TERMOCRONOLOGIA APLICADA À EVOLUÇÃO GEOMORFOLÓGICA DO NORDESTE SETENTRIONAL DO BRASIL: UMA BREVE REVISÃO

Francisco Leandro de Almeida Santos[1], Flávio Rodrigues do Nascimento[1], Peter Christian Hackspacher[2], Marli Carina Siqueira Ribeiro[2], Bruno Venancio da Silva & Daniel Françoso de Godoy[2]

[1] Departamento Geografia da Universidade Federal do Ceará; Campus do Pici Bloco 11, CEP 60440-900. Fortaleza/CE; leogeofisico@gmail.com; flaviorn@yahoo.com.br

[2] Departamento de Petrologia e Metalogenia da Universidade Estadual Paulista, Av 24A, 1515, CEP:15506-900. R. Claro/SP; peter.hackspacher@unesp.br; marlicarina@gmail.com; rochabt@gmail.com; danielgodoy@unesp.br

---

Resumo: A termocronologia de baixa temperatura abrange um conjunto de métodos radiométricos que se baseiam na retenção de produtos do decaimento radioativo em minerais, em função da temperatura a que as rochas são submetidas ao longo do tempo geológico. Os métodos termocronológicos têm sido aplicados para reconstrução de histórias térmicas da crosta superior, utilizadas para decifrar a evolução tectônica e de denudação dos continentes. No Nordeste Setentrional do Brasil, a termocronologia tem possibilitado compreender os efeitos da abertura da Margem Equatorial Atlântica e de eventos pós rifte sobre a gênese e evolução dos compartimentos de relevo da Província Borborema. Desta forma, este trabalho pretende apresentar o estado da arte acerca das contribuições da termocronologia e suas perspectivas futuras como base de método para os estudos geomorfológicos no Nordeste Setentrional do Brasil.

Palavras-Chave: Métodos termocronológicos, histórias térmicas, evolução tectônica, denudação, Província Borborema.

Abstract: The low temperature thermochronology consists of a set of radiometric methods that are based on the retention of radioactive decay product's in minerals, as a function of the temperature to which rocks are subjected over geological time. Thermochronological methods have been applied for reconstruction of thermal histories of the upper crust, used to decipher the tectonic and denudation evolution of the continents. In the Northeast Northeast of Brazil, thermochronology has made it possible to understand the effects of the opening of the Atlantic Equatorial Margin and post-rift events on the genesis and evolution about of the relief compartments of the Borborema Province. Therefore, this work intends to present the state of the art about the contributions of thermochronology and its future perspectives as a method base for geomorphological studies in the Septentrional Northeast of Brazil.

Keywords: Thermochronological methods, thermal histories, tectonic evolution, denudation, Borborema Province

Tema: Geomorfologia do Quaternário

1 INTRODUÇÃO

A geomorfologia do Nordeste Setentrional brasileiro foi interpretada classicamente pelos trabalhos de Ab' Saber (1964,1969), Bigarella e Andrade (1965) e Bigarella e Mousinho (1966), Mabsone e Castro (1974) e Souza (1988). Esses autores interpretaram a evolução do relevo como resultantes de soerguimentos pós-cretácicos e de variações climáticas que se alternaram entre períodos úmidos e secos ao longo do Quaternário. Para esses autores, na fase úmida, o predomínio da morfogênese química favoreceu o desenvolvimento de geoformas dissecadas sobre a vertentes a partir da instalação da rede hidrográfica e abertura prévia dos vales. Na fase seca, a preponderância da morfogênese mecânica promoveu o recuo paralelo das escarpas condicionando o escalonamento de pedimentos embutidos na estruturação das superfícies de aplainamento sertanejas.

Os trabalhos clássicos contribuíram para a consolidação de uma geomorfologia do Quaternário com ênfase nos processos de erosão linear e recuo paralelo das vertentes, interpretada como paleosuperfície de flutuações climáticas semiáridas. Esses trabalhos apresentam limitações na elucidação de aspectos estruturais, sobretudo, da tectônica rifte, pós-rifte e da erosão diferencial ao longo das zonas de cisalhamento que controlam a evolução do relevo da Província Borborema (MAIA, 2012; MAIA E BEZERRA, 2014a).

Assim, os aspectos ligados a geomorfologia estrutural ganham significado para interpretação do relevo do Nordeste Setentrional a partir dos trabalhos de Peulvast e Claudino Sales (2004, 2006), Peulvast et al. (2008), Bétard e Peulvast (2011, 2015), Maia e Bezerra (2014b) e Claudino Sales (2016), através de uma abordagem poligênica que aborda a tectônica rifte e pós rifte no soerguimento do relevo, bem como as variações climáticas do Quaternário na elaboração de superfícies de erosão e agradação.

A Província Borborema abrange quase que a totalidade dos estados do Nordeste (exceto Bahia, Piauí e Maranhão), limitando-se com a Bacia do Parnaíba a oeste, o Cráton São Francisco ao sul, a Província da Margem Continental Leste a leste e Equatorial ao norte. Encontra-se dividida em três grandes subprovíncias (Meridional, Transversal e Setentrional), separadas por duas grandes estruturas tectônicas denominadas de Lineamento Patos e Pernambuco (HASUI, 2012, BRANDÃO; FREITAS, 2014).

A Província Borborema possui uma malha de zonas de cisalhamento de escala continental que forma um sistema cinematicamente consistente por mais de 200. 000 Km² (VAUCHEZ et al., 1995). É um mosaico de porções do embasamento, microcontinentes e faixas orogenéticas do Arqueano ao Neoproterozoico, delimitadas por zonas de cisalhamento transcorrentes e de empurrão (HASUI, 2012).

A Subprovíncia Setentrional (Figura 1) está dividida em três domínios tectônicos principais conhecidos como: Domínio Médio Coreaú (demarcado a sudeste pelo Lineamento Transbrasiliano) Domínio Ceará Central (delimitado a noroeste pelo Lineamento Transbrasiliano e a sudeste pela Zona de Cisalhamento Senador Pompeu) e Domínio Rio Grande do Norte (Limita-se a Noroeste pela Zona de Cisalhamento Senador Pompeu e ao sul pelo Lineamento Patos). Este último é subdividido nos subdomínios Jaguaribeano, Piranhas-Serindó e São José do Campestre (ARTHAUD, et al., 2008, 2015, CPRM, BRASIL, 2015, UCHOA et al., 2020).

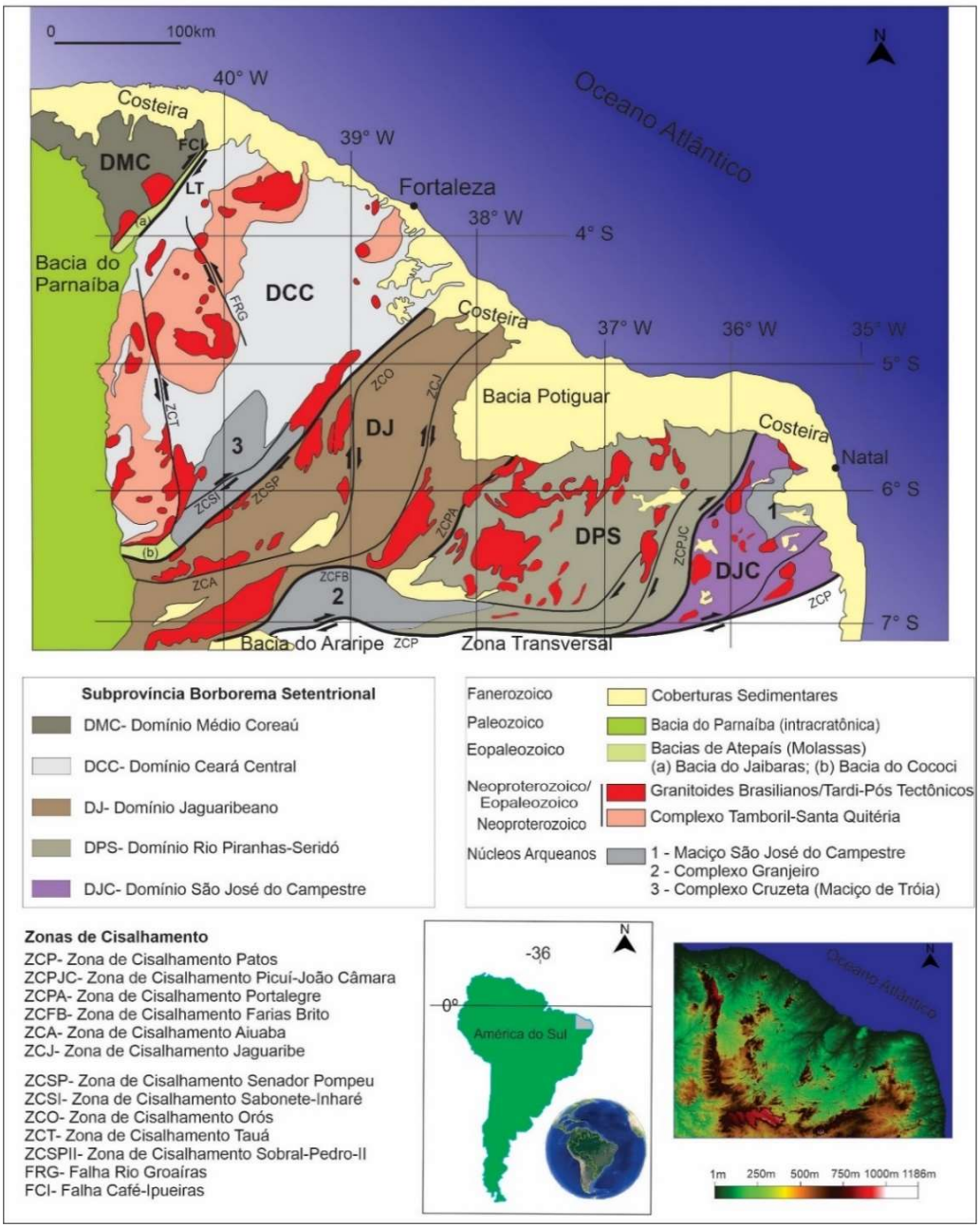

Figura 1. Localização e Geologia Simplificada da Província Borborema. Fonte: CPRM, Brasil (2015) e Arthaud et al., (2008, 2015), modificado pelos autores.

