

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

PROVENIÊNCIA DOS ARENITOS DA BACIA POTIGUAR
UTILIZANDO U/Pb E Lu/Hf EM ZIRCÃO DETRÍTICO

ANDERSON BAESSO

ORIENTADOR: Prof. Dr. Marcus Vinicius Dorneles Remus

Porto Alegre, 2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

**PROVENIÊNCIA DOS ARENITOS DA BACIA POTIGUAR
UTILIZANDO U/Pb E Lu/Hf EM ZIRCÃO DETRÍTICO**

ANDERSON BAESSO

ORIENTADOR: Marcus Vinicius Dorneles Remus

BANCA EXAMINADORA

Léo Afraneo Hartmann – Professor Emérito, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Miguel Angelo Stipp Basei – Centro de Pesquisas Geocronológicas, Universidade de São Paulo

Rosalia Barili da Cunha – Instituto do Petróleo e dos Recursos Naturais, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

Dissertação de mestrado apresentada
como requisito parcial para a obtenção
do Título de Mestre em Ciências.

Porto Alegre, 2021

CIP - Catalogação na Publicação

Baesso, Anderson
Proveniência dos Arenitos da Bacia Potiguar
Utilizando U/Pb e Lu/Hf em Zircão Detritico / Anderson
Baesso. -- 2021.
85 f.
Orientador: Marcus Vinicius Dorneles Remus.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa
de Pós-Graduação em Geociências, Porto Alegre, BR-RS,
2021.

1. Proveniência . 2. Bacia Potiguar . 3. Zircão .
I. Remus, Marcus Vinicius Dorneles, orient. II.
Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Agência Nacional do Petróleo por financiar este projeto e pela bolsa de pesquisa e à Universidade Federal do Rio Grande do Sul pelo ensino de qualidade e infraestrutura para pesquisa.

Agradeço ao meu orientador, professor Marcus Vinicius Dorneles Remus, pela oportunidade de fazer parte deste projeto, pela paciência e por me ensinar a sempre se concentrar na solução dos problemas. Agradeço aos colegas de projeto, pelo tempo e pelas orientações que me permitiram desenvolver esse estudo da melhor forma possível. Agradeço a minha colega Brenda, pela parceria ao longo da graduação e do mestrado.

Agradeço a minha família, pelo apoio e por ir mantendo a lida em casa enquanto estive em Porto Alegre. Por fim, agradeço aos meus amigos, por me acompanharem ao longo dessa jornada.

RESUMO

A Bacia Potiguar, localizada no nordeste do Brasil, é uma importante produtora de petróleo e gás tanto em sua porção onshore como na porção offshore. Os arenitos das Formações Pendência e Alagamar (seção rifte e pós-rifte) são importantes rochas reservatório dessa bacia. Essas formações não afloram em superfície, sendo conhecidas apenas através de sísmica e testemunhos de sondagem. No presente trabalho foi utilizado zircão detrítico de amostras de quatro poços a fim de determinar a proveniência de arenitos das seções rifte e pós-rifte da bacia, refinando o conhecimento dessas rochas e como ferramenta auxiliar na busca por reservatórios de qualidade. Foram analisados 2062 grãos de zircão de 21 amostras para determinação da idade U-Pb. Os resultados representados em gráficos de distribuição de probabilidade mostraram importantes populações de idades no Paleoproterozoico (2,20 – 2,00 Ga e 1,90-1,70 Ga) e no Neoproterozoico (0,62 – 0,55 Ga), correspondentes ao ciclo Brasileiro-Pan Africano. Essas idades são compatíveis com idades encontradas em rochas do embasamento adjacente a bacia, sugerindo como prováveis áreas fontes dos sedimentos as rochas da parte norte da Província Borborema. Sessenta e uma análises de Lu-Hf de quatro amostras de zircão detrítico de um poço selecionado mostraram valores de ϵ_{Hf} variando de 7,67 a -25,43, indicando a contribuição de fontes juvenis e crustais, condizente com valores descritos na literatura para rochas da Província Borborema. Além disso, nos zircões detríticos brasileiros foi observado um *trend* com valores de ϵ_{Hf} mais positivos, nos grãos mais antigos, passando para valores mais negativos, nos zircões mais jovens, refletindo uma evolução típica de um ambiente de arco passando para colisão continental na área fonte. Variações verticais na distribuição de idades são observadas em três poços, provavelmente refletindo mudanças no padrão de dispersão de sedimentos que acompanharam a evolução da bacia em suas fases iniciais. São observadas diferenças significantes nas amostras de poços localizados a sudeste do sistema de *horsts* e *grábens* de direção nordeste em relação às amostras dos poços a noroeste, que indicam fontes distintas para esses dois segmentos da bacia e, possivelmente, diferente qualidade dos reservatórios. Considerando-se a presença de terrenos metamórficos de mais alto grau na área-fonte das rochas no segmento noroeste da bacia em relação ao segmento sudeste, espera-se encontrar reservatórios de melhor qualidade a noroeste do sistema de *grábens*.

