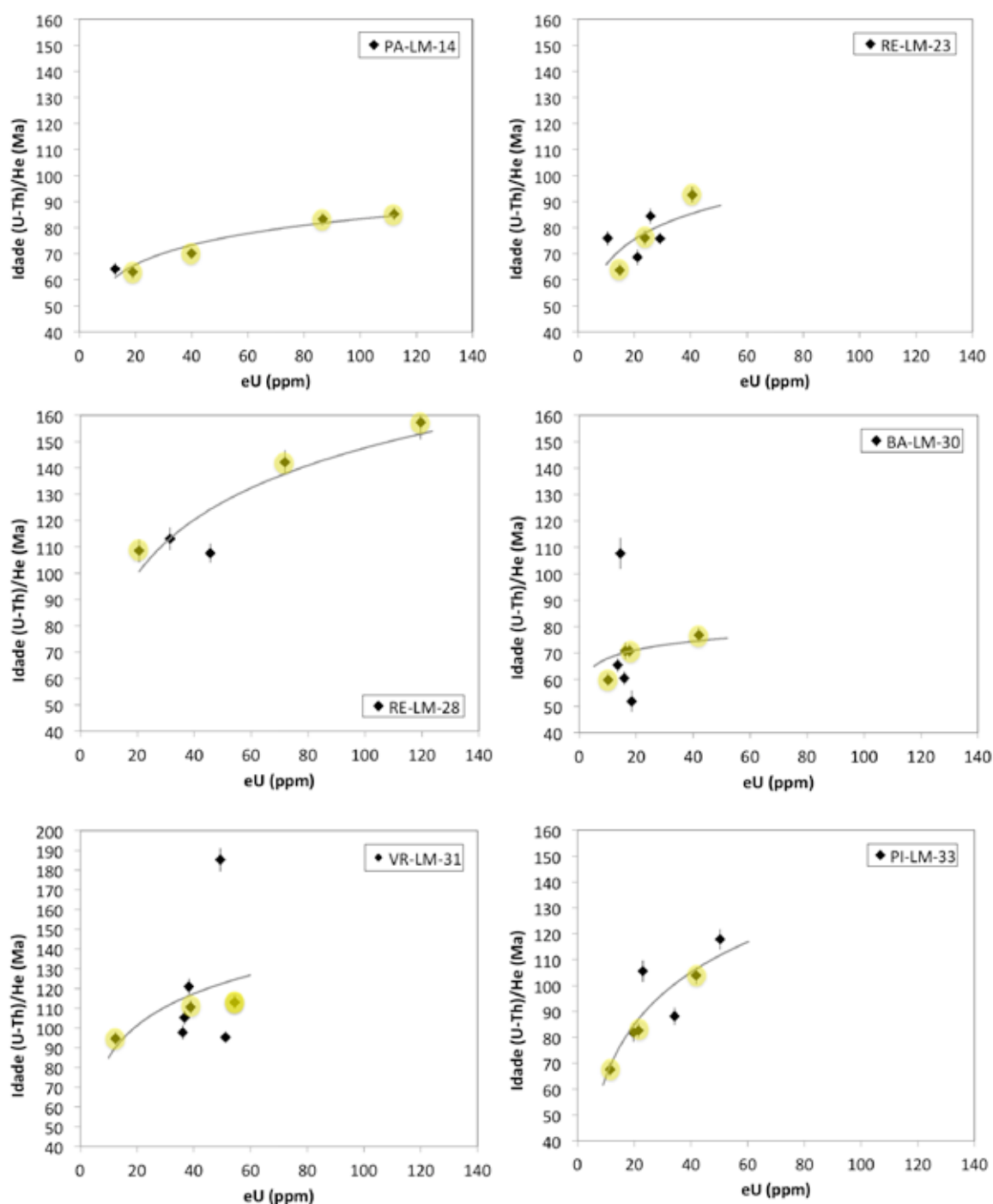
O modelo de difusão utilizado é o *Radiation Damage Accumulation and Annealing Model* (RDAAM) (FLOWERS et al., 2009) que é apropriado para áreas que apresentam uma história termal complexa e valores de concentração efetiva de urânio (eU) variável. O RDAAM baseia-se na premissa de que a relação entre a idade AHe e a concentração efetiva de urânio (eU) é dependente da história térmica a que a amostra foi submetida. A modelagem na forma inversa é uma estratégia para definir as possíveis histórias térmicas a partir da relação entre a idade e a concentração de urânio efetiva (eU) observada. A utilização de tal modelo visou uma interpretação mais acurada dos dados AHe, especialmente para amostras que, eventualmente, foram submetidas a um resfriamento moderado a lento (0.1-1.0°C/Ma), assim como uma residência prolongada na Zona de Retenção Parcial (ZRP) ou sob condições de temperatura que são apropriadas para a acumulação de danos de radiação seguido de reaquecimento e parcial perda de He (Flowers et al., 2009).

A seleção das amostras para a modelagem foi baseada, portanto, na análise da correlação de urânio efetivo (eU) para aplicação do modelo RDAAM. As amostras que indicam maior correlação entre idade e eU e menor correlação entre idade e raio são as mais apropriadas para a análise de padrões t-T (FLOWERS et al., 2009). A variação de idades com correlação positiva com a concentração efetiva de urânio pode apresentar um significado geológico importante já que há uma correlação direta com a história térmica e que não seria possível observar se a distribuição de idades fosse uniforme (FLOWERS et al. 2007). As



amostras que se enquadraram nos critérios de seleção para serem modeladas foram: PA-LM-14, RE-LM-23, RE-LM-28, BA-LM-30, VR-LM-31 e PI-LM-33 (Figura 83). As informações detalhadas sobre os cristais selecionados em cada amostra (idade bruta, concentração de U e Th e raio do mineral), assim como os modelos gerados estão apresentadas nos anexos B e C.

Figura 83 - Gráficos Idade - eU com destaque em amarelo para os cristais selecionados e utilizadas no processo de modelagem das histórias térmicas.



As informações inseridas no sistema foram: 1) idades brutas (sem correção para ejeção de partículas alfa); 2) concentrações de U e Th; e 3) raio do cristal, além da definição dos parâmetros de ejeção de partículas alfa e correção das idades de Farley et al. (1996) e do modelo a ser utilizado (RDAAM) de Flowers et al. (2009). O HeFTy calcula a idade corrigida com base na aplicação da solução esférica para a correção da emissão de partículas alfa (FARLEY et al., 1996; FARLEY, 2002).

Numa etapa experimental foram feitas simulações de 100.000 e 500.000 randomizações de forma a comparar os resultados e analisar a sua influência nos resultados observados. A modelagem final foi definida em 500.000 randomizações para a definição do padrão tempo-temperatura (tT).