Em termos de geração das principais morfoestruturas do Nordeste Setentrional do Brasil, cinco eventos foram marcantes na gênese e evolução do relevo da área:

1) Orogênese Brasiliana (665-550), com a formação do arco magmático Tamboril-Santa Quitéria no interior da Província Borborema (Neoproterozoico) (BRITO NEVES, 1999, ARTHAUD, et al., 2015);
2) Intrusão de granitos tardios e formação dos riftes precursores que originaram as bacias do Jaibaras e do Parnaíba (Final do Neoproterozoico e início do Paleozoico) (VAZ et al., 2007, PEDROSA JR et al., 2016,);
3) Abertura da Margem Equatorial Atlântica, formação das bacias sedimentares Potiguar e do Araripe, reativação das zonas de cisalhamento com soerguimento de relevos sedimentares e exumação de maciços graníticos e cristas estruturais (Cretáceo Inferior) (CAVALCANTE, 2003, PEULVAST; CLAUDINO SALES, 2006, PESSOA NETO et al., 2007, MAIA; BEZERRA, 2014b);
4) Subsidência térmica e sedimentação da plataforma *offshore* (Cretáceo Superior) (PESSOA NETO et al., 2007);
5) Soerguimento flexural do continente, com início no Paleógeno. Deposição das formações Barreiras e Serra dos Martins (Mioceno), variações climáticas e elaboração das superfícies de aplainamento sertanejas entre o Mioceno e o Pleistoceno (LIMA, 2008, CLAUDINO SALES, 2016).

Essa sequência de eventos é responsável pelas linhas mestras do relevo do Nordeste Setentrional que condicionam a evolução geomorfológica atual, controlando a configuração dos processos denudacionais do Cenozoico. Tal controle resulta do condicionamento estrutural das zonas de cisalhamento brasilianas dispostas em faixas paralelas e direcionadas segundo os planos de deformação, falhas e fraturas, comandando os processos erosivos que passam a expressar o relevo (MAIA; BEZERRA, 2014b).

A imagem SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) abaixo (Figura 2) expõe o contexto morfoestrutural do Nordeste Setentrional do Brasil com a localização e disposição das principais unidades geomorfológicas da área.

Esses relevos acham-se alinhados segundo zonas de cisalhamento de origem proterozoica (reativadas durante o Cretáceo). As morfoestruturas do Proterozoico e Cretáceo foram retrabalhados por episódios tectônicos (soerguimentos cenozoicos), magmáticos (vulcanismo neógeno), erosivos (associados a climas secos e a mudanças climáticas e variações do nível do mar) e sedimentológicos, (acumulação de sedimentos nas planícies fluviais e costeira) (CLAUDINO SALES, 2016).

A par dessas questões Hackspacher et al. (2004) ressalta que os dados de termocronologia de baixa temperatura são fundamentais para validar e delinear a história termal e a magnitude dos eventos tectônicos, além da determinação de idades e taxas médias de erosão a partir das informações geológicas e geomorfológicas, que permitem qualificar e quantificar o grau de exumação e denudação em áreas pré-cambrianas. Assim, a relação entre os processos tectônicos e climáticos torna necessária a determinação das reativações rúpteis e taxas de denudação ao longo da evolução da paisagem.

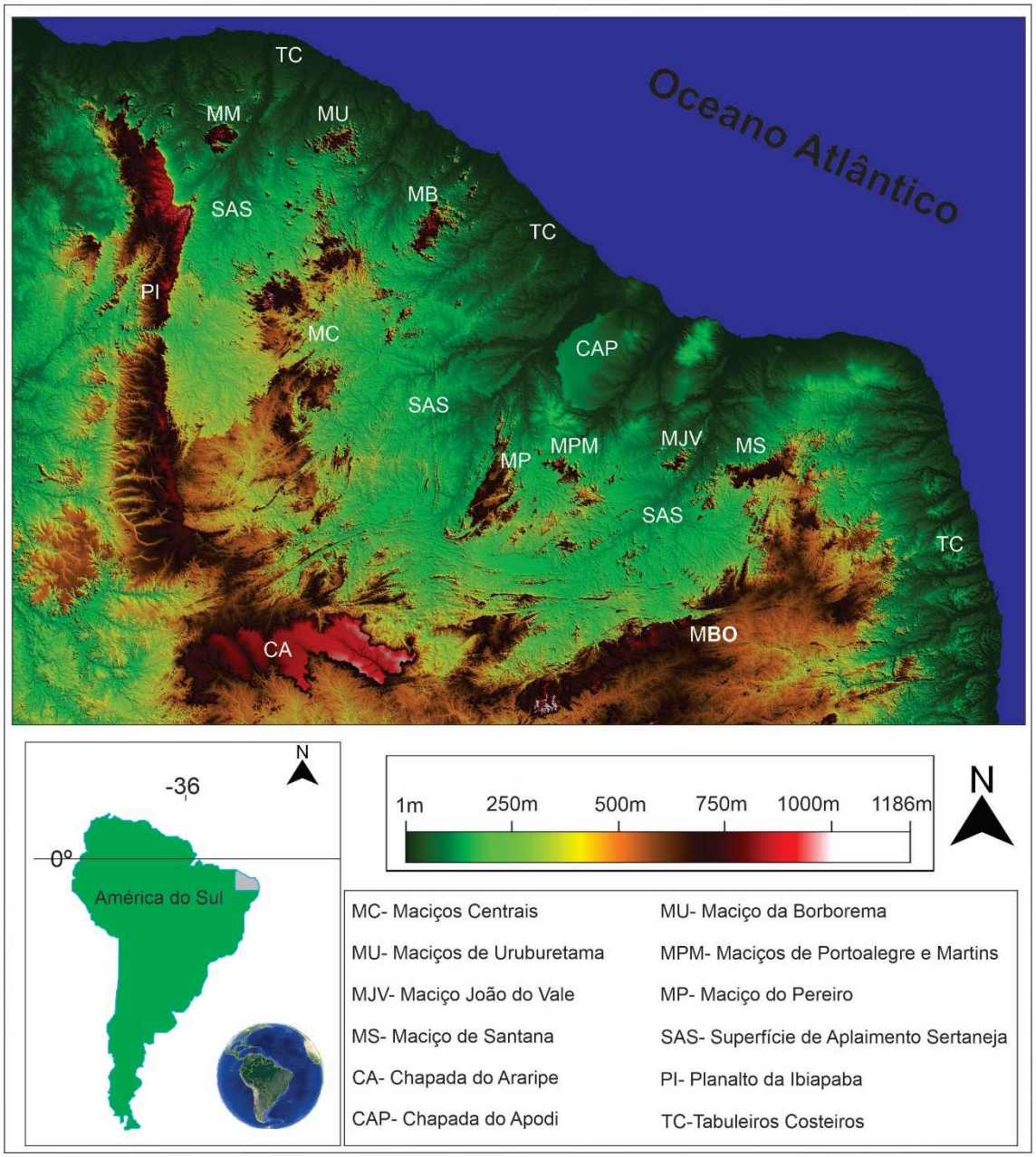

Figura 2. Geomorfologia do Nordeste Setentrional do Brasil. Fonte: SRTM (2020), elaborado pelos autores.

A termocronologia por traços de fissão foi desenvolvida de acordo com os princípios de Fleischer et al. (1965), na chamada teoria da explosão iônica (*ion explosion spike*). Esses pressupostos foram utilizados para reconstruir a história térmica das rochas com base na análise dos defeitos no retículo cristalino dos minerais de apatita e zircão pelo decaimento nuclear do isótopo U-238. Este isótopo sofre o processo de fissão espontânea a partir da desintegração de um núcleo instável pai, que dissipa energia cinética através do lançamento de dois átomos filhos em direções opostas, provocando em sua trajetória uma ionização positiva dos átomos, os quais sofrem repulsão *coulombiana* até produzir traços latentes na rede cristalina do mineral. (SILVA, 2016).

A termocronologia de baixa temperatura tem sido amplamente empregada para registrar as histórias térmicas em rochas ígneas, metamórficas e sedimentares sobre uma gama de configurações geológicas que incluem; cinturões orogênicos, margens passivas, falhas, bacias sedimentares e crátons. Por consequência investiga os eventos tectônicos que condicionam a evolução do relevo terrestre (DONELIK et al., 2005).

Desta forma, os eventos de reativação das zonas de cisalhamento brasilianas da Província Borborema serão discutidos a partir do estado arte em torno dos dados termocronológicos disponíveis na literatura, que registram no tempo geológico, o gradiente geotérmico da crosta em correlação com os eventos tectônicos de grande magnitude, responsáveis pela evolução tectônica-denudacional da área de estudo O objetivo do presente estudo é compreender os efeitos da tectônica meso-cenozoica sobre os relevos da Província Borborema e das bacias sedimentares do Nordeste Setentrional por meio da revisão de dados de termocronologia de baixa temperatura

2 DADOS TERMOCRONOLÓGICOS E EVOLUÇÃO DAS MORFOESTRUTURAS DO NORDESTE SETENTRIONAL DO BRASIL

2.1 Evolução Tectônica-Termal da Província Borborema a partir de uma Análise em Conjunto com a Estruturação das Bacias Sedimentares Paleozoicas

Na plataforma Sul-americana, o Lineamento Transbrasiliano é uma zona de cisalhamento de magnitude continental demarcando a zona de sutura da colagem que formou o Gondwana Ocidental durante o Neoproterozoico. Dispõe-se sobre o Noroeste da Província Borborema e suas extensões de margem continental possuem continuidade na crosta da África Ocidental através da zona de cisalhamento Kandi entre o cinturão Dahomey e no cráton Transaharan (CORDANI et al., 2013).

No Brasil, estende-se por uma distância em torno de 2.700 Km, desde o noroeste do Ceará (onde é localmente chamado de Lineamento Sobral-Pedro II) atravessando a Bacia do Parnaíba até o noroeste da Bacia do Paraná, na região do sudoeste do Mato Grosso do Sul, seguindo possivelmente até os limites entre os crátons do Rio da Prata e Pampia. (RAPELA. et al., 2007, RAMOS et al., 2010, CHAMANI, 2011).

A existência de um corredor tectônico formado por zonas de cisalhamento dúcteis paralelas sugere que as falhas brasilianas foram geradas a partir de uma orogenia continental como resultante da deformação nas margens dos antigos crátons. Esse fato indica que o Lineamento Transbrasiliano começou a se formar quando as antigas massas continentais já haviam colidido durante a Orogênese Brasiliana (FUCK et al., 2013).

Os lineamentos Patos e Pernambuco se conectam com o Lineamento Transbrasiliano formando uma megaestrutura do tipo *splay* movimentando-se com cinemática transcorrente dextral na direção NE-SW (DELGADO et al., 2003). As zonas de cisalhamento Patos e Senador Pompeu possuem continuidade na África através das zonas de cisalhamento *Garoua e Ile Ife*, respectivamente. Além disso, há uma conexão entre o Noroeste da Província Borborema (CE) e o oeste africano através do Lineamento Transbrasiliano/Kandi. (CASTRO et al., 2012).

Moura (2017), através de datações 40Ar/39Ar, identifica idade de 482 ±7 em rochas vulcânicas intercaladas com arenitos da Formação Pacujá (Bacia do Jaibaras), a partir da análise dos cristais de anfibólio sob estado de fusão total. Essa área está encaixada em um gráben formado nos eventos de riffteamento cambro-ordovicianos, demostrando o controle do Lineamento Transbrasiliano sobre a estruturação dos depocentros regionais da Bacia do Jaibaras e posteriormente da Sinéclise do Parnaíba.