Palavras-chave: Proveniência, Bacia Potiguar, zircão, Lu-Hf.

ABSTRACT

The Potiguar Basin located in northeastern Brazil is an important gas and petroleum producer on the onshore as well as on the offshore portion of the Brazilian coast. The arenites of Pendência and Alagamar Formations (rift and post-rift sections) are two of the principal reservoir rocks of this basin. These formations do not outcrop in surface, and information about them are known through seismic and survey testimonies. In this work we used detrital zircon of samples from four wells to determine the provenance of arenites from rift and post-rift sections of the basin, refining the knowledge about these rocks and as a tool to help on the search for quality reservoirs. We analyzed 2062 zircon grains of 21 samples to determine the U-Pb age. The results showed three important populations on the Paleoproterozoic (2.20 – 2.00 Ga and 1.90 – 1.70 Ga) and on the Neoproterozoic (0.62 – 0.55 Ga). These ages are compatible with ages found on rocks of the adjacent basement, suggesting that the probable source areas for the sediments were the rocks of the northern part of Borborema Province. Sixty-one Lu-Hf analysis on zircons of four samples from one well showed values of ϵ_{Hf} varying from 7.67 to -25.43, indicating the contribution of juvenile and crustal materials on the generation of such grains, and befitting with values described for Borborema Province rocks on literature. Besides that, the grains of Neoproterozoic age show positive ϵ_{Hf} values trending to negative values, reflecting an evolution typical of arc environments evolving to continental collision on the source area. Vertical variations on the age distribution patterns were observed in three wells, probably reflecting changes on the dispersion sediment patterns that followed the basin evolution in its initial stages. We also observed significant differences between the samples of the wells located southeastern of the grabens/horsts system northeast oriented and the samples of the wells located at northwest, indicating distinct source areas for the sediments of these two segments of the basin and, possibly, different reservoir quality. Considering the presence of high-grade metamorphic terrains in the source area of the northwest segment in relation to the source area of the southeast segment, is expected to find better quality reservoirs at northwest of the grabens/horsts system.

Key-words: Provenance, Potiguar Basin, zircon, Lu-Hf.

Sumário

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 4 |
| 2. REVISÃO CONCEITUAL..... | 5 |
| 2.1. Estudos de proveniência utilizando zircão detrítico..... | 5 |
| 2.2. Transporte de minerais pesados | 12 |
| 2.3. Bacias Rifte | 12 |
| 2.4. Proveniência de sedimentos em bacias rifte..... | 14 |
| 3. MATERIAIS E MÉTODOS | 15 |
| 3.1. Revisão bibliográfica e elaboração de mapas temáticos | 15 |
| 3.2. Separação de minerais pesados | 15 |
| 3.3. Imageamento com Microsonda Eletrônica de Varredura (catodoluminescência) | 16 |
| 3.4. Datação U/Pb..... | 16 |
| 3.5. Análise Lu/Hf..... | 17 |
| 4. CONTEXTO GEOLÓGICO | 17 |
| 4.1. Bacia Potiguar | 17 |
| 4.2. Embasamento | 19 |
| 4.2.1. Escudo Nigeriano..... | 21 |
| 4.2.2. Província Borborema | 22 |
| 5. RESUMO DOS RESULTADOS, INTERPRETAÇÕES E DISCUSSÕES | 26 |
| 6. CONCLUSÕES..... | 29 |
| 7. REFERÊNCIAS | 30 |
| 8. ARTIGO CIENTÍFICO..... | 42 |

1. INTRODUÇÃO

A Bacia Potiguar (BP) é uma bacia marginal brasileira, localizada no nordeste do Brasil (Figura 1). A bacia é composta por uma porção onshore e uma offshore, com áreas de, respectivamente, 26.700 Km² e 195.400 Km², separada da Bacia do Ceará a oeste pelo Alto de Fortaleza e da Bacia do Pernambuco a leste pelo Alto de Touros. O embasamento da BP é formado pelas rochas pré-cambrianas da Província Borborema, que limita a bacia a sul. Sua origem está relacionada à quebra do Supercontinente Gondwana e abertura do Oceano Atlântico, no início do Cretáceo, responsável pela geração de bacias rifte nos limites entre os continentes Africano e Americano, que posteriormente evoluíram para se tornar bacias de margem passiva.