Como estratégia de modelagem optou-se, inicialmente, por executar a modelagem inversa sem definição de boxes para restrição dos segmentos, seguindo um padrão de resfriamento linear. A condição inicial do modelo foi definida como a atual e a condição final acima do limite da zona de retenção parcial para o termocronômetro. A escala de idade (eixo x) foi definida entre 160 e 0 Ma e entre 180 e 0 Ma para uma das amostras para avaliar se o limite de 160 Ma estava limitando a modelagem. O objetivo foi observar as variações nas respostas do modelo a partir da inclusão nas denominadas "caixas de Monte Carlo", que podem ser inseridas para que o programa considere os seus limites na definição dos padrões de tempo-temperatura (t-T). As caixas foram incluídas nas modelagens seguintes para que as diferenças fossem analisadas. As informações sobre a área e os intervalos de eventos registrados na região a partir de outros estudos foram considerados na definição das caixas, mas sem limitar excessivamente os intervalos.

As simulações também foram realizadas para avaliar a influência de alterações no parâmetro da temperatura da superfície nos resultados dos padrões t-T, com temperatura da superfície de 0°C, 15°C e 20°C. A análise final foi feita com base nos modelos definidos com temperatura de superfície de 20°C. A rigor não ocorrem alterações significativas nos segmentos de t-T quando a temperatura de superfície é modificada, assim como também não se observou alteração na modelagem inversa quando a opção de forçar a temperatura da superfície durante a modelagem direta foi definida. No entanto, uma definição correta da temperatura de superfície é fundamental no processo de modelagem.

Buscou-se executar uma modelagem menos complexa, com pequenas interferências nos padrões t-T de maneira a seguir a premissa de Gallagher et al. (2005) que afirmam que um modelo bom é aquele que se enquadra nas observações satisfatoriamente, sem ser demasiadamente complexo.

O programa apresenta uma limitação de cinco cristais a serem incluídos para cada amostra/modelo. Apenas uma amostra foi simulada com dados de quatro cristais. As outras foram simuladas com três cristais, o que representa o número mínimo para a execução do processo de modelagem da história térmica adequada.

Embora o conjunto de amostras analisadas não tenha apresentado correlação Idade - eU que permitissem a utilização para a modelagem térmica, um importante aspecto dos resultados é a existência de amostras numa cobertura da área de estudos representando áreas-chave para analisar a sua evolução.

Alguns autores consideram a validade de execução da modelagem com a incorporação de resultados de traços de fissão em apatita (TFA) para as mesmas amostras, entretanto a aplicação do método de TF não foi proposta como objetivo da pesquisa. Um dos principais objetivos do trabalho foi avaliar a aplicação do método (U-Th)/He isoladamente. Além disso, a incorporação de dados de traços de fissão em apatita não garante que sejam obtidos resultados com a inversão para a modelagem das histórias térmicas. Pode ocorrer que nenhum resultado aceitável de t-T seja encontrado mesmo com a incorporação de dados de ambos os métodos, como observado por Peyton (2009).

Foi possível obter informações de tempo-temperatura (t-T) das amostras de forma a correlacioná-las com o período de ocorrência de eventos tectônicos regionais e de reativações de estruturas preexistentes na margem continental do sudeste do Brasil. Além disso, a modelagem inversa das histórias térmicas ofereceu informações para a análise da denudação na área. É importante destacar que foram considerados apenas os eventos que ocorreram em intervalos de idade coerentes com os dados das amostras, para minimizar interpretações erradas.

As amostras modeladas apresentaram valores médios de GOF (*Goodness of fit*) que variam entre 0,16 a 0,93 (Tabela 4). Resultados para a condição "bom" devem apresentar GOF igual ou maior que 0,5, indicando que o padrão tempo-temperatura (t-T) é suportado pelo dado. Os segmentos na condição "aceitável" mostram que as estatísticas para a população de dados estão acima de 0,05 e, portanto, os padrões de t-T não foram excluídos do conjunto de dados. O valor máximo de GOF é 1 e significa a melhor relação entre o dado e o modelo. O valor de  $GOF > 0,5$  é o valor esperado para padrões de tempo-temperatura e modelos cinéticos considerados corretos (KETCHAM, 2012).

As histórias térmicas modeladas apresentam resultados com GOF que mostram a boa correlação entre os dados utilizados e o modelos gerados, especialmente as amostras RE-LM-

23, VR-LM-31 e VR-LM-33. A exceção seria para a amostra RE-LM-28 que apresenta valores de GOF muito baixos e que oferece incertezas para a interpretação do resultado.

Os resultados da amostra RE-LM-23 mostram valores GOF mais altos para o modelo que requereu aquecimento (23.6) e que respondeu com um evento de aquecimento rápido entre 90 e 75 Ma, seguido por resfriamento até 50 Ma.

Tabela 4 - Valores de GOF (*Goodness of fit*) para um grupo de amostras modeladas.

Amostra	GOF - <i>Goodness of Fit</i>				GOF Média
	GOF 1	GOF 2	GOF 3	GOF 4	
PA-LM-14 (14,5)	0,51	0,2	0,89	0,94	0,64
RE-LM-23 (23.4.1)	0,92	0,32	0,9		0,71
RE-LM-23 (23.6)	0,98	0,94	0,87		0,93
RE-LM-28 (28.4)	0,13	0,26	0,1		0,16
BA-LM-30 (30.4)	0,27	0,64	0,92		0,61
BA-LM-30 (30.6)	0,34	0,86	0,69		0,63
VR-LM-31 (31.6)	0,94	0,99	0,86		0,93
PI-LM-33 (33.5)	0,95	0,91			0,93

Os resultados da modelagem das histórias térmicas serão apresentados a seguir a partir da seleção da modelagem inversa considerada como a mais representativa para a amostra, após a execução das simulações. Os resultados do gráfico do programa HeFTy apresentam: 1) o segmento que define a melhor história térmica, denominado "*best-fit*" (linha preta); b) histórias térmicas consideradas boas ("*good*") (linhas ou intervalos em envelope na cor púrpura); c) histórias térmicas consideradas aceitáveis ("*acceptable*") (linhas ou intervalos em envelope na cor verde); d) restrições (caixas de Monte Carlo) impostas para a modelagem da história térmica estão indicadas (retângulos em azul) e segmentos (linha vermelha e cinza claro ao fundo). O modelo HeFTy também será apresentado no padrão "envelope", com os intervalos e a linha (preta) que apresenta a melhor história térmica definida pelo modelo.