Moura (2017) também utiliza o método 40Ar/39Ar para datar um anfibolito gnaisse pertencente ao embasamento do Complexo Canindé do Ceará, a SW da Bacia do Jaibaras, próximo a Guaraciaba do Norte na borda oriental da Bacia do Parnaíba (Planalto da Ibiapaba). A rocha apresentou-se com estruturas deformadas e estiradas através de foliação penetrativa e orientada segundo a direção do Lineamento Transbrasiliano NE-SW. O diagrama 40Ar/39Ar desta rocha, mostra uma idade definida em torno de 529 ± 12 Ma, constituindo parte dos processos de metamorfismo dos eventos pós orogênicos.

Essa formação geológica metassedimentar está posicionada no Paleoproterozoico com idades de cristalização datadas em torno do Riaciano (TORRES et al., 2010).

A idade de sedimentação da Formação Pacujá foi datada em torno de 535 ± 7 Ma por Novais et al., (1979). Conforme Garcia et al. (2018), essa bacia segue o *trend* do Lineamento Transbrasiliano. Sua borda NW é delimitada pela Falha Café-Ipueiras que separa a sequência vulcano-sedimentar em relação aos batólitos Meruoca e Mucambo.

Desta forma, a termocronologia por traços de fissão em zircão se configura como método que possibilita fornecer a idade e proveniência de unidades sedimentares, bem como a história de exumação de cinturões orogênicos (área fonte dos sedimentos). Para o zircão, a temperatura de fechamento na qual todos os traços de fissão são apagados é de 240° C. Na zona de retenção parcial, os traços de fissão são encurtados, à medida que há o aumento da temperatura no intervalo entre 240-150°C em uma profundidade de até 6 km (TAGAMI, 2005, TAGAMI; MURAKAMI, 2007, GODOY, 2010).

Godoy (2010) obtém uma de idade de 327 ± 94 Ma por meio de traços de fissão em zircão nos arenitos da Formação Pacujá. Os dados apresentados por Godoy (2010) ressaltam que estes zircões se resfriaram pela exumação da rocha fonte até a temperatura ambiente durante o transporte, sendo estes depositados e novamente aquecidos. Assim, a amostra foi submetida a um aquecimento superior a 240 ºC (intervalo de *annealing* do zircão) apagando, portanto, todos os traços advindos da rocha fonte dos sedimentos. A idade, portanto, reflete a história térmica da bacia (GODOY, 2010).

Godoy (2010), utilizando o mesmo método, obtém idade de 649 ± 97 Ma em conglomerados da Formação Aprazível (unidade cambro-ordoviciana da Bacia do Jaibaras), evidenciando que os eventos de aquecimento não foram suficientes para atingir a temperatura de apagamento total dos traços de fissão. Consequentemente, essas idades se remetem ao processo de exumação sofrido pela área fonte dos sedimentos, e, em seguida, foram transportados e, finalmente, depositados, assim, eles devem ter sido submetidos à temperatura de superfície no período de sedimentação (GODOY, 2010).

Os dados de traços de fissão em zircão de Godoy (2010) e 40Ar/39Ar em cristais de anfibólio de Moura (2017) atestam que as paleotensões em torno do Lineamento Transbrasiliano foram responsáveis pela estruturação e colapso dos orógenos brasilianos, respectivamente, delineando a história de exumação da área fonte dos sedimentos, bem como do rifteamento que consubstanciou no adelgamento crustal para a instalação das bacias sedimentares do Jaibaras e Parnaíba entre o Neoproterozoico e Eopaleozoico.

Para Oliveira & Mohriak (2003), as bacias do Jaibaras e do Cococi estão intimamente associadas a subsequente instalação da Sinéclise do Parnaíba, decorrentes dos campos de tensões extensionais e compressionais que evoluíram para um regime compressivo mecânico e termal, promovendo discordância erosiva, seguida por uma subsidência regional. Desta forma, ambas são interpretadas pelos autores como estruturas da fase rifte que formou a Sinéclise do Parnaíba no Ordoviciano Superior.

Godoy (2010), através de traços de fissão em apatita e zircão, estabelece datações para os principais pulsos de resfriamento registrados na Bacia do Cococi, situada no segmento sul do Domínio Ceará Central em contato com a borda da Bacia do Parnaíba, que possui idades de sedimentação crono-correlatas em relação à Bacia do Jaibaras.

Os dados de traços de fissão em zircão da Bacia do Cococi marcam nos termocronômetros uma datação em torno de 360 Ma. Esse resfriamento continuou após esta idade, mas o autor interpreta que as taxas foram intensificadas até próximo às idades da apatita, ou seja, 250 Ma (GODOY, 2010). De acordo com Godoy (2010) essa idade precede em 30 Ma os registros do vulcanismo Mosquito, situado no centro Bacia do Parnaíba cujas idades foram datadas por Mohone (2000). O aumento da taxa de resfriamento teria uma possível relação com o desequilíbrio dinâmico provocado na crosta, resultante de um soerguimento precedente ao vulcanismo. A mesma interpretação também é tomada nos trabalhos de Hackspacher et al., (2007) para os reflexos provocados pelo magmatismo Serra Geral no Sudeste do Brasil (GODOY, 2010).

Para Godoy (2010), os dados de traços de fissão em zircão e apatita da Formação Riacho Torto (Bacia do Cococi) apresentam idades que se interceptam, evidenciando que existe uma coincidência entre os valores das idades tanto de apatita como no zircão, com eventos particulares na área que foram registrados ao mesmo tempo, porém em temperaturas diferentes. Godoy (2010) ainda sugere a ocorrência de três eventos de inversão das histórias térmicas na referida unidade, que se sucedem no tempo geológico, sendo eles 350 Ma (Eocarbonífero), 240 Ma (Eotriássico) e 150 Ma (Neojurássico).

Na amostra da Bacia do Parnaíba, foi analisada somente dados de zircão apontando uma história térmica mais confiável até a idade de 223 ± 32 Ma, ou seja , por se tratar de uma amostra sedimentar cuja idade estratigráfica é Siluriana (Grupo Serra Grande), é certo que esta rocha sofreu aquecimento até o apagamento total dos traços e resfriou abaixo de ~240°C no Neotriássico (idade de traços de fissão em zircão) (GODOY, 2010).

A idade de cristalização do Enxame de Diques Coreaú-Aroeiras foi datada por Sial e Long (1987), em torno de 562 ± 19 Ma demarcando a transição entre a fase orogenética e os eventos extrusionais de abertura do rifte Jaibaras. A idade termocronológica de

Godoy (2010), para esses diques por meio de traços de fissão em zircão, estão em torno de 460±116, apesar de mais antiga do que as datações obtidas para as suítes graníticas Mucambo e Meruoca, seguem a mesma interpretação, à medida que o evento de resfriamento posterior não possui vínculo com o resfriamento magmático. Essas interpretações colocam os granitos como fontes proximais da Bacia do Jaibaras.

Godoy (2010) a partir da análise de traços de fissão em zircão mostra que as amostras dos granitos Meruoca e Mucambo foram aquecidas até 384 ± 48 Ma e 303 ± 35 Ma, respectivamente, ambas inferiores as suas idades de cristalização. As idades de cristalização utilizadas foram datadas por Archanjo (2009) a partir do método U-Pb com 523 ± 9 para a suíte Meruoca e por Santos et al., (2008) com 532 ± 7 para a suíte Mucambo. Os dados mostram uma história de resfriamento magmático para os corpos graníticos, cuja perda de calor dos plútons, ocorreu até temperaturas do nível crustal onde foram colocados com posterior resfriamento por exumação após um aquecimento que a área sofreu acima dos 240°C, sem vínculo com a granitogênese (GODOY, 2010).

A suíte pós-orogênica Meruoca tem forma traprezoidal e ocupa uma área aproximada de 400 Km², sendo truncada no segmento sudeste pela falha Café-Ipueiras. O contato com o Grupo Jaibaras é do tipo magmático e tectônico. O plúton é constituído por sienogranitos, sienitos de quartzo e granitos de alcalifeldspato com abundantes elementos gráficos e granofílicos (SIAL et al., 1980, ARCHANJO et al., 2009).

O Maciço da Meruoca apresenta facetas triangulares que se parecem com as de uma escarpa de falha recente, especialmente em sua porção nordeste (PEULVAST et al., 2009). A exposição dos quartzitos da Formação São Joaquim (Grupo Martinópole) em ressalto topográfico, a oeste do maciço, reflete a maior resistência litológica das cristas residuais face ao trabalho seletivo da erosão diferencial sob condições semiáridas (SANTOS et al., 2020)

Os eventos tectônicos de soerguimento/exumação do Maciço da Meruoca (Figura 3) como resultante da reativação da falha Café-Ipueiras e do Lineamento Transbrasiliano, torna-se o principal ponto a direcionar o campo das futuras pesquisas através da modelagem de dados termocronológicos aplicada à geomorfologia da área. Desta forma, a aplicação da termocronologia por traços de fissão em apatitas corroboraria para uma melhor elucidação acerca dos efeitos da tectônica rifte e pós rifte sobre os pulsos de reativação crustal que comandaram a evolução do Maciço da Meruoca. Isto para registrar os eventos de soerguimento e exumação das estruturas graníticas entre 0-3 Km na crosta superior em termocronômetros que alcançam isotermas de até 120 ºC.

Esse método possibilitaria inferir também as taxas de denudação no noroeste da Província Borborema, apresentando a idade de exumação de uma superfície pré-siluriana, que estava inumada pela Bacia do Parnaíba antes do recuo das escarpas por circundesnudação, que formou um planalto cuestiforme e uma depressão periférica.