O uso de zircão detrítico como indicador de proveniência sedimentar tem sido empregado em diversos trabalhos (e.g. ANDERSEN, 2005; BRUGUIER et al., 1997; DEGRAAFF-SURPLESS et al., 2002; Košler et al., 2002; RAINBIRD et al., 2001; SIRCOMBE, 1999) nas últimas décadas, permitindo fazer considerações sobre a evolução da bacia em que se encontram, padrões de dispersão de sedimentos, área fonte, correlação estratigráfica, paleodrenagem, sistemas deposicionais atuantes e qualidade de reservatório (OLIEROOK et al., 2019; WANG et al., 2018). Desse modo, esses estudos podem apresentar informações úteis para a indústria de hidrocarbonetos, além das informações de interesse científico.

Na porção emersa da BP afloram apenas rochas das unidades mais recentes, de modo que a obtenção de informações sobre as rochas pertencentes às unidades mais antigas fica restrita a informações indiretas (métodos geofísicos) e de furos de sondagem e amostras de calha. Assim, o emprego de métodos tais como determinação da proveniência a partir de minerais pesados pode fornecer importantes informações sobre essas rochas. No entanto, não foram realizados estudos de proveniência em rochas da seção rifte (Fms. Pendência e Pescada) e da seção pós-rifte (Fm. Alagamar), apesar de duas dessas formações (Pendência e Alagamar) apresentarem reservatórios de petróleo.

Sendo assim, o objetivo desse trabalho é identificar a proveniência dos sedimentos das seções rifte e pós-rifte da Bacia Potiguar em quatro poços (Figura 1)

através de idades U-Pb e razões Lu-Hf em zircão detrítico visando determinar as prováveis áreas fontes de sedimentos e, a partir disso, fazer considerações a respeito da evolução da bacia, padrões de drenagem atuantes e qualidade de reservatório das rochas dessa importante bacia da margem brasileira.

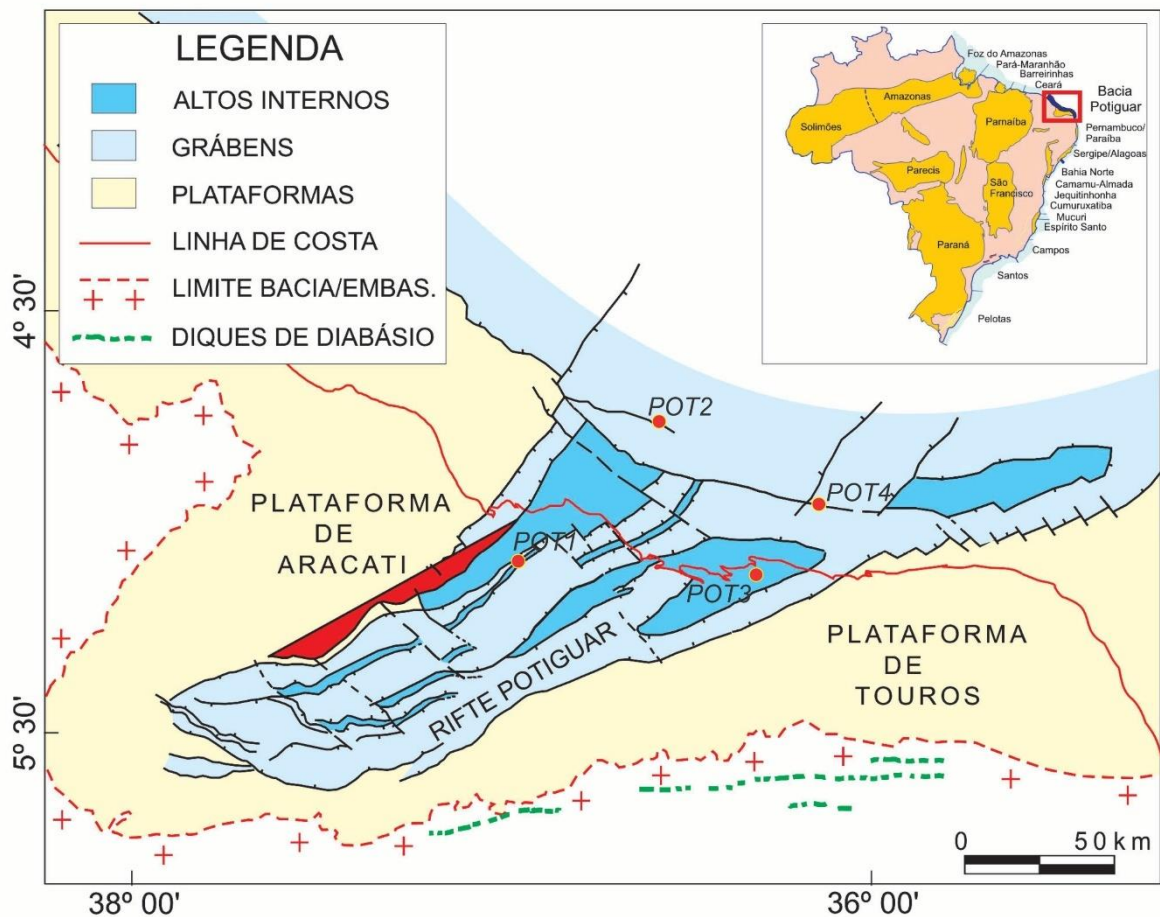


Figura 1: Localização da Bacia Potiguar e poços estudados. Retirado e modificado de SOARES e ROSSETI, 2005 e CREMONINI et al., 1996.