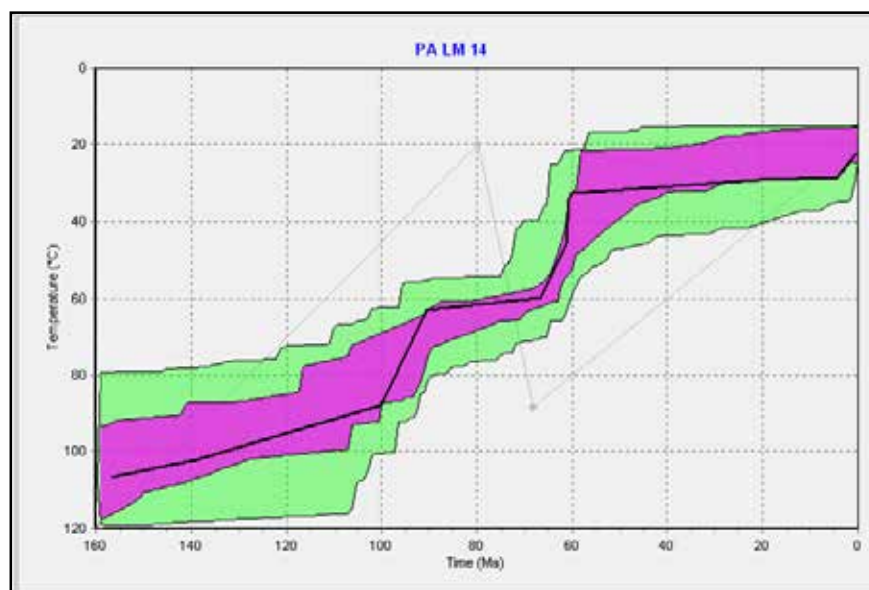
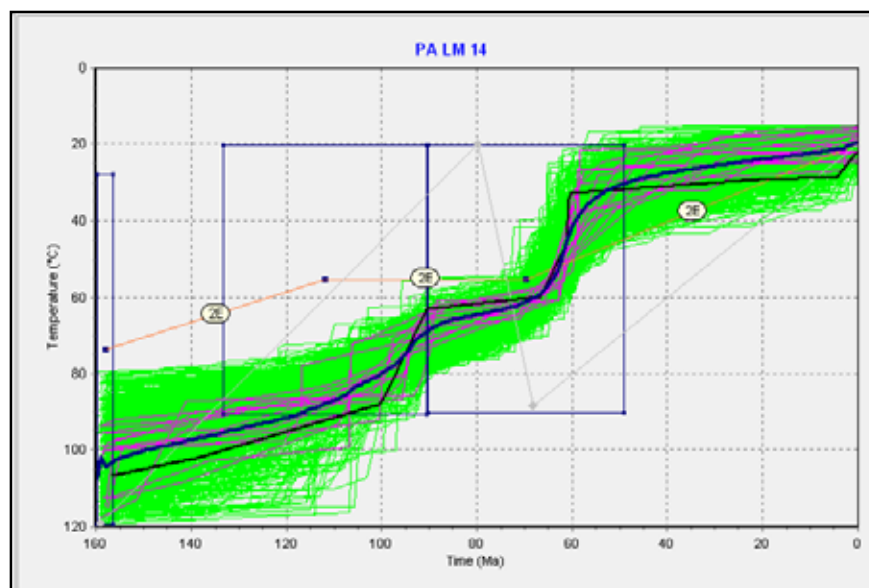
## PA-LM-14

A história térmica da amostra **PA-LM-14** (Figura 84) registra dois eventos de resfriamento rápido, com um primeiro pulso que ocorre entre 100 Ma a 90 Ma (90-65°C) e o segundo entre 65 a 60 Ma (60-30°C), seguido de resfriamento lento a partir de 60 Ma. Há um intervalo entre os dois eventos de resfriamento rápido, caracterizado por um período de resfriamento muito lento entre 90 e 65 Ma (63-60°C). Não se considera o pequeno pulso de resfriamento entre 5 Ma até o "presente" porque provavelmente trata-se de um artefato da modelagem causado pela definição da temperatura de superfície. Também não foram incluídas idades que possam corroborar com um evento de resfriamento nesse período. Observa-se que esse resfriamento não ocorre quando a temperatura é definida em 15°C (PA-LM-14 - HeFTy 14.3 no Anexo C).

O modelo selecionado como representativo da amostra é o PA-LM-14 - HeFTy 14.5 e foi modelado a partir de imposição de aquecimento para a amostra. No entanto, a amostra não respondeu à definição de restrição que permitia aquecimento mas, por outro lado, definiu melhor o intervalo de resfriamento que já havia sido apontado em modelos anteriores definidos a partir de outras estratégias (14.3 e 14.4.1) (Anexo C).

Pode ser observado que a modelagem a partir de 500.000 randomizações contribui para definir melhor o resultado. Tal fato pôde ser observado na comparação entre as amostras PA-LM-14 - HeFTy 14.4.1 e HeFTy 14.4.2 (Anexo C) com modelos que foram definidos em 500.000 e 100.000 randomizações, respectivamente. Os resultados aceitáveis e bons foram mais expressivos com o número maior de randomizações, entretanto, o que se destacou nessa comparação foi a possibilidade de identificação de um episódio de resfriamento rápido em 95 Ma, mesmo que de forma menos expressiva do que na modelagem apresentada na figura 84 e que se inicia em 100 Ma. O resfriamento de 65 Ma é observado em todas as simulações, com algumas variações.

Figura 84 - Modelo HeFTy da amostra PA-LM-14.



**RE-LM-23**

A modelagem inversa da amostra **RE-LM-23** (HeFTY 23.4.1) (Figura 85) registrou um resfriamento linear, interrompido por um evento de resfriamento rápido entre 62 e 59 Ma (60-30 °C), seguido por resfriamento lento até o "presente" apenas com uma alteração sutil entre 35-30 Ma. As idades mais jovens incluídas na modelagem podem suportar essa alteração no padrão de resfriamento observado nesse segmento.

O resultado da modelagem foi modificado quando se requereu o aquecimento, como na modelagem RE-LM-23 (HeFTy 23.6) (Figura 86). Foi registrado um evento de resfriamento entre 118 e 90 Ma, seguido por um evento de aquecimento entre 90 e 75 Ma, que pode ser interpretado como um artefato da modelagem causado pela imposição das caixas de Monte Carlo. Inicia-se um novo pulso de resfriamento após o evento de aquecimento entre 75 e 50 Ma. O número de histórias térmicas boas e aceitáveis é de 1146 e 239, respectivamente, embora os resultados estejam muito dispersos.

Figura 85 - Modelo HeFTy da amostra RE-LM-23 (23.4.1).