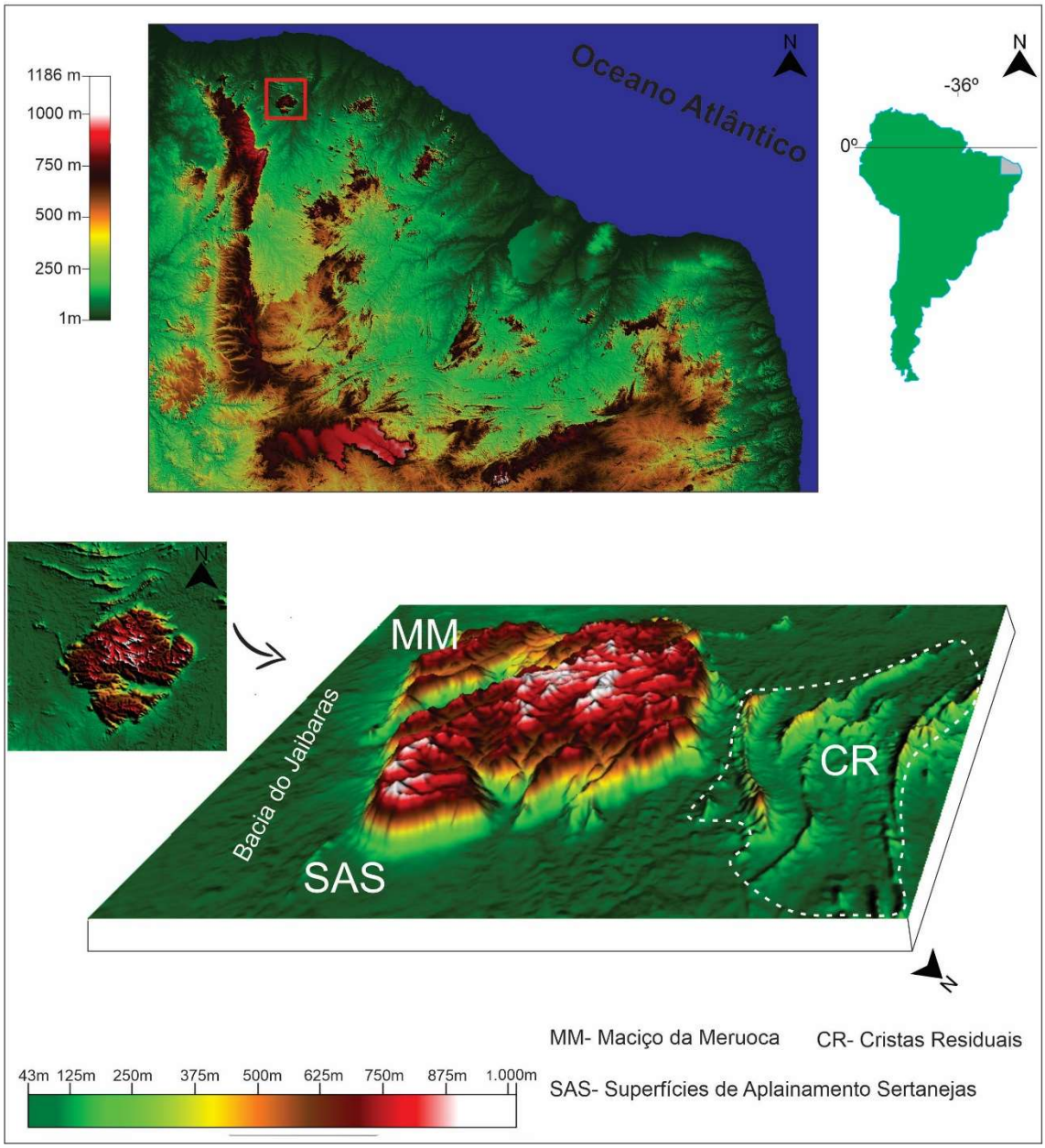

Figura 3. Bloco diagrama esquemático da geomorfologia do Maciço da Meruoca. Fonte: Dados SRTM (2020), elaborado pelos autores.

2.2 Tectônica Rifte e Pós-Rifte e Repercussões Geomorfológicas

A termocronologia por traços de fissão em apatitas representa o melhor termocronômetro aplicado para registrar os pulsos de reativação crustal que ocorreram no Nordeste Setentrional do Brasil em função da abertura da Margem Equatorial Atlântica.

De acordo com o modelo de Dodson (1973), a temperatura em que todos os traços são apagados nos minerais de apatita é de 120°C em média para o tempo geológico. Acima da temperatura de fechamento, os elementos filhos produzidos por decaimento radioativo desaparecem do mineral numa taxa superior do que a de acumulo, à medida que o processo de apagamento ocorre numa velocidade mais rápida do que o surgimento de novos traços. (DORANTI TIRITAN, 2013, SILVA, 2018).

Em apatitas, os traços de fissão sob temperaturas intermediárias entre e 60°C a 120°C são parcialmente apagados ou encurtados, representando uma profundidade média de 0 a 3 km, a depender do grau geotérmico de cada área de estudo. A partir do apagamento total dos traços, há o início de uma nova história térmica, que pode registrar os eventos de magmatismo termal em temperaturas mais elevadas, seguindo-se por episódios de resfriamento, relacionados às reativações rúpteis, soerguimento e exumação de morfoestruturas (HACKSPACHER et al., 2004, 2007, RIBEIRO et al., 2011).

Godoy (2010) identifica idades de 86 ± 12, 115 ± 20 e 118 ± 17 Ma através de traços de fissão em apatitas de amostras do Domínio Médio Coreaú como Granito Mucambo, Formação Pacujá e Formação Aprazível (Bacia do Jaibaras), respectivamente. Esses dados demostram que os eventos de resfriamento mais recentes ocorreram em escala temporal análoga a ruptura final do Gondwana sob temperaturas abaixo de 120 ºC (*annealing* da apatita), no qual a rocha estava sendo exumada entre 3-0 Km.

Os dados de traços de fissão em apatitas disponíveis no Noroeste da Província Borborema expõem a história termal na Suíte Mucambo e Bacia do Jaibaras. Não obstante para inferir as taxas de denudação responsáveis pela remoção da cobertura arenítica da Bacia Parnaíba a partir da exumação de uma superfície pré-siluriana, torna-se necessário estudos mais detalhados em torno do comportamento tectônico do Lineamento Transbasiliano durante o Cretáceo, demarcando os eventos de reativação crustal.

Mojzeszowichz (2009) identifica através de traços de fissão em apatitas idade de 80 ± 8 em uma amostra de granito do arco magmático brasiliano Tamboril Santa-Quitéria, possuindo uma idade próxima da obtida por Godoy (2010) para a Suíte Mucambo. Essas idades registram a exumação dos granitoides sin-tardi-pós brasilianos entre os períodos Coniaciano e Campaniano, revelando o caráter tectônico fortemente atuante na área em resposta a abertura transformante da Margem Equatorial Atlântica.

Mojzeszowichz (2009) ainda estabeleceu idades por meio de traços de fissão em apatitas para as seguintes unidades geológicas do domínio Ceará Central: 105 ± 16 Ma para uma amostra de ortognaisse do Complexo Tamboril-Santa Quitéria; 184 ± 19 para o granito eoarqueano do Complexo Cruzeta (Unidade Pedra Branca) e 122 ± 12 para o granito neoproterozoico da Suíte Intrusiva Itaporanga (Plúton Quixarámobim-Quixadá). Esse conjunto de dados apresenta um evento de resfriamento no limite entre 110 e 90 Ma, que coincide com o estágio de separação final entre América do Sul e África.

O condicionamento tectônico vinculado a reativação das zonas de cisalhamento brasilianas provocou uma rápida movimentação capaz de resfriar os blocos rochosos de temperaturas entre 100 e 120ºC para profundidades menores, onde o gradiente geotérmico variava entre 40 e 70ºC. A amostra mais antiga pertencente ao Complexo Cruzeta apresentou um lento resfriamento desde o Jurássico Inferior de 70ºC até aproximadamente 55ºC, indicando que as outras amostras vinculadas as suítes graníticas brasilianas sofreram um soerguimento ascendente de caráter instantâneo na transição entre Cretáceo Inferior e Superior. No intervalo de 100 e 50 Ma, as temperaturas

aqueceram de 70 para 90ºC sucedido por um resfriamento contínuo desde o Paleoceno até chegar à superfície atual, sob temperaturas de 25 C^{o} (MOJZESZOWICZ, 2009).

Cavalcante (2003) com base em traços de fissão em apatitas de amostras relacionados ao granitóides brasilianos do Complexo Quixadá-Quixeramobim, situadas no entorno dos diques Ceará Mirim e do Lineamento Senador Pompeu, identifica um evento de resfriamento de 120 a 70ºC entre 130 e 90 Ma, equivalente à reativação tectônica e soerguimento regional durante a abertura da Margem Equatorial Atlântica. Há um segundo pulso de resfriamento de 90ºC a 30°C em torno de 30 Ma até o presente. Esse último evento está ligado a flexura marginal do continente em relação a plataforma.

A abertura de riftes intracontinentais que formaram o eixo estrutural Cariri-Potiguar ocorreu no Barremiamo entre 145-120 Ma, O abortamento dos riftes ocorreu no Barremiano entre 120-115 Ma com a formação das bacias Potiguar, Araripe, Iguatu, Icó/Lima Campos e Rio do Peixe. Os depocentros para sedimentação mesozoica foram originados em condições transtensionais a partir da reativação das zonas de cisalhamento brasilianas Senador Pompeu, Orós/Jaguaribe, Portalegre e Patos (MATOS, 2000, SHOBBENHAUS & BRITO NEVES 2003). Essas estruturas possuem planos de deformação orientados na direção NE-SW e E-W, que sugerem lineamentos estruturais positivos e negativos representados por sequências de cristas e vales e trechos retilíneos escarpados, confinando canais de drenagem (SIVA; MAIA, 2017).

Para Bétard e Peulvast (2011), o pulso de resfriamento datado por Cavalcante (2003) entre 130-90 Ma teve repercussão regional no embasamento do Domínio Ceará Centra, coincidindo com duração do *rifting* intracontinental do eixo Cariri-Potiguar. Esse episódio pode estar correlacionado com o soerguimento crustal e a erosão consecutiva do ombro noroeste do Rifte Potiguar durante o período sin-rifte do Cretáceo.

Os vestígios dessas estruturas estão expressos em superfície através da disposição das escarpas do Maciço de Baturité em ressalto topográfico, distando cerca de 50 Km do Lineamento Senador Pompeu (BÉTARD; PEULVAST, 2011).

A Figura 4 expõe a geomorfologia do Maciço de Baturité em relação as superfícies de aplainamento sertanejas remontando a existência de relevos residuais das antigas estruturas brasilianas, soerguidas durante o rifteamento cretáceo. Esse foi o último grande evento tectônico responsável pela reorganização morfoestrutural da área:

Nóbrega et al. (2005) interpreta os processos de reativação tectônica em torno da Zona de Cisalhamento Portoalegre a partir da análise dos traços de fissão em apatitas sobre granitoides neoproterozoicos no contato com bacias mesozoicas interiores. Foram separadas amostras em dois grupos de idades distintas que experimentaram diferentes histórias térmicas entre blocos estruturais em lados opostos da falha geológica (E-W).

As idades de traços de fissão em apatitas datadas por Nóbrega et al. (2005), sugerem que as amostras do bloco oeste possuem idades entre 375 e 140 Ma, apontando um soerguimento gradual com taxas de resfriamento de 225 a 140 Ma, quando há registros de colapso dos blocos sugerindo a ocorrência de uma subsidência térmica ligada a

estruturação das bacias do Rio do Peixe, Icozinho, Pau dos Ferros, Coronel João Pessoa e Gangorra, cujo alçamento das isotermas atinge 90ºC até cerca de 45 Ma.