2. REVISÃO CONCEITUAL

2.1. Estudos de proveniência utilizando zircão detrítico

A evolução do uso do zircão detrítico como ferramenta em estudos de proveniência passou de um método com uso aparentemente restrito para uma ferramenta quase indispensável em estudos que buscam correlacionar sedimentos

com suas áreas fonte principalmente como resultado de desenvolvimentos tecnológicos que permitiram datar grandes quantidades de grãos individuais de forma eficiente (GEHERLS, 2011).

O que torna o zircão uma ferramenta tão importante para estudos de proveniência é a combinação entre sua resistência ao intemperismo e a presença de quantidades significativas de U que sua estrutura admite. O sistema U-Pb apresenta dois sistemas de decaimento ($^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb}$ e $^{235}\text{U} \rightarrow ^{207}\text{Pb}$) com meia vida apropriada para uso em todo o tempo da Terra, exceto o período mais recente. Além disso, o isótopo ^{204}Pb é não radiogênico, e pode ser usado para determinar a presença de Pb no cristal quando de sua formação e as duas séries de decaimento estão ligadas pois a razão $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ é aproximadamente constante em todas as rochas crustais, o que permite plotar as idades em um diagrama Concórdia (Figura 2). A incerteza presente nas idades obtidas é variável entre as séries de decaimento, sendo que para amostras mais jovens as idades obtidas pela série $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ são as mais precisas, enquanto para amostras mais antigas as idades mais precisas são obtidas pela razão $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$. Se uma análise plota sobre a reta no diagrama Concórdia, a análise é dita concordante. Do contrário, ela é dita discordante, o que geralmente é causado por perda de Pb durante atividade termal/hidrotermal ou por herança de um material mais antigo.

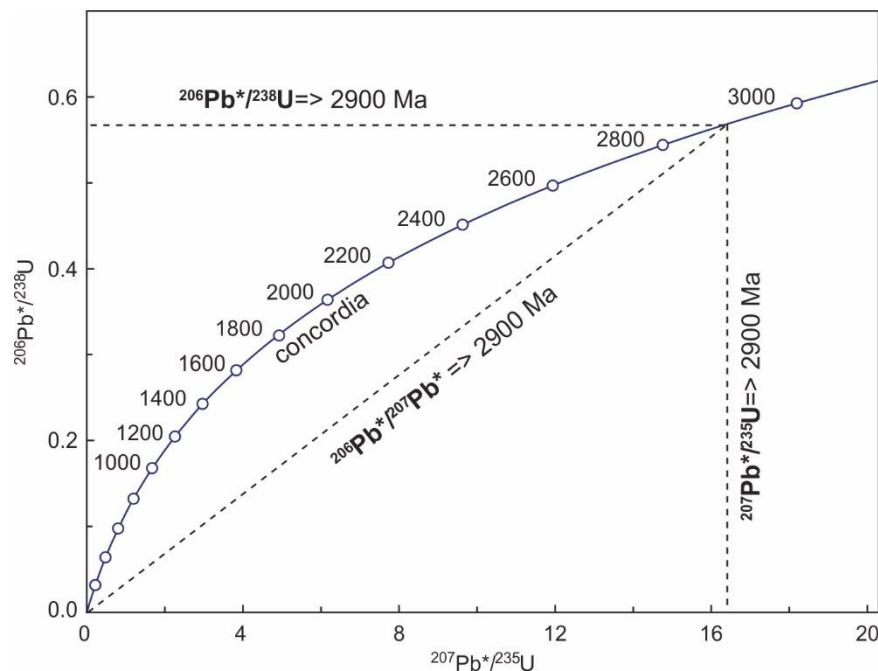


Figura 2: Exemplo de diagrama Concórdia (Retirado de GEHERLS, 2011).