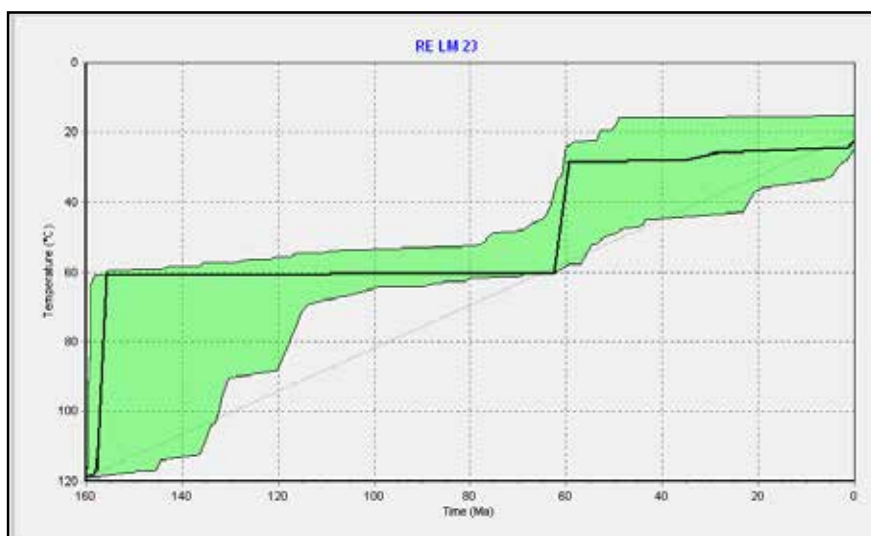
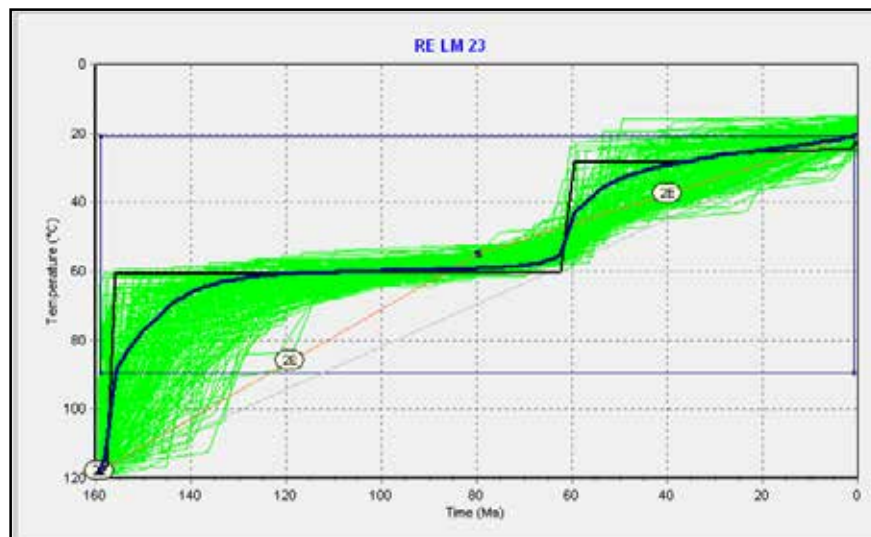
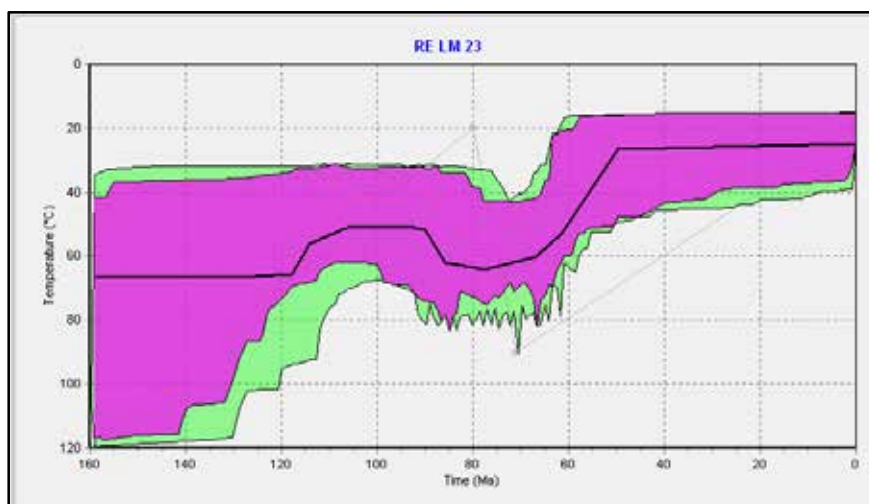
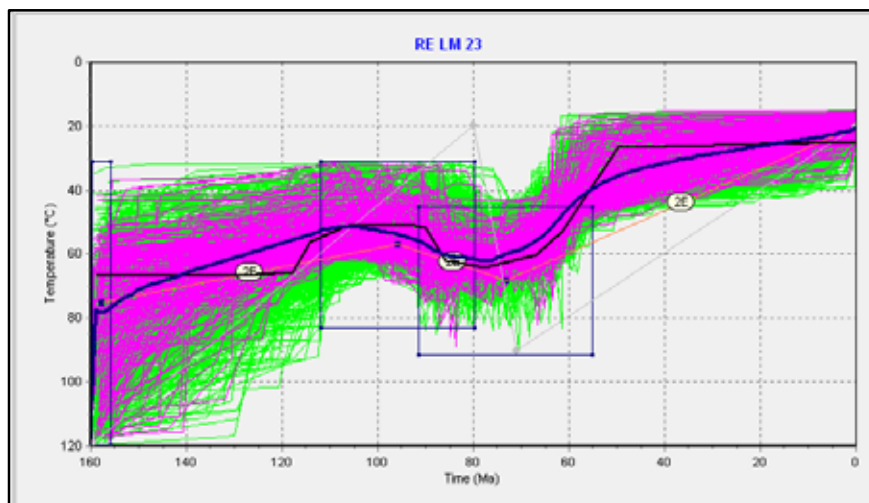




Figura 86 - Modelo HeFTy da amostra RE-LM-23 - HeFTy 23.6.

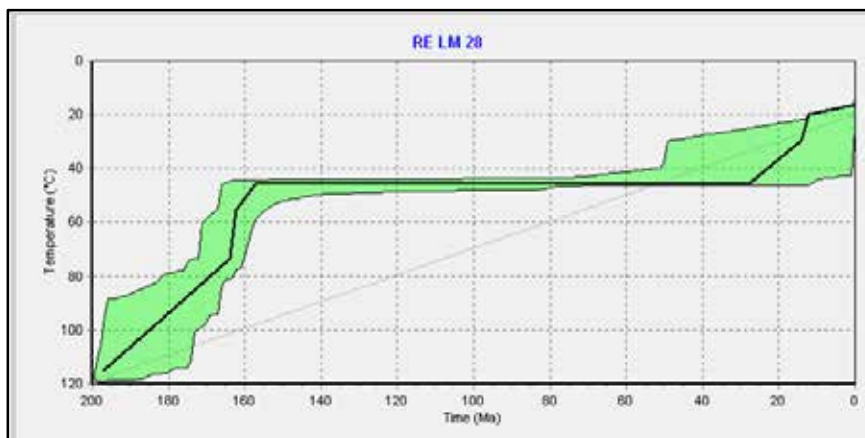
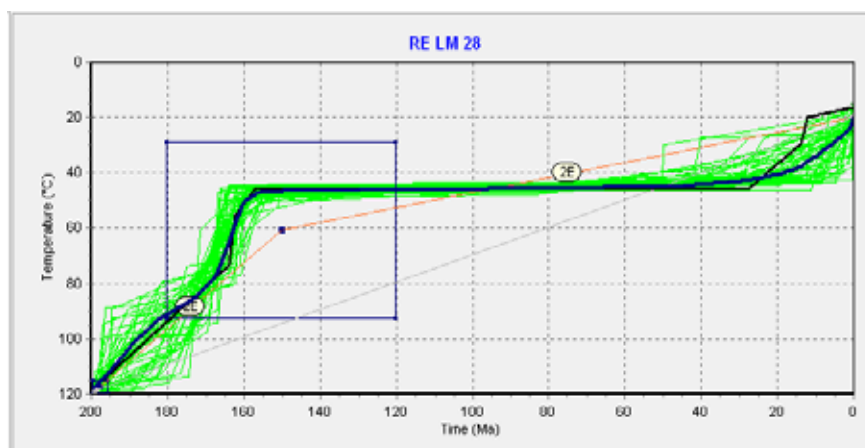