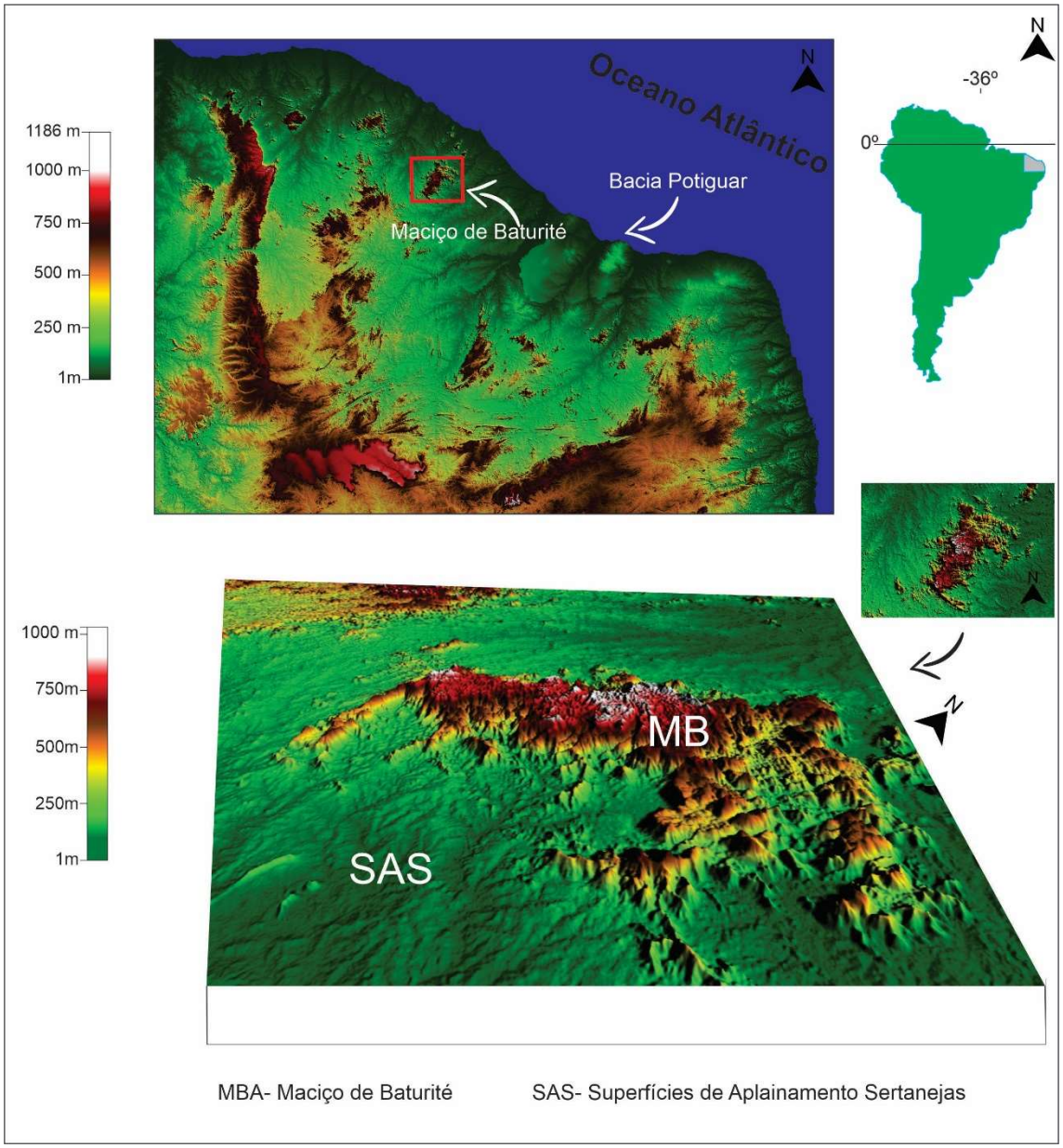

Figura 4. Bloco diagrama esquemático da geomorfologia do Maciço de Baturité. Fonte: SRTM (2020), elaborado pelos autores.

Os dados de Nóbrega et al. (2005) apontam que o bloco leste sofreu um primeiro evento de resfriamento entre 140 e 55 Ma. Isso significa que o bloco leste estava em um nível de crosta mais profunda que 3-4 km antes de 140 Ma, levando em consideração um gradiente geotérmico de 30°C /km. Em torno de 105 Ma ocorreu um resfriamento linear com taxa de soerguimento relativa de 42m/Ma sob gradiente geotérmico de 20ºC/Km.

A exumação e erosão do bloco leste forneceria a fonte para deposição de sedimentos no bloco oeste. À medida que o bloco oeste estava em descendência e o bloco leste em ascendência, o ambiente tectônico tornou-se propício à formação de eixos estruturais que

evoluíram para a instalação das bacias interiores na direção sul e da Bacia Potiguar a norte (NÓBREGA et al., 2005). As paleotemperaturas registradas por Nóbrega et al. (2005) atestam eventos de aquecimento intermediário entre 140 e 45 Ma no bloco a oeste e 55 e 15 Ma no bloco a leste, e acredita-se que este último reflita o vulcanismo do Oligoceno ('Macau'), que ocorreu entre 20-30 Ma na região (PEULVAST et al., 2008).

Morais Neto et al. (2005), a partir da análise dos traços de fissão em apatitas, identifica um evento de resfriamento de 100 a 80ºC nos arenitos da Bacia do Araripe, indicando o soerguimento das escarpas entre 100-90 Ma. As idades estratigráficas da Formação Exu estão em torno de 112-97 Ma, sendo que duas amostras apresentam idades termocronológicas entre 164. 2 ± 21.1 Ma e 131.7± 12.7 Ma, sugerindo que não houve soterramento significativo naquela região e, portanto, as idades por traços de fissão dos sedimentos cretáceos podem representar herança de suas respectivas áreas-fontes.

A topografia da Chapada do Araripe é atribuída, do ponto de vista estrutural, a um período de soerguimento relacionado (ou imediatamente posterior) ao evento de resfriamento do Neocretáceo, iniciado por volta de 100 - 90 Ma. Desta forma, a configuração do relevo atual é vinculada à denudação e a erosão diferencial do Cenozoico cujos efeitos podem estar registrados no evento de resfriamento do Cenozoico entre 40 - 0 Ma com paleotemperaturas de 80 a 70ºC (MORAIS NETO et al., 2005).

A fase rifte das bacias sedimentares mesozoicas do Nordeste Setentrional coincide de forma análoga ao evento de magmatismo toleítico Rio Ceará-Mirim, relacionado ao processo de abertura do Atlântico Equatorial. Ocorre na borda sul da Bacia Potiguar através de um enxame de diques de diabásio de aproximadamente 350 km de comprimento e direção E-W. Na porção leste e central da Bacia do Parnaíba, os diques e soleiras de diabásio da Formação Sardinha são correlacionáveis ao magmatismo da fachada atlântica. (ALMEIDA et al., 1988, MACEDO et al., 2017).

Souza et al. (2004), a partir de datações pelo método 40Ar/39Ar, define uma idade em torno de 132.2 ± 1 Ma para o principal pulso magmático que formou o Enxame de diques Rio Ceará Mirim –diabásios subalcalinos (toleíticos), em parte transicionais a alcalinos, originados por diferentes graus de fusão parcial de granada peridotito.

Souza et al. (2004) datou outros importantes eventos magmáticos da Província Borborema Setentrional: 1) Magmatismo Cuó com idades em torno de 93.1 ± 0.8 Ma. São basaltos alcalinos, restritos a uma ocorrência a leste de Açu (RN). 2) Magmatismo alcalino (basaltos e microgabros), em parte sub-alcalino (basaltos de Boa Vista / PB), com suas ocorrências compondo o que se conhece da literatura como alinhamento Macau – Queimadas, com idades distribuídas entre 70-65 Ma e 9-6 Ma; 3) Magmatismo peralcalino (fonolitos e tefri-fonolitos), que compõe o alinhamento Fernando Noronha – Mesejana, com idades entre 35 e 29 Ma. Esses dados mostram a existência de diversos pulsos pós cretáceos de magmas ao longo do alinhamento Macau – Queimadas.

Conforme Lima (2008), o vulcanismo Macau foi datado a partir de 40Ar/39Ar em óxidos de manganês com idade entre de 24-22 Ma, com intemperização logo após a fase

de extrusão. A continuidade das idades obtidas em um período de 21 a 5 Ma, sugere que essas rochas ficaram expostas continuamente ao intemperismo durante todo o Mioceno.

Morais Neto et al. (2008) obtém idade de 87±10 Ma através de traços de fissão em apatitas para a sequência pós rifte siliciclástica da Bacia Potiguar, a Formação Açu, que possui idade de deposição conforme Pessoa Neto et al., (2007) entre 110-90 Ma,

Os dados revelam um paleossoterramento equivalente à quantidade de seção removida, caso a amostra tenha sido trazida à superfície por erosão das camadas sobrepostas. Simulando um paleossoterramento para a paleotemperatura mínima 80°C; a erosão requerida será de 1.570m e 1.220m, respectivamente, para paleogradientes geotérmicos de 35°C/km e 45°C/km. Estes valores são compatíveis com a espessura sedimentar potencialmente (MORAIS NETO et al., 2005).

Segundo Morais Neto et al. (2008) os dados mostram um evento de resfriamento com temperaturas entre 100-80°C atestando que a Formação Açu foi soerguida para ou próximo à superfície em torno de 75-38 Ma (Campaniano/Neopaleoceno). A ocorrência de um segundo evento de resfriamento nos últimos 15 Ma atingiu paleotemperaturas entre 70° e 55°C, relacionando-se com a erosão subsequente instalada sobre a Bacia Potiguar por alterações climáticas e/ou reativações tectônicas durante o Neocenozoico.

Mojzeszowichz (2009) realizou datações por traços de fissão em apatitas em uma amostra de ortognaisse e outra de granito, ambas da suíte intrusiva paleoproterozoica Jaguaretama, com idades entre 145 ± 16 Ma e 205 ± 33 Ma, respectivamente. Conforme o referido autor, as amostras apresentaram uma trajetória térmica estável próximas de 80ºC durante sua evolução jurássica/cretácea até 110 Ma, inferindo que o nível de base foi estabilizado partir de uma superfície de aplainamento instalada no topo do pacote rochoso. A quebra deste patamar de relativa homogeneidade térmica ocorre dado a um pulso de soerguimento mais expressivo relacionado a um resfriamento entre 110 e 60 Ma.

Na atualidade, o conjunto da área analisada evolui lentamente a partir da ação dominante do intemperismo físico controlado pela existência do clima semiárido, (SANTOS et al., 2020), refletindo as heranças estruturais das reativações cretáceas que reorganizaram o arranjo dos compartimentos de relevo da Província Borborema. Assim, o trabalho da erosão diferencial em torno das zonas de cisalhamento pré-existentes condicionou a exumação de granitóides brasilianos e alinhamentos de cristas, gerando relevos residuais em ressalto topográfico frente às superfícies de aplainamento sertanejas.