O uso do zircão para definição da área fonte dos sedimentos é aplicado comparando as idades obtidas em uma determinada população de zircões com as idades das possíveis rochas fontes. Um depósito sedimentar provavelmente terá componentes de diversas fontes como consequência de múltiplos episódios magmáticos em um mesmo local, justaposição tectônica de terrenos com idades distintas, mistura pela confluência de diferentes drenagens e/ou reciclagem de sedimentos antigos, de modo que, para caracterizar todos os componentes da área fonte, todas as idades dentro de uma população de zircão devem ser determinadas (THOMAS, 2011). A partir da fórmula de probabilidade binomial padrão, ANDERSEN (2005) *apud* GEHERLS (2011) mostrou que 60 análises são necessárias para ter 95% de probabilidade de identificar um componente que representa 5% dos grãos. 117 análises são necessárias para ter 95% de probabilidade de identificar cada componente que representa 5% dos grãos (VERMEESCH, 2004 *apud* GEHERLS, 2011). Uma abordagem inicial utilizada na maioria dos estudos de proveniência é realizar ~100 análises, embora essa abordagem não permite identificar todos os componentes menores de uma amostra com certeza (GEHERLS, 2011).

A interpretação da área fonte a partir das idades U/Pb no zircão é feita correlacionando as idades obtidas na amostra com idades encontradas nas áreas que potencialmente serviram de fonte para esses sedimentos. Isso implica que a eficácia do método vai depender da localização das litologias de diferentes idades nas possíveis áreas fontes e da distribuição de idades em diferentes terrenos. Por exemplo, se um evento geológico que produziu zircão, como magmatismo, ocorreu em todas as possíveis áreas fontes, teremos registro desse evento no zircão detrítico, mas será impossível especificar de qual área vieram esses grãos. Por outro lado, potenciais áreas fontes compostas por terrenos com história geológica significativamente distinta permitem identificar facilmente quais terrenos serviram de fonte.

Mais recentemente tem sido utilizado o sistema Lu/Hf em zircão para obter interpretações mais robustas das áreas fontes (e.g. IIZUKA *et al.*, 2010; CANILE, 2015; VELVOORT e KEMP, 2016). A partir da análise em um *spot* do grão, que pode ser no mesmo local onde foi realizada a análise U-Pb, são obtidos valores de ϵ_{Hf} e idades modelo que representam a idade de extração de um determinado magma do manto, ou seja, um evento de formação de crosta. A correlação entre esses dados e dados dos terrenos fontes permitem aperfeiçoar as interpretações das áreas fontes.

O método baseia-se no decaimento do ^{176}Lu para ^{176}Hf ao longo do tempo e no fracionamento entre Lu e Hf no tempo geológico. Os episódios de fusão parcial no manto causam o fracionamento entre esses dois elementos já que o Hf é mais incompatível que o Lu, levando a um enriquecimento proporcional de Hf na crosta. Assim, um manto residual com uma razão Lu/Hf maior que um magma gerado pela sua fusão parcial vai, pelo processo de decaimento do ^{176}Lu para ^{176}Hf , ter uma quantidade maior do isótopo ^{176}Hf com o passar do tempo do que o magma e as rochas formadas a partir dele, que possuem uma quantidade menor de Lu. Desse modo, com o passar do tempo e geração de ^{176}Hf , a razão $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ vai aumentando mais rapidamente no manto depletado do que nas rochas crustais. Essa relação entre o manto condrítico, manto depletado e crosta é mostrada na Figura 3:

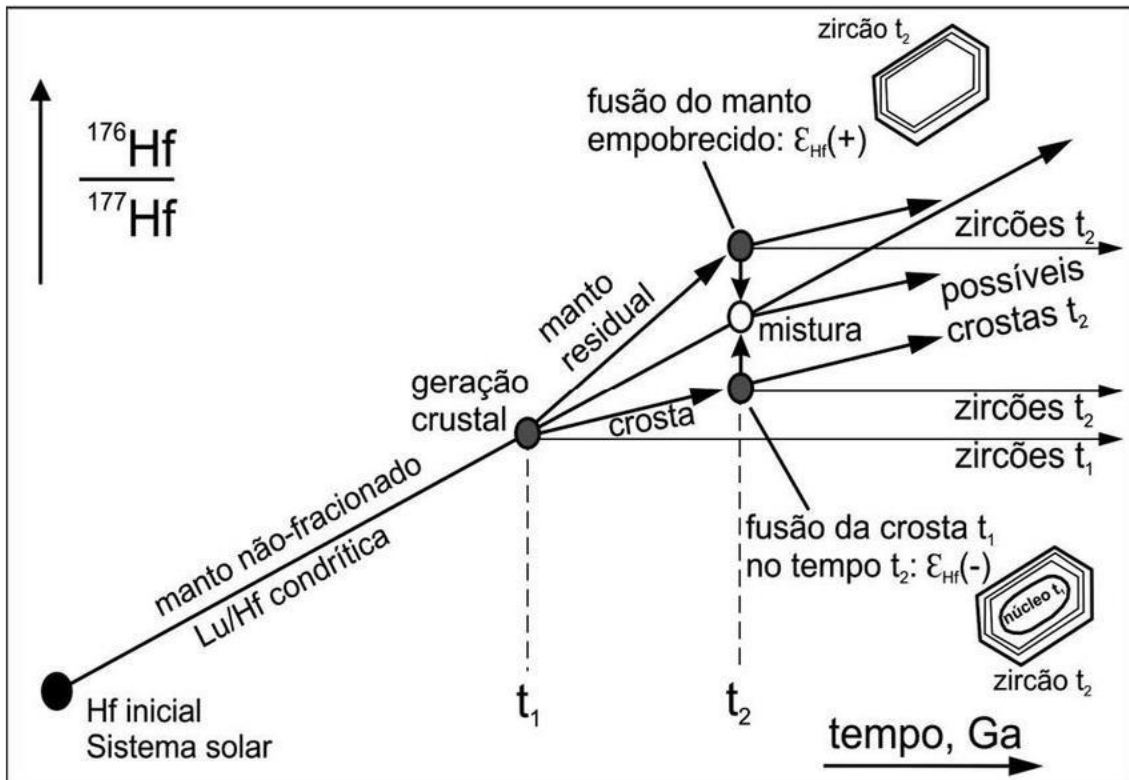


Figura 3: Variação na razão $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ no manto não-depletado, no manto depletado e na crosta ao longo do tempo (retirado de NETO et al., 2017, KINNY e MAAS, 2003 e PATCHETT et al., 1981), supondo um episódio de fusão parcial do manto em t_1 resultando em diferentes caminhos de evolução isotópica do Hf para a crosta gerada (baixa razão Lu/Hf) e manto residual (alta razão Lu/Hf). No tempo t_2 , várias possíveis fontes podem contribuir para a geração da nova crosta. Notar que a razão isotópica de Hf no zircão é considerada como sendo igual à do meio quando o cristal se formou; isso porque a quantidade de Hf gerada por decaimento de Lu dentro do cristal de zircão é desconsiderada para esses fins.

O zircão aceita quantidades consideráveis de Hf em sua estrutura cristalina, mas muito pouco Lu. Assim, é assumido que a razão isotópica $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ presente em um cristal de zircão equivale à razão isotópica presente no meio a partir do qual o mineral cristalizou, refletindo a contribuição de material crustal e juvenil nesse meio.

Além das análises das idades U-Pb e Lu-Hf, outros métodos tem sido empregados em zircão, como isótopos de O (e.g. CANILE *et al.*, 2016), e elementos traço (e.g. BELOUSOVA *et al.*, 2002; GRIMES *et al.*, 2007). A utilização de isótopos de O indica se o magma do qual foi gerado o zircão era juvenil, híbrido ou crustal, podendo indicar também se o zircão teve origem hidrotermal. Assim, essas técnicas podem ser utilizadas em estudos de proveniência ao correlacionar as informações do registro detrítico com as das possíveis áreas fontes. Quanto ao uso de elementos traço, GRIMES *et al.* (2007) definiram campos que separam zircões cristalizados em crosta continental ou oceânica, e BELOUSOVA *et al.* (2002) definiram diversos campos para carbonatitos, sienitos, kimberlitos e outras rochas ígneas.

Características dos grãos de zircão, como morfologia e textura interna também fornecem informações úteis na identificação das áreas fontes. Tratando-se de um mineral muito resistente, o zircão pode sobreviver a vários ciclos de transporte e sedimentação, o que se reflete em um grau de arredondamento maior dos grãos. A morfologia e textura interna dos grãos, observada em catodoluminescência, permite identificar se um grão é ígneo ou metamórfico, se há núcleo herdado e, em alguns casos, até mesmo o tipo de magma (toleíticos e aluminosos, por exemplo) no qual o zircão foi formado (CORFU *et al.*, 2003; PUPIN, 1980) (Figura 4).