**RE-LM-28**

A amostra **RE-LM-28** - HeFTy 28.5 registrou um evento de resfriamento rápido iniciado em 165 Ma (75-45°C), seguido de resfriamento muito lento a partir de 155 Ma (Figura 87). As idades das amostras modeladas variam entre 157,2 a 108,5 Ma, o que pode suportar a história térmica marcada nesse resfriamento lento e por um longo período. A amostra também foi submetida a um modelo com aquecimento, no entanto nenhum resultado foi obtido. Como observado em modelos apresentados anteriormente, o pequeno pulso de resfriamento entre 25 Ma até o "presente" é ignorado porque indica ser um artefato do modelo causado pela definição da temperatura da superfície.

A ampliação da escala para 200 Ma e a definição de uma caixa para restrição no intervalo entre 180 a 120 Ma permitiu que a idade do resfriamento lento fosse melhor definida nessa última simulação e o número de histórias aceitáveis aumentou para 52. A simulação anterior (RE-LM-28 - 28.4 no Anexo C) registrou apenas 18 resultados "aceitáveis". Nenhum padrão t-T "bom" foi registrado para essa amostra em nenhuma simulação executada, entretando o resultado foi consistente com os dados.

Figura 87 - Modelo HeFTy da amostra RE-LM-28 - HeFTy 28.5.



**BA-LM-30**

A história térmica da amostra **BA-LM-30** (Figura 88) registrou um evento de resfriamento rápido entre 85 a 78 Ma (90-55°C), seguido por um resfriamento linear e lento até o "presente. O resfriamento rápido nesse intervalo, com algumas variações, foi registrado em todas as simulações. Assim como observado para a amostra PA-LM-14, não se considera o pulso mais recente, que ocorre há 10 Ma, nesse caso por não existirem idades que corroborem com um pulso nesse período e pela influência da definição da temperatura de superfície em 20°C que força uma mudança na curva de resfriamento.

A modelagem inversa com restrição para aquecimento (Figura 89) resultou em padrão t-T similar ao registrado na amostra RE-LM-23 23.5. Sendo assim, considerando-se que as amostras estão situadas em áreas próximas, em lados opostos da Bacia de Resende, optou-se por restringir ainda mais as definições do modelo para observação do padrão t-T.

O evento de resfriamento rápido observado na história térmica BA-LM-30 30.4 se manteve mas agora iniciado mais próximo de 80 Ma e não de 85 Ma como no modelo anterior. O registro novo é de um aquecimento entre 90 e 80 Ma (Figura 89). A modelagem inversa dessa amostra indica que esse padrão de aquecimento merece melhor análise. No entanto, o resfriamento rápido, em aproximadamente 80 Ma, foi registrado em todas as simulações.

Figura 88 - Modelo HeFTy da amostra BA-LM-30 - HeFTy 30.4.