2.3 Superfície Sertaneja e as Coberturas Sedimentares Cenozoicas

Morais Neto et al. (2008) considerando os resultados das análises de traços de fissão em apatitas e zircões e variáveis estratigráficas, sugere que a Formação Serra do Martins foi depositada entre 64 e 25 Ma (intervalo Paleoceno – Oligoceno). As idades dos traços de fissão em apatitas estão entre 118±11 Ma e 79±5 Ma. As idades obtidas por meio dos traços de fissão em zircões estão entre 135±18 e 165±40 Ma.

Contudo, Morais Neto et al. (2008) aplicou o método de Galbraith e Green (1990) para corrigir a dispersão de idades em populações de zircões mais jovens, que atingiram

entre 83±5 Ma e 64±5 Ma. Com base nisto, infere-se que a idade deposicional da Formação Serra do Martins não pode ser mais antiga do que a mais nova das duas populações mais jovens identificadas, 64±5 Ma. Assim, a história térmica sugere um evento de resfriamento durante o Neocretáceo/Eopaleogeno, interpretado como exumação da área fonte, cuja erosão forneceu os sedimentos que foram depositados sobre uma extensa superfície de aplainamento regional (Superfície Borborema).

A Superfície Borborema foi datada por Lima (2008) através de análises por U-Th/He em geotitas e 40Ar/39Ar sobre óxidos de manganês oriundos de perfis de intemperismo desenvolvidos sobre as superfícies de aplainamento sertanejas.

Os resultados 40Ar/39Ar apresentaram idades que chegam até 31 Ma, colocando a idade da Superfície Borborema como oligocênica, enquanto os dados de U-Th/He mostraram idades que alcançam até 20 Ma no Mioceno. Não obstante, análises realizadas em pisólitos dentríticos encontrados na Formação Barreiras, interpretados como provenientes do desmantelamento de um perfil de intemperismo da Província Borborema, indicam uma idade mínima de 43 Ma estendendo-se até o Eoceno (LIMA, 2008).

Lima (2008) através de U-Th/He em geotitas indica a idade de deposição Formação Serra dos Martins em torno de 20 Ma. Os dados U-Th/He em geotitas e 40Ar/39Ar em óxidos de manganês de Lima (2008), contribuem para determinar que os perfis de intemperismo da Formação Serra dos Martins passaram por uma história prolongada de dissolução-precipitação, estendendo-se por quase todo Mioceno em até 7 Ma. Conforme Maia et al., (2016) essas interpretações corroboram com o trabalho de Luz et al., (2015) ao sugerir que denudação pós-cretácea do Maciço da Borborema teria fornecido os arenitos e conglomerados paleógenos para as unidades sedimentares da FSM.

A Formação Serra dos Martins recobre parcialmente o topo dos maciços de Portoalegre e Martins (Figura 5) através de arenitos laterizados, formando platôs sedimentares que apresentam topografias planas e suavemente onduladas. Os dois blocos estruturais foram elevados como expressões geomorfológicas das suítes intrusivas Itaporanga e Poço Santa Cruz, individualizados por vales incisos de direção NE-SW, seguindo os *trends* estruturais da zona de cisalhamento Portoalegre (MAIA et al., 2016).

Lima (2008) a partir de U-Th/He em geotitas e 40Ar/39Ar em óxidos de manganês ainda datou o Grupo Barreiras em torno de 23-17 Ma nesse setor do Nordeste, sugerindo que o platô da Borborema estava em processo erosional desde o Mioceno.

As análises 40Ar/39Ar em perfis de intemperismo mais rasos identificam a evolução de uma superfície de aplainamento sertaneja mais recente em torno de 1,5 Ma entre o segmento oriental da Província Borborema e a da Bacia Potiguar (LIMA, 2008).

Em termos geomorfológicos, a Formação Barreiras se expressa em superfície através de tabuleiros costeiros que estão posicionados à retaguarda da Planície Litorânea. Conforme Souza (2000), apresenta-se e como um típico glacis de acumulação com níveis altimétricos que variam desde 80-100m até o nível do mar. Mergulham através de rampas suaves em direção ao litoral, com declives que não ultrapassam 5º. A continuidade da área de exposição se perde em direção ao interior. Afloram como manchas dispersas

comprovando que a cobertura já chegou a ter uma maior abrangência espacial com alguns testemunhos no médio Jaguaribe, Médio Baixo Acaraú, Quixadá, entre outros locais.

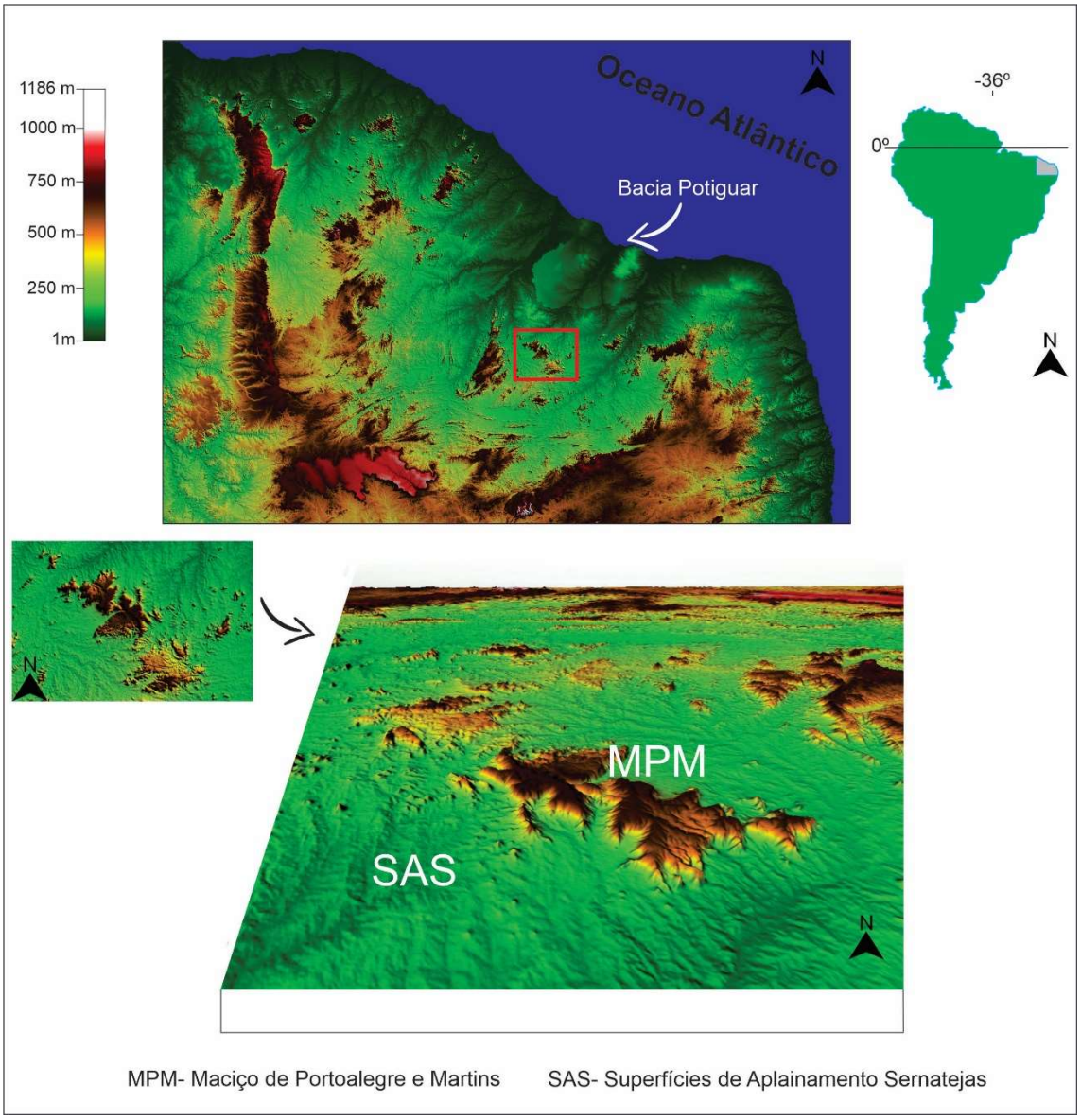

Figura 5. Bloco diagrama esquemático da geomorfologia dos maciços de Portoalegre e Martins. Fonte: SRTM, (2020), elaborado pelos autores.

Lima (2008), através de 40Ar/39Ar em óxidos de manganês, identificou condições climáticas quentes e úmidas com eventos em torno de 28, 10, 5,5 e 1,5 Ma, sugerindo que o intemperismo químico foi intenso entre o Mioceno Médio e o Pleistoceno.

Os recentes avanços das datações por U-Th/He em minerais supergênicos de geotitas (SHUSTER et al. 2005) e Ar39/Ar40 em óxidos de manganês, corroboraram para melhor decifrar as crono-correlações entre perfis de intemperismo e o desenvolvimento de superfícies de erosão e de agradação (LIMA, 2008)

Esses métodos se constituem como as principais ferramentas para avaliar as taxas de precipitação de minerais supergênicos em perfis de intemperismo, mensurando os

efeitos das variações paleoclimáticas do Cenozoico sobre o modelado dinâmico do relevo. Assim, as informações sobre a natureza, gênese e distribuição dos regolitos, além das associações de várias unidades de regolito com a topografia e com as litologias intemperizadas, são importantes condicionantes a ser considerados no posicionamento crono-estratigráfico de coberturas sedimentares de idades cenozoicas (LIMA, 2008).

3. CONCLUSÃO

Os dados de termocronologia por traços de fissão em zircão (GODOY, 2010) e Ar39/40Ar em anfibólio (MOURA, 2017) são importantes para interpretar os eventos de estruturação da crosta, que alcançaram termocronômetros, capazes de mensurar os efeitos da exumação e colapso de orógenos brasilianos como áreas fontes para a formação de bacias sedimentares neoproterozoicas/paleozoicas sob isotermas superiores a 200ºC.

Não obstante, as taxas de erosão que esculpiram as formas de relevo do Nordeste Setentrional são heranças diretas das reativações cretáceas e variações climáticas do Quaternário. Assim, a aplicação dos métodos supracitados possui limitações para os estudos geomorfológicos por alcançarem histórias térmicas que remontam a estruturação da Província Borborema a cerca de 6 km de profundidade na crosta. Para tanto, esses dados são relevantes para entender como as faixas de deformação brasilianas controlam a evolução do relevo a partir das zonas de cisalhamento de direção NE/SW e E-W.

A termocronologia por traços de fissão em apatitas avança no campo do conhecimento geomorfológico como importante metodologia que possibilita melhor interpretar a evolução da paisagem. Esse sistema termocronológico demarca nos termocronômetros eventos entre 3-0 Km da crosta, sendo mais sensível para registrar as reativações tectônicas do Cretáceo e as taxas de denudação/exumação do Cenozoico.