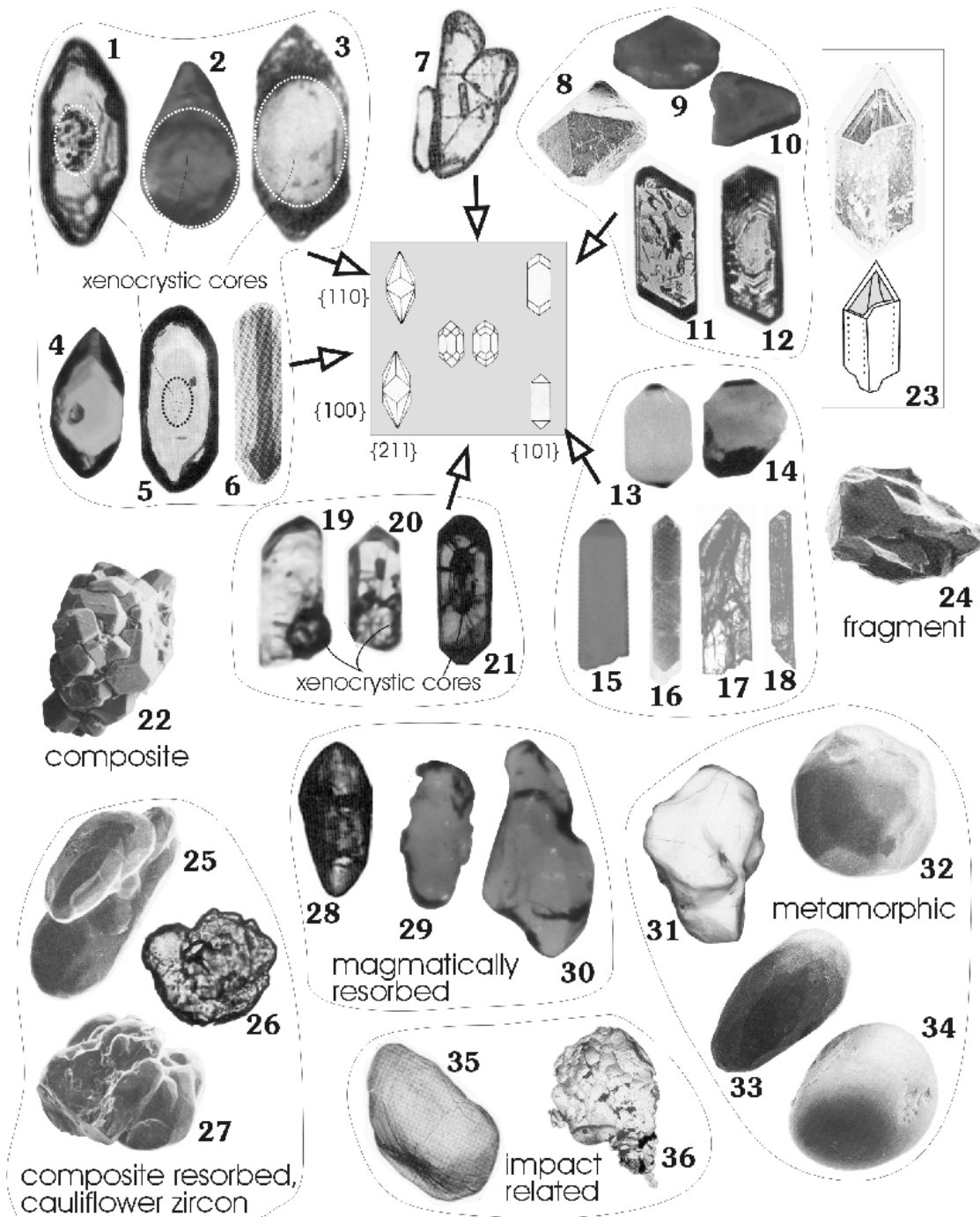


Figura 4: Variações morfológicas externas de diversos grãos de zircão. Retirado de CORFU et al., 2003.

MOECHER e SAMSON (2006) apontaram algumas considerações que devem ser levadas em conta ao interpretar dados obtidos a partir de zircão detrítico para estudos de proveniência:

- Quantidade limitada de zircão cristalizado a partir de magmas pouco saturados em Zr. Como consequência, a população de zircões no sedimento pode apresentar poucos zircões com essa idade, ou mesmo nenhum.
- Em alguns casos as condições termoquímicas de um terreno não foram adequadas para a cristalização de zircão, podendo causar o mesmo viés mencionado no item anterior.
- Metamorfismo regional, exceto as fácies anfíbolito superior a granulito geralmente não resetam o relógio cronológico do zircão, resultando que rochas fontes metamórficas de baixo a médio grau não são representados no registro de idades do zircão detrítico.
- O registro detrítico pode ser dominado por zircão novo ou herdado de terrenos com litologias muito ricas em zircão.