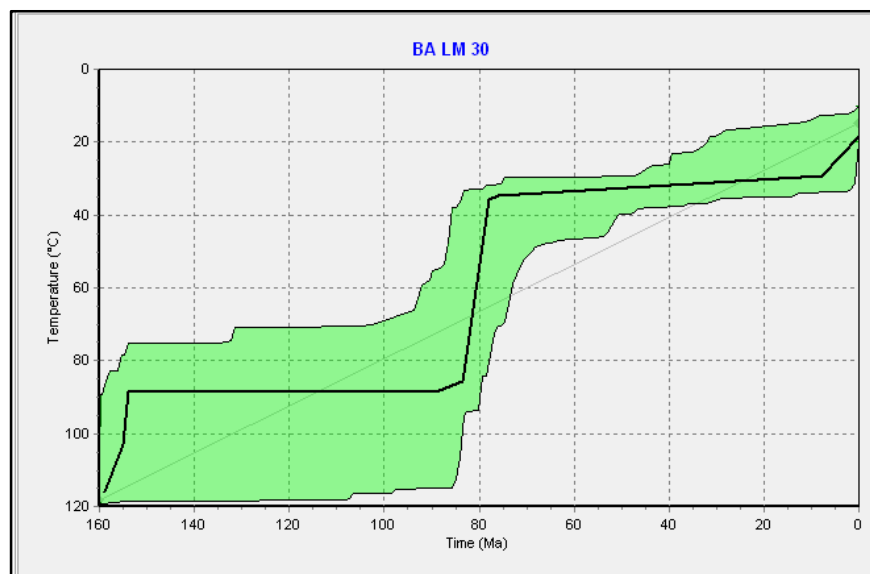
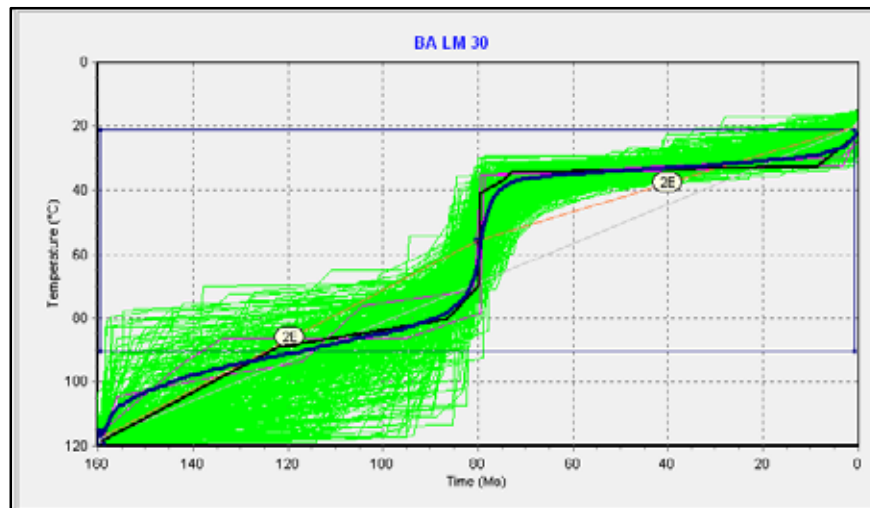
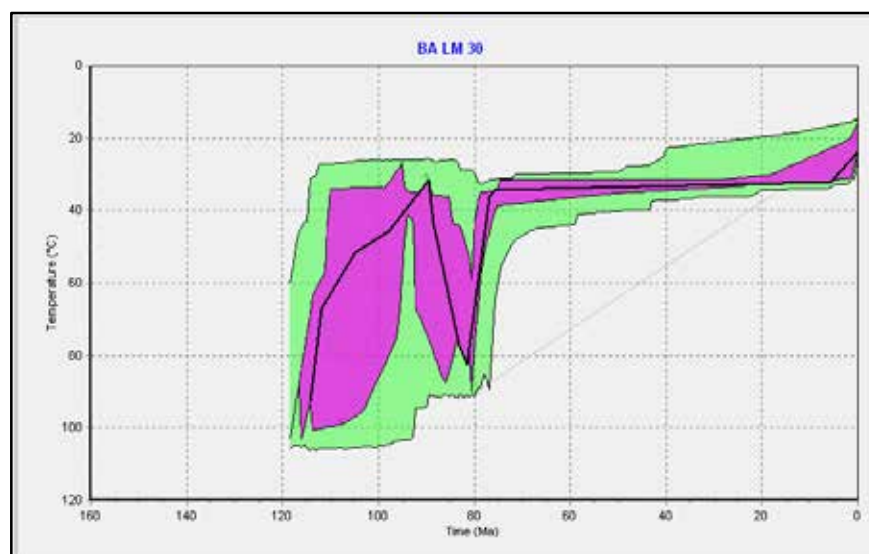
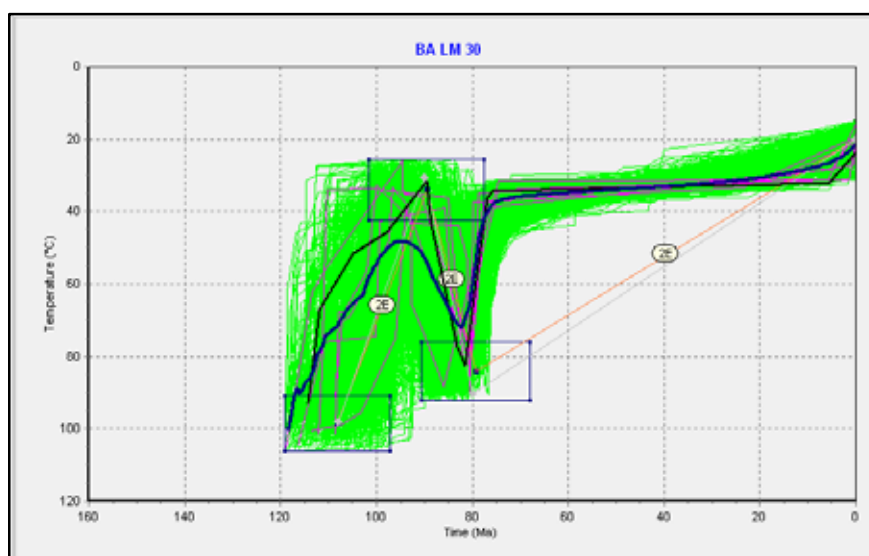


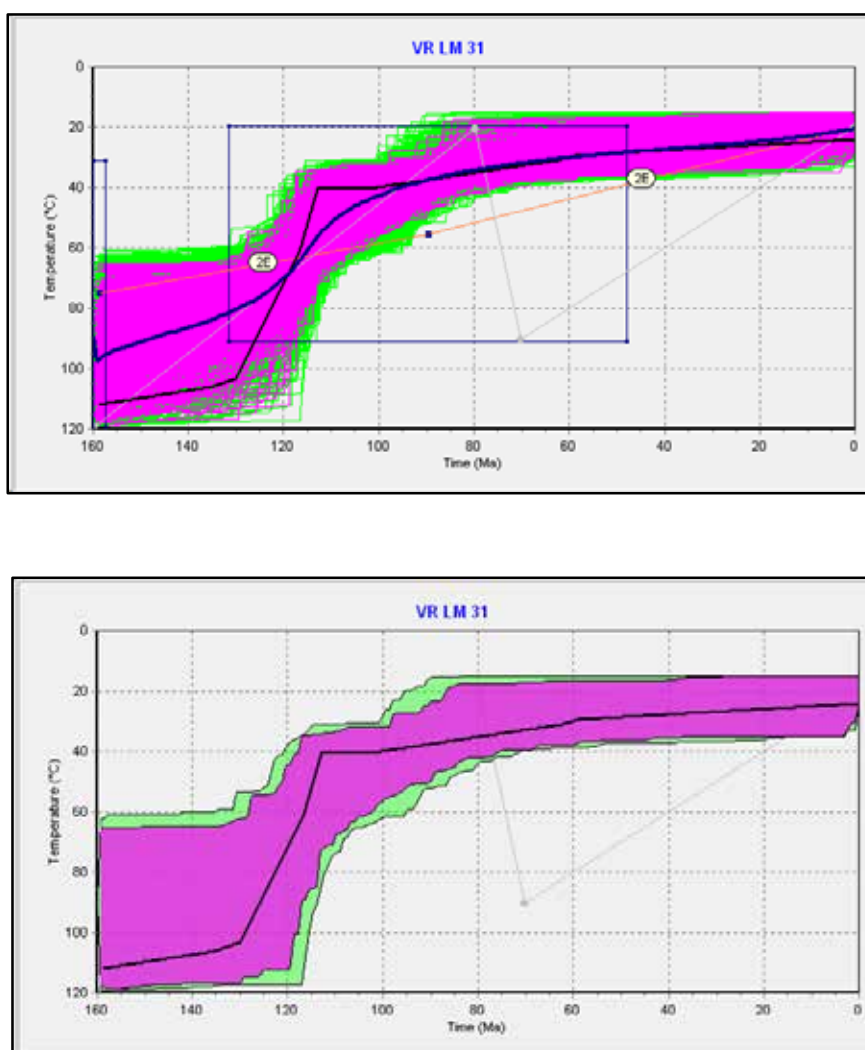
Figura 89 - Modelo HeFTy da amostra BA-LM-30 - HeFTy 30.6.



**VR-LM-31**

A amostra **VR-LM-31** registrou um resfriamento rápido entre 130 e 115 Ma (105-40°C) e resfriamento lento e linear subsequente. Os resultados da modelagem inversa para essa amostra são muito consistentes e resultaram em 3097 e 873 histórias térmicas aceitáveis e boas, respectivamente. O resultado da modelagem inversa da amostra, considerado mais representativo, é o que foi gerado a partir do modelo que permitia aquecimento (Figura 90) mas que não respondeu ao aquecimento, mantendo-se na curva de resfriamento. Essa observação oferece maior consistência para o resultado obtido com a modelagem da história térmica dessa amostra.