Os trabalhos de Cavalcante (2006) e Morais Neto et al., (2006) delinearam dados de termocronologia por traços de fissão em apatitas para mensurar os efeitos da reativação crustal das zonas de cisalhamento brasilianas da Província Borborema e bacias intracratônicas do Nordeste Setentrional. Os resultados indicam um evento de resfriamento da crosta no limite entre o Cretáceo Inferior e Superior, demarcando o soerguimento e a erosão subsequente dos maciços centrais do Ceará e da Bacia do Araripe em escala temporal análoga à abertura da Margem Equatorial Atlântica.

Além disso, o trabalho de Lima (2008) estabeleceu combinações entre os métodos Ar40/Ar39 em óxidos de manganês e U-Th/He em geotitas para melhor explicar a história do intemperismo e posicionamento de perfis lateríticos da Superfície Borborema, contribuindo para preencher a lacuna das idades dos depósitos sedimentares afossilíferos das formações Barreiras e Serra dos Martins, ambos datados com idades neógenas.

Esses dados demarcam nos termocronômetros, os eventos envolvidos na evolução geomorfológica do Nordeste Setentrional como a exumação de maciços graníticos, inversão topográfica de planaltos sedimentares, além da deposição das coberturas cenozoicas que formaram platôs sedimentares embutidos sobre a cimeira dos Maciços de Portoalegre e Martins e dos tabuleiros ao longo da fachada pré-litorânea.

Assim, os avanços no campo da termocronologia irão permitir conjecturar a evolução geomorfológica do Nordeste Setentrional com os eventos estruturais de grande repercussão regional, afim de delinear os efeitos da tectônica meso-cenozoica no soerguimento do relevo e na retomada erosiva a partir de um novo nível de base regional.

Em termos de perspectivas futuras, a termocronologia de baixa temperatura pode ser aplicada para calcular as taxas de denudação que elaboraram às superfícies de aplainamento sertanejas do Nordeste Setentrional, preenchendo uma importante lacuna, que ainda não está totalmente esclarecida pela comunidade geomorfológica.

Agradecimentos

Ao Programa de Pós Graduação em Geografia da Universidade Federal do Ceará (UFC) e a Capes pela concessão da bolsa de Doutorado para o financiamento da pesquisa. Ao Departamento de Petrologia e Metalogenia da Universidade Estadual Paulista (UNESP) pela colaboração científica para o desenvolvimento da pesquisa em termocronologia.

Referências Bibliográficas

AB' SABER, A. N. O relevo brasileiro e seus problemas. **Brasil: a terra e o homem. Sao Paulo: Companhia Ed. Nacional**, 1964.

AB' SABER, A. N. Um conceito de Geomorfologia a serviço das pesquisas sobre o Quaternário. In: **Geomorfologia**, 18, São Paulo, IGEOG-USP, p. 1-23.1969.

ALMEIDA, F. F. M, CARNEIRO, C. D. R., MACHADO JR, D. D. L., & DEHIRA, L. K. Magmatismo pós-Paleozóico no nordeste oriental do Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, 18(4), 451-462. 1988.

ARCHANJO, C. J; LAUNEAU, P; HOLLANDA, M. H. B. M., MACEDO, J. W. P. Scattering of magnetic fabrics in the Cambrian alkaline granite of Meruoca (Ceará State, northeastern Brazil). **International Journal of Earth Sciences**. 98: 1793-1807.2009.

ARTHAUD M.H; CABY, R.; FUCK, R. A; DANTAS, E. L; PARENTE, C. V. Geology of the northern Borborema Province, NE Brazil and its correlation with Nigeria, NW Africa. **Geological Society, London, Special Publications**. 294(1), 49-67.2008.

ARTHAUD M.H; FUCK, R. A; DANTAS, E. L; SANTOS, T. J. S; CABY, R; ARMSTRONG, R. The Neoproterozoic Ceará Group Ceará Central Domain, NE Brazil: Depositional age and provenance of detrital material. New insights from U-Pb and Sm-Nd geochronology. **Journal of South American Earth Sciences**. 58.p. 223-237. 2015.

BETARD, F; PEULVAST, J. P. Evolução Morfoestrutural e Morfopedológica do Maciço de Baturité e seu Piemont: do Cretáceo ao Presente In BASTOS, F. H. (Org). **Serra de Baturité: Uma visão integrada das questões ambientais**. Fortaleza: Expressão Gráfica e Editora. p. 35-59. 2011.

BIGARELLA, J. J; ANDRADE, G. D. Contribution to the study of the Brazilian Quaternary. **Geol Soc Spec Publ**. v. 84, p. 433-51. 1965.

BIGARELLA, J. J; MOUSINHO, M. R. Slope development in southeastern and southern Brazil. **Zeitschrift für Geomorphologie**. v. 10, p. 150-160. 1966.

BRANDÃO, R. L; FREITAS, L. C. B **Geodiversidade do estado do Ceará**. Programa de Geologia do Brasil. Levantamento de Geodiversidade. Fortaleza: CPRM. 214 p. 2014.

BRASIL, Serviço Geológico do Brasil (CPRM) **Projeto Arim (Áreas de Relevante Interesse Mineral) Província Borborema**: Projeto NW do Ceará. 2015.

CASTRO, D. L; BEZERRA, F. H; SOUZA M. O; FUCK R. A. Influence of Neoproterozoic tectonic fabric on the origin of the Potiguar Basin, northeastern Brazil and its links with West Africa based on gravity and magnetic data. **Journal of Geodynamics**. 54, 29-42. 2012

CAVALCANTE, A. S. A. **Evolução termocronológica do sistema de falhas Senador Pompeu, CE**. (Dissertação de Mestrado) Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Ciências Exatas e da Terra. Programa de Pós Graduação em Geodinâmica e Geofísica. Natal. p. 53. 2006.

CLAUDINO-SALES, V. **Megageomorfologia do Noroeste do Ceará**: História da Paisagem Geomorfológica. Verlag/ Editora. Novas Edições Acadêmicas, 2016.

CORDANI, U.G.; TEIXEIRA, W.; D´AGRELLA, M.S.; TRINDADE, R.I. The position of the Amazonian Craton in supercontinents. **Gondwana Research**. v. 15, p. 396-407. 2009.

DELGADO, I. D. M; SOUZA, J. D; SILVA, L. D; SILVEIRA FILHO, N. D; SANTOS, R. A. D; PEDREIRA, A. J; LACERDA FILHO, J. D. Geotectônica do escudo atlântico. **Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil**. 5, 227-334. 2003.

DODSON, M. H. Closure temperature in cooling geochronological and petrological systems. **Contributions to Mineralogy and Petrology**. 40(3), 259-274. 1973

DONELICK, R. A.; O'SULLIVAN, P. B.; KETCHAM, R. A. Apatite fission-track analysis**. Reviews in Mineralogy and Geochemistry**. v. 58, n. 1, p. 49-94. 2005.

DORANTI-TIRITAN, C. **Evolução geomórfica e modelagem termocinemática 3D da região do planalto de Poços de Caldas (SP/MG)**. (Tese de Doutorado) Programa de Pós Graduação em Geologia Regional. Universidade Estadual Paulista. Rio Claro. 138p. 2013.

FLEISCHER, R. L.; PRICE, P. B.; WALKER, R. M. Ion explosion spike mechanism for formation of charged-particle tracks in solids. **Journal of applied Physics**.v. 36, n. 11, p. 3645-3652. 1965.

FUCK, R. A; DANTAS, E. L; VIDOTTI, R. M., ROING, H. L; ALMEIDA, T. Deformação intracontinental em sistemas transcorrentes: O caso do Lineamento Transbrasiliano: geometria, idade e significado. **XIV Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos** (SNET). 1. 2013.

GALBRAITH, R. F.; GREEN, P. F. Estimating the component ages in a finite mixture. **International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part D. Nuclear Tracks and Radiation Measurements**. v. 17, n. 3, p. 197-206. 1990.

GARCIA, M. G. M; PARENTE, C. V; SILVA FILHO, W. F; ALMEIDA, A. R. Age of magmatic events in the Eopaleozoic Jaibaras Basin, NE Brazil: Constraints from U-Pb zircon geochronology. **Journal of South American Earth Sciences**, 84, 113-126. 2018.

GODOY, D. F. **Evolução termocronológica por traços de fissão em apatita e zircão das Bacias da Transição Proterozóico-Fanerozoico de Camaquã (RS), Castro (PR), Eleutério (SP/MG), Jaibaras e Cococi (CE**). (Tese de Doutorado). Programa de Pós

Graduação em Geologia Regional. Universidade Estadual Paulista. Rio Claro, 2010. (pp. 129).

HACKSPACHER, P. C; GODOY, D. F., RIBEIRO, L. F. B., HADLER-NETO, J. C., FRANCO, A. O. B. Modelagem térmica e geomorfologia da borda sul do Cráton do São Francisco: termocronologia por traços de fissão em apatita. **Revista Brasileira de Geociências**, 37 (suplemento), 76-86. 2007.

HACKSPACHER, P. C; RIBEIRO, L. F. B; RIBEIRO, M. C. S.; FETTTER, A. H., HADLER NETO, J; TELLO, C. E. S; DANTAS, E. L.). Consolidation and break-up of the South American platform in southeastern Brazil: tectonothermal and denudation histories**. Gondwana Research**. *7*(1), 91-101.2004

HASUI, Y. A Sistema Orogênico Borborema in HASUI, Y; CARNEIRO, C. D. R; ALMEIDA, F. F. M; BARTORELLI, A. **Geologia do Brasil**- São Paulo: Beca, 2012 p. 248-288

LIMA, M. G. **História do Intemperismo na Província Borborema Oriental, Nordeste do Brasil: Implicações Paleoclimáticas e Tectônicas**. (Tese de Doutorado). Universidade Federeal do Rio Grande do Norte. Programa de Pós Graduação em Geodinâmica e Geofísica. Natal. p.251. 2008

LUZ, R. M. N; JULIÁ, J; NASCIMENTO, A. F. Crustal structure of the eastern Borborema Province, NE Brazil, from the joint inversion of receiver functions and surface wave dispersion: Implications for plateau uplift. **Journal Geophysical Research Solid Earth**, 120, 2015

MABSOONE, J. M; CASTRO, C. Desenvolvimento geomorfológico do Nordeste Brasileiro. **Boletim do Núcleo Geográfico da Sociedade Brasileira de Geologia**. v. 3, p. 3-5. 1975.

MACEDO, A. A; HOLLANDA, M. H., ARCHANJO, C. J; CASTRO, D. L; MELO, A. C. C. A. **Província Magmática do Atlântico Equatorial (EQUAMP), NE do Brasil** In XVI Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos. 2017 Salvador - BA – Brasil

MAIA, R. P. **Geomorfologia e Neotectônica no Vale do Rio Apodi-Mossoró.** (Tese de Doutorado). Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica. PPGG – UFRN. Natal, RN, 2012.

MAIA, R. P; BÉTARD, F; BEZERRA, F. H. Geomorfologia dos maciços de Portalegre e Martins–NE do Brasil: Inversão do relevo em análise. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. v. 17, n. 2. 2016.