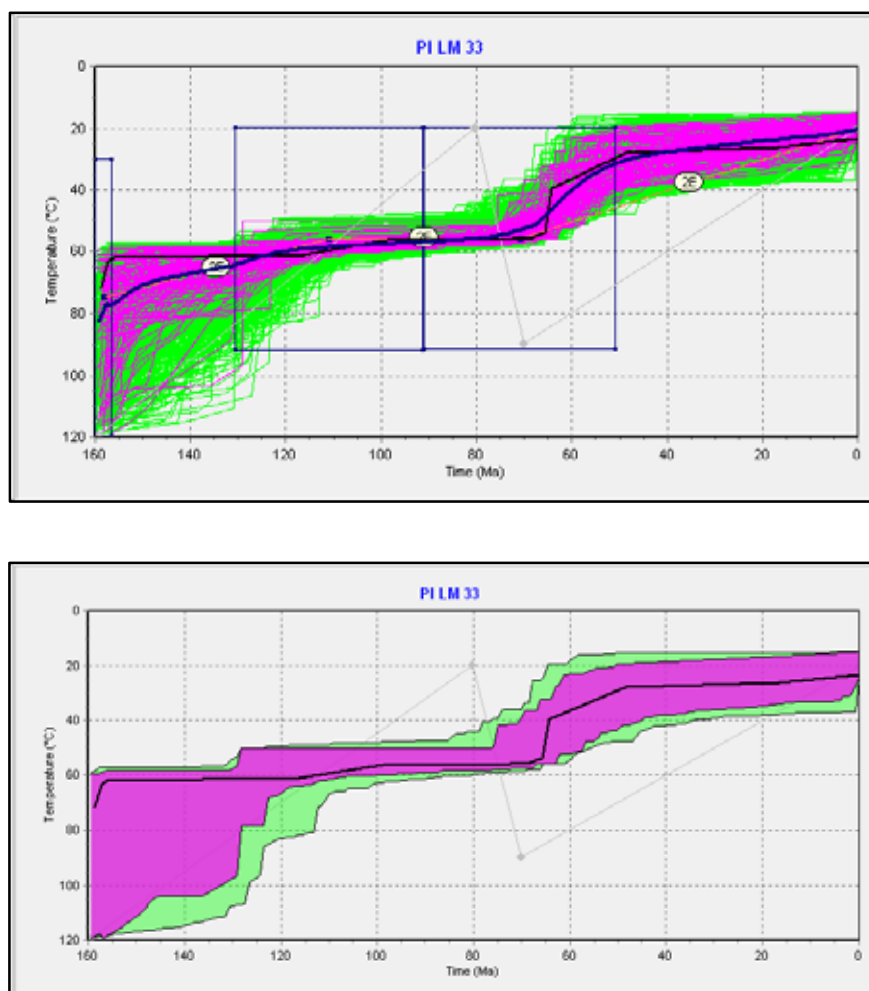
Figura 90 - Modelo HeFTy da amostra VR-LM-31 - HeFTy 31.6.



**PI-LM-33**

A modelagem inversa da amostra **PI-LM-33** (Figura 91) registrou um resfriamento linear interrompido por pulso de resfriamento rápido em 65 Ma (55-40 °C), seguido de resfriamento moderado entre 65-50 (40-30°C) e resfriamento lento a partir de 50 Ma até o "presente".

Figura 91 - Modelo HeFTy da amostra PI-LM-33 - HeFTy 33.5.





Todos os modelos selecionados como representativos da história térmica da respectiva amostra registraram pulsos de resfriamento rápido precedidos e sucedidos por períodos de resfriamento lento e linear. Os pulsos de resfriamento rápido podem ser atribuídos a eventos mais antigos registrados nas histórias térmicas das amostras RE-LM-28 (165 Ma) e VR-LM-31 (130-115), a um evento intermediário na amostra BA-LM-30 (85-78 Ma) ou a eventos mais recentes nas amostras RE-LM-23 (75-50 Ma) e PI-LM-33 (65 Ma). A amostra PA-LM-14 registrou pulsos relacionados a um evento mais antigo (100-90) e outro mais recente (65-60), com um período de estabilização entre os dois pulsos. Esse período de estabilidade, associado à formação de um "platô" nos padrões tempo-temperatura é atribuído a um período de quiescência tectônica, com geração de superfícies de erosão a partir da interrupção da fase de soerguimento. Para Gunnell (2000), o resfriamento rápido indica episódio de soerguimento (tectônico) e o resfriamento lento está associado a um soerguimento isostático. A discussão sobre o significado e a integração desses resultados no contexto da área será apresentada na síntese dos resultados.

### 5.7 Estimativas de denudação a partir de termocronologia de baixa temperatura (U-5Th)/He em apatita

A relação entre os eventos tectônicos e os processos geodinâmicos superficiais é apresentada com diferentes enfoques em estudos de Geologia e Geomorfologia Tectônica, realizados tanto em domínios de margens ativas como em margens passivas. Importantes abordagens se baseiam na utilização de métodos como o de termocronologia, que pode fornecer informações sobre as taxas de denudação, variáveis espacial e temporalmente, e que são fundamentais para a análise da configuração atual e condição de “equilíbrio dinâmico” da paisagem. Nesse sentido, serão apresentadas as estimativas de denudação calculadas inicialmente a partir do perfil idade-elevação e, em seguida, a partir dos padrões tempo-temperatura gerados pela modelagem das histórias térmicas.

As taxas de denudação estimadas pelo perfil idade-elevação podem ser superestimadas quando se considera o perfil de áreas mais baixas para as mais altas, na medida em que podem não ser exatamente um perfil vertical e estar influenciado por variações da topografia e gradientes geotérmicos (FITZGERALD et al., 2006). A evolução tectono-termal e morfotectônica da área de estudos indica um nível de complexidade que pode claramente influenciar na interpretação dos dados termocronológicos.

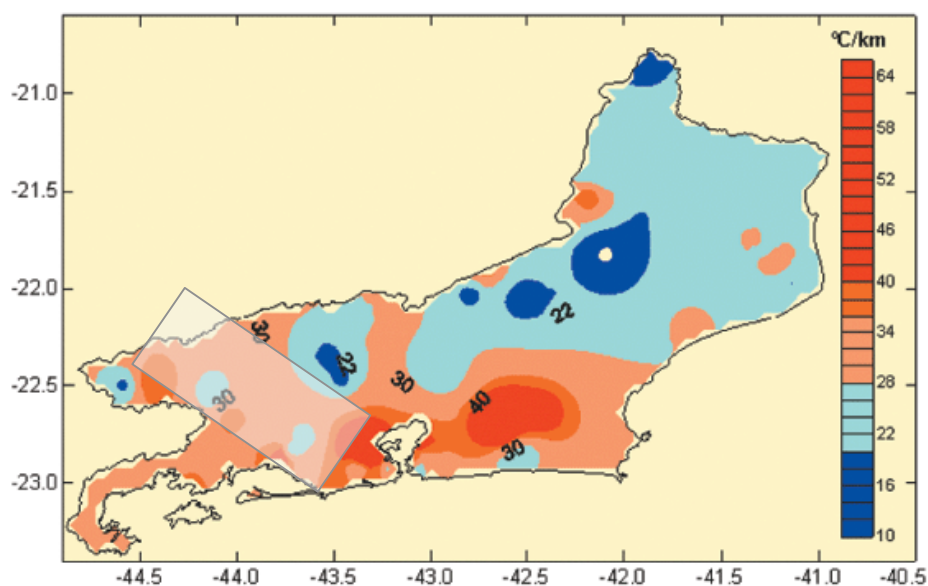
Os resultados da modelagem inversa foram essenciais para as estimativas de denudação total e de taxas de erosão. A amostra RE-LM-23 foi desconsiderada por ter apresentado, em algumas simulações, padrões de tempo-temperatura (t-T) que parecem estar associados a uma fase de aquecimento e isso poderia comprometer a confiabilidade no resultado. A amostra BA-LM-30 também respondeu ao aquecimento quando foi requerido, porém o registro de resfriamento iniciado entre 80-85 Ma se manteve e foi, portanto, utilizado para o cálculo da estimativa de denudação.

O método de Raab et al. (2002) foi utilizado para estimar o total da superfície denudada. A denudação foi calculada a partir da divisão da taxa de resfriamento pelo gradiente geotérmico, como apresentado no capítulo 3. As taxas de erosão médias foram calculadas segundo método proposto por Burbank e Anderson (2001), que considera a temperatura de fechamento do termocronômetro, a paleotemperatura e o gradiente geotérmico.

Segundo Burbank e Anderson (2001), um gradiente geotérmico continental típico apresenta uma variação entre 20 e 30°C. Os dados disponíveis para a área de estudo a partir de dados apresentados para o Estado do Rio de Janeiro por Gomes e Hamza (2005) indicam gradiente geotérmico atual de 30°C/km (Figura 92). Porém, optou-se por realizar os cálculos

com gradientes geotérmicos de 30, 35 e 50°C para avaliar as diferenças, considerando-se a evolução tectônica da área que envolve eventos magmáticos que influenciaram a evolução tectono-termal da área no período analisado.

Figura 92 - Gradientes geotérmicos no Estado do Rio de Janeiro (GOMES e HAMZA, 2005), com destaque para a área de estudo.



Legenda: A área de estudo da pesquisa está destacada no retângulo.  
Fonte: GOMES e HAMZA, 2005. destaque para a área de estudo.

As estimativas de denudação total e de taxa de erosão média foram calculadas para as amostras PA-LM-14, RE-LM-28, BA-LM-30, VR-LM-31 e PI-LM-33 e estão apresentadas nas tabelas 5 e 6 e na figura 93.

É importante observar que o soerguimento de rochas em direção à superfície e o aquecimento associado ao processo de advecção do calor interno pode gerar variações no gradiente geotérmico e, portanto, durante eventos de resfriamento significativos e erosão rápida podem ocorrer variações significativas nos gradientes geotérmicos (BURBANK e ANDERSON, 2001). Por essa razão, as incertezas associadas ao cálculo de taxas de erosão a partir de histórias de resfriamento devem ser reconhecidas.

Tabela 5 - Denudação total estimada a partir de paleotemperatura (T) modelada a partir da definição do padrão de tempo-temperatura no programa HeFTy e calculada para diferentes gradientes geotérmicos (G=30, 35 e 50°C/km).

Denudação Total							
Amostra	Elevação (m)	T Paleotemperatura (°C)	Início da Denudação (Ma)	Ts Temperatura da Superfície (°C)	D Denudação (km) G=30°C/km	D Denudação (km) G=35°C/km	D Denudação (km) G=50°C/km
PA-LM-14	110	90	100	20	2,3	2,0	1,4
RE-LM-28	1362	75	165	20	1,8	1,6	1,1
BA-LM-30	380	90	85	20	2,3	2,0	1,4
VR-LM-31	412	105	130	20	2,8	2,4	1,7
PI-LM-33	431	55	65	20	1,2	1,0	0,7

Tabela 6 - Estimativas de taxas de erosão médias para diferentes gradientes geotérmicos (G=30, 35 e 50°C/km). Taxas de erosão (E) calculadas em km/Ma e em m/Ma.

Taxas de Erosão										
Amostra	Elevação (m)	c Temperatura de fechamento (°C)	a Idade do resfriamento (Ma)	z Profundidade (km) G=30°C/km	z Profundidade (km) G=35°C/km	z Profundidade (km) G=50°C/km	E Taxa de Erosão (km/Ma) G=30°C/km	E Taxa de Erosão (km/Ma) G=35°C/km	E Taxa de Erosão (km/Ma) G=50°C/km	E Taxa de Erosão (m/Ma) G=30°C/km
PA-LM-14	110	90	100	3,0	2,6	1,8	0,030	0,026	0,029	30,0
RE-LM-28	1362	75	165	2,5	2,1	1,5	0,015	0,013	0,029	15,2
BA-LM-30	380	90	85	3,0	2,6	1,8	0,035	0,030	0,029	35,3
VR-LM-31	412	105	130	3,5	3,0	2,1	0,027	0,023	0,029	26,9
PI-LM-33	431	55	65	1,8	1,6	1,1	0,028	0,024	0,029	28,2

A relação entre a superfície topográfica e o gradiente geotérmico é um aspecto fundamental para uma interpretação cautelosa de estimativas de denudação. Burbank e Anderson (2001) observam que geralmente as isotermas são paralelas numa profundidade maior ou igual a 15 km e, portanto, não são afetadas pelas variações topográficas. Por outro lado, na crosta rasa a posição das isotermas é função das variações na topografia e da taxa de adveção lateral e vertical das rochas do entorno. A condição ideal para análise da denudação seria a utilização de uma maior cobertura espacial de dados, especialmente ao longo de múltiplos perfis verticais de forma a observar as mudanças associadas às variações na amplitude do relevo.

Figura 93 - Perfil topográfico da área de estudo integrado com as estimativas de denudação total das amostras RE-LM-28, BA-LM-30, VR-LM-31, PI-LM-33 e PA-LM-14 (Tabela 5), baseadas em gradiente geotérmico de 30°C/Km. No perfil inferior estão apresentadas as amostras que cruzam o perfil, com as respectivas idades médias (Ma), com erro de 2  $\sigma$ .