MAIA, R. P; BEZERRA, F. H. R. Condicionamento estrutural do relevo no Nordeste setentrional brasileiro. **Mercator-Revista de Geografia da UFC**. v. 13, n. 1, p. 127-141. 2014b

MAIA, R. P; BEZERRA, F. H. R. **Tópicos de Geomorfologia Estrutural** – Nordeste Brasileiro. Fortaleza: Edições UFC, 2014a

MATOS, R. M. D. Tectonic evolution of the equatorial South Atlantic. **Atlantic Rifts and continental margins**. p. 331-354.2000

MCHONE, J. G. Non-plume magmatism and rifting during the opening of the Central Atlantic Ocean. **Tectonophysics.** 316, 287-296.2000

MOHRIAK, W. U. Bacias sedimentares da margem continental Brasileira in BIZZI, L. A. SHOBBENHAUS, C. VIDOTTI, R. M. GONÇALVES, J.H **Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil**, 2003. v 3, p. 87-165, 2003.

MOJZESZOWICZ, A. G**. Evolução da tectônica rúptil no nordeste do Brasil baseada na termocronologia por traço de fissão em apatita** (Trabalho de Conclusão de Curso). Universidade Estadual Paulista. Instituto de Geociências.p64. 2009

MORAIS NETO, J. M; GREEN, P. F., KARNER, G. D; ALKIMIM, F. F. D. Age of the Serra do Martins Formation, Borborema Plateau, northeastern Brazil: constraints from apatite and zircon fission track analysis. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v 16 p. 23-52. 2008.

MORAIS NETO, J. M; HEGARTY, K.; KARNER, G. D. Abordagem preliminar sobre paleotemperatura e evolução do relevo da bacia do Araripe, Nordeste do Brasil, a partir da análise de traços de fissão em apatita. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, v. 14, p. 113-119, 2005.

MOURA, A. C. D. A. **Datação 40 Ar/39 Ar em zonas de cisalhamento ao longo do Lineamento Transbrasiliano: evolução e reativação.** (Tese de Doutorado) Programa de Pós Graduação em Geologia. Universidade de Brasília. 2007, p 116.

NÓBREGA, M. A; JARDIM SÁ, M; BEZERRA, F. H. R; NETO, J. H; LUNES P. J; GUEDES, S; LIMA-FILHO, F. P. The use of apatite fission track thermochronology to constrain fault movements and sedimentary basin evolution in northeastern Brazil. **Radiation Measurements**, 39(6), 627-633.2005.

NOVAIS, F. G; BRITO NEVES, B. B; KAWASHITA, K. Reconhecimento cronoestratigráfico na região Noroeste do Ceará. In: **SBG, Simposio de Geologia do Nordeste**. 1979. p. 91-110.

OLIVEIRA, D. C; MOHRIAK, W. U. Jaibaras trough: an important element in the early tectonic evolution of the Parnaıba interior sag basin, Northern Brazil. **Marine and Petroleum geology**, v. 20, n. 3-4, p. 351-383, 2003.

PEDROSA, N. C; VIDOTTI, R. M; FUCK, R. A; BRANCO, R. C.; ALMEIDA, A. R.; SILVA, N. C. V; BRAGA, L. R**.** Architecture of the intracontinental Jaibaras Rift, Brazil, based on geophysical data. **Journal of South American Earth Sciences**, *74*, 27-40. 2017

PESSOA NETO, O. D. C; SOARES, U. M; SILVA, J. D., ROESSNER, E. H., FLORENCIO, C. P; SOUZA, C. D. Bacia Potiguar. **Boletim de Geociências da Petrobrás,** *15*(2), 357-369. 2007.

PEULVAST, J. P; BÉTARD, F LAGEAT, Y. Long-term landscape evolution and denudation rates in shield and platform areas: a morphostratigraphic approach. **Géomorphologie: relief, processus, environnement**, v. 15, n. 2, p. 95-108, 2009.

PEULVAST, J. P; BÉTARD, F. **Landforms and landscape evolution of the equatorial margin of Northeast Brazil: an overview**. Springer, 2015.

PEULVAST, J.P.; CLAUDINO-SALES, V. Reconstruindo a evolução de uma margem continental passiva: um estudo morfogenético do Nordeste brasileiro. In SILVA, J. B da.; LIMA, L. C, ELIAS, D (Orgs*)* (2006). **Panorama da Geografia Brasileira I.** São Paulo: Annablume, p. 277-317, 2006.

PEULVAST, J.P.; CLAUDINO-SALES, V. Stepped surface sand palaeolandforms in the northern Brazilian Nordeste: constraints on models of morphotectonic evolution. **Geomorphology**62, p. 89-122. 2004.

PEULVAST, J.P.; CLAUDINO-SALES, V.; V; BÉTARD, F; GUNNELL, Y. Low post-Cenomanian denudation depths across the Brazilian Northeast: implications for long-term

landscape evolution at a transform continental margin. **Global and Planetary Change**. *62*(1-2), 39-60. 2008.

RAMOS, V. A; VUJOVICH, G; MARTINO, R; OTAMENDI, J. Pampia: a large cratonic block missing in the Rodinia supercontinent. **Journal of Geodynamics**, 50(3-4), p.243-255. 2010.

RAPELA, C.W; PANHKRUST B. R.J; CASQUET C, C; FANNING D, C.M; BALDO, E.G.; GONZÁLEZ-CASADO F, J.M; GALINDO C. C; DAHLQUIST, J. The Río de la Plata craton and the assembly of SW Gondwana**. Gondwana Earth-Science Reviews** 83, 49–82. 2007.

RIBEIRO, M. C. S; HACKSPACHER, P. C; RIBEIRO, L. F. B; NETO, J. C. H. Evolução Tectônica e Denudacional da Serra do Mar (SE/BRASIL) no limite entre o Cretáceo Superior e Paleoceno, utilizando análises de Traços de Fissão e U-Th/He em Apatitas. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, 12. 2011.

SANTOS, F. L. A; NASCIMENTO, F. R; CLAUDINO-SALES, V. Ciclo dos supercontinentes e reflexos morfoestruturais no Noroeste do Ceará/Brasil. **Ateliê Geográfico**, v. 14, n. 2, p. 67-90, 2020.

SANTOS, T. J. S; FETTER, A; HACKSPACHER, P. C; VAN SCHMUS; NOGUEIRA NETO, J. A. Neoproterozoic tectonic and magmatic episodes in the NW sector of Borborema Province, NE Brazil, during assembly of Western Gondwana. **Journal of South American Earth Sciences**. 25. p. 271-284. 2008

SHOBBENHAUS, C; BRITO NEVES, B. B. A Geologia do Brasil no Contexto da Plataforma Sul-Americana in BIZZI, L. A. SHOBBENHAUS, C. VIDOTTI, R. M. GONÇALVES, J.H. **Geologia Tectônica e Recursos Minerais do Brasil**.CPRM, Brasília. p 5-25. 2003.

SHUSTER, D. L; VASCONSELOS, P. M; HEIM, J. A; & FARLEY, K. A. Weathering geochronology by (U-Th)/He dating of goethite. ***Geochimica et Cosmochimica Acta***. *69* (3), 659-673. 2005.

SIAL, A. N.; FIGUEIREDO, M. C. H; LONG, L. E. Rare-earth element geochemistry of the Meruoca and Mucambo plutons, Ceará, northeast Brazil. **Chemical Geology**, v. 31, p. 271-283, 1980.

SIAL, A. N.; LONG, L. E. Mineral chemistry and stable isotope geochemistry of the Cambrian Meruoca and Mucambo plutons, Ceará, Northeast Brazil. In: **International symposium on granites and associated mineralizations (ISGAM), Salvador, Brazil**. p. 185-188. 1987.

SILVA M. B; MAIA R. P. CARACTERIZAÇÃO MORFOESTRUTURAL DO ALTO CURSO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO JAGUARIBE, CEARÁ-BRASIL. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, 18(3).2017

SILVA, B. V. D. **Evolução termocronológica da região à leste da bacia offshore do Namibe, Angola, por meio de traço de fissão e (U-Th)/He em apatitas. (Dissertação de Mestrado).** Programa de Pós Graduação em Geologia Regional. Universidade Estadual Paulista. Rio Claro. p.125. 2016

SOUZA, M. J. N. Bases naturais e esboço de zoneamento geoambiental do estado do Ceará. In: LIMA, L. C., SOUZA, M. J. N., MORAES, J. O. (orgs.). **Compartimentação territorial e gestão regional do estado do Ceará.** Fortaleza: Editora FUNECE, 2000.

SOUZA, M. J. N. Contribuição ao estudo das unidades morfoestruturais do Estado do Ceará. **Revista de Geologia** (nº 1). Fortaleza: Edições Universidade Federal do Ceará, 1988.

SOUZA, Z. S., VASCONSELOS, P. M; NASCIMENTO, M. A. L; SILVEIRA, F. V., PAIVA, H. S; SILVEIRA DIAS, L. G., OLIVEIRA, R. **Geocronologia e geoquimica do Magmatismo Cretácico a Terciário no NE do Brasil**. In *Anais do XLII Congresso Brasileiro de Geologia*. 2004.

SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) **Projeto Topodata**. Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Disponível em http://www.dsr.inpe.br/topodata/ . Acesso em 22 de Setembro de 2020.

TAGAMI, T. Zircon fission-track thermochronology and applications to fault studies. **Reviews In Mineralogy & Geochemistry**, 58, 95-122. 2005.

TAGAMI, T; MURAKAMI, M; Sondagem de heterogeneidade da zona de falha na falha de Nojima: Restrições da análise de traços de fissão de zircão de amostras de poços. **Tectonophysics**. v. 443, n. 3-4, pág. 139-152, 2007.

TORRES, P. F. M., CAVALCANTE, J. C., SMITH, E. P., VASCONSELOS, A. M., OLIVEIRA, F.V. 2010. **Mapa geológico da Folha Quixadá (B-24-V-C-VI)**, CPRM-SBG – Serviço Geológico do Brasil, Fortaleza-CE, Escala 1:250.000.

UCHOA, E. B; ROMARIZ, D. C; MAGINI, C; MIRIANDA, M. P. Modelagem Prospectiva Mineral com Base em Lógica Fuzzy: Avaliação do Distrito Ferrífero de Quiterianópolis/CE. **Anuario do Instituto de Geociencias**, *43*(2).2020

VAUCHEZ, A; NEVES, S; CABY, R; CORSINI, M; EGYDIO-SILVA, M., ARTHAUD, M; AMARO, V. The Borborema shear zone system, NE Brazil. **Journal of South American Earth Sciences,** *8*(3-4), 247-266. 1995.

VAZ, P. T.; REZENDE, N. G. A. M.; WANDERLEY FILHO, J. R. e TRAVASSOS, W. A. S. Bacia do Parnaíba. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, v. 15, n. 2, p. 253-263. 2007.