De acordo com MOECHER e SAMSON (2006), são feitas diversas suposições quando da interpretação das idades obtidas para os zircões de uma dada amostra, tais como: os detritos de todas as potenciais áreas fontes tem a mesma probabilidade de chegar na bacia; o número de idades definindo uma moda na distribuição de idades obtida pela análise dos zircões é proporcional a quantidade de detritos dessa idade; a quantidade de zircão gerado em um evento tectonometamórfico foi suficiente para ser selecionada e analisada pelo método; a região do grão datada é representativa do terreno do qual esse grão foi erodido; a amostragem de cada tipo de zircão foi randômica, de modo que usar as proporções relativas de cada idade reflete o volume relativo das potenciais áreas fontes. Todas essas suposições podem acabar resultando em vieses na interpretação. Por exemplo, é comum que zircões mais antigos (Paleoproterozoicos a Arqueanos) se apresentem mais alterados ou metamictizados, resultando em datações discordantes, conseqüentemente reduzindo a população de grãos dessa idade em comparação com as demais. Isso introduz um erro na amostragem, mesmo que a separação dos zircões tenha sido feita corretamente de forma aleatória. Desse modo, a ausência de zircões de determinadas idades pode significar que uma determinada área não foi fonte para os sedimentos que foram amostrados, mas também pode ser resultante de um número inadequado de análises ou amostragem não aleatória de modo que a comparação entre diferentes fontes pela quantidade de idades obtidas deve ser tomada com cuidado

(VERMEESCH, 2012). Ainda assim, o uso de zircão detrítico para interpretação de proveniência é praticável e essencial (THOMAS, 2011).

2.2. Transporte de minerais pesados

Devido ao contraste de densidade entre minerais pesados e partículas mais leves (quartzo e feldspato, predominantemente), além de tamanho e formato de grão, minerais pesados são menos facilmente colocados em movimento por ondas ou correntes, levando a um transporte diferencial entre esses minerais, o que leva a formação de *lags* de minerais pesados concentrados que, eventualmente, podem formar placers (KOMAR, 2007). O contraste de densidade entre diferentes minerais pesados pode levar a deposição de quantidades diferentes de cada um deles, o que pode levar a problemas na interpretação dos terrenos fontes dos sedimentos ou paleoambiente de deposição (KOMAR, 2007).

Dentro da sua rocha fonte os minerais pesados tem tamanhos semelhantes aos de cristais de quartzo e feldspato, mas em sedimentos gerados a partir dessas rochas o tamanho dos grãos de minerais pesados tende a ser significativamente menor. Essa diferença deve ser levada em conta ao se utilizar esses minerais em estudos de proveniência. Duas abordagens comumente são usadas para minimizar esse efeito: uma baseada na seleção de um intervalo de tamanho de grão para análise, e a outra utilizando o procedimento analítico de Gazzi-Dickinson (GARZANTI *et al.*, 2009).

2.3. Bacias Rifte

A formação de bacias rifte tem sido alvo de grande interesse da comunidade científica, tanto pelas características peculiares de tais bacias, sua posição no contexto de quebra de continentes e pela sua relação com importantes reservas de petróleo. A partir de estudos de bacias rifte atuais e antigas, diversos modelos geotectônicos (escala de bacia) e estruturais, estratigráficos e sedimentológicos (escala de modelo de fácies) tem sido propostos, buscando explicar os padrões tectônicos e de preenchimento de tais bacias.

Segundo BOSENCE (1998), os modelos geotectônicos de formação de bacias rifte foram classificados por SENGOR e BURKE (1978) em modelos de cisalhamento puro, de cisalhamento simples e alongamento heterogêneo para riftes passivos e modelos de riftes ativos.

No modelo de Meio-Gráben (escala de modelo de fácies) as bacias rifte apresentam zonas de polaridade diferente (BOSWORTH, 1985 *apud* BOSENCE, 1998). Essas zonas de mergulho diferente são separadas por zonas de acomodação estruturais, e falhas de transferência ligam falhas extensionais adjacentes (Figura 5 A) (GIBBS, 1984; *apud* BOSENCE, 1998). Há um controle estrutural tridimensional na sedimentação que evolui com o tempo à medida que os limites de falhas se propagam, o meio-gráben subsidir e a área da *footwall* soergue, tornando-se áreas fontes locais para sedimentos clásticos (BOSENCE, 1998).

A topografia no estágio sin-rifte é controlada pela propagação das falhas extensionais, geometria da superfície de falha, magnitude do deslocamento da falha, zonas de transferência e de acomodação e variação no mergulho dos meio-grábens, de modo que bacias hidrográficas terão uma relação complexa e variável com a estrutura, além do padrão de drenagem herdado (BOSENCE, 1998). Na fase mais tardia do sin-rifte e na fase pós-rifte a topografia será reduzida pela erosão das áreas de *footwall* e sedimentação nas áreas de *hangingwall* e zonas de acomodação (Figura 5 B e C).

Incursoes marinhas em bacias rifte podem ocorrer em qualquer estágio, e são controladas pela subsidência, eustasia, topografia pré-rifte e localização da mesma em relação a bacias marinhas (BOSENCE, 1998). O soergimento das ombreiras do rifte (área de *footwall*) pode direcionar a drenagem para longe do rifte, como ilustrado na Figura 5 D.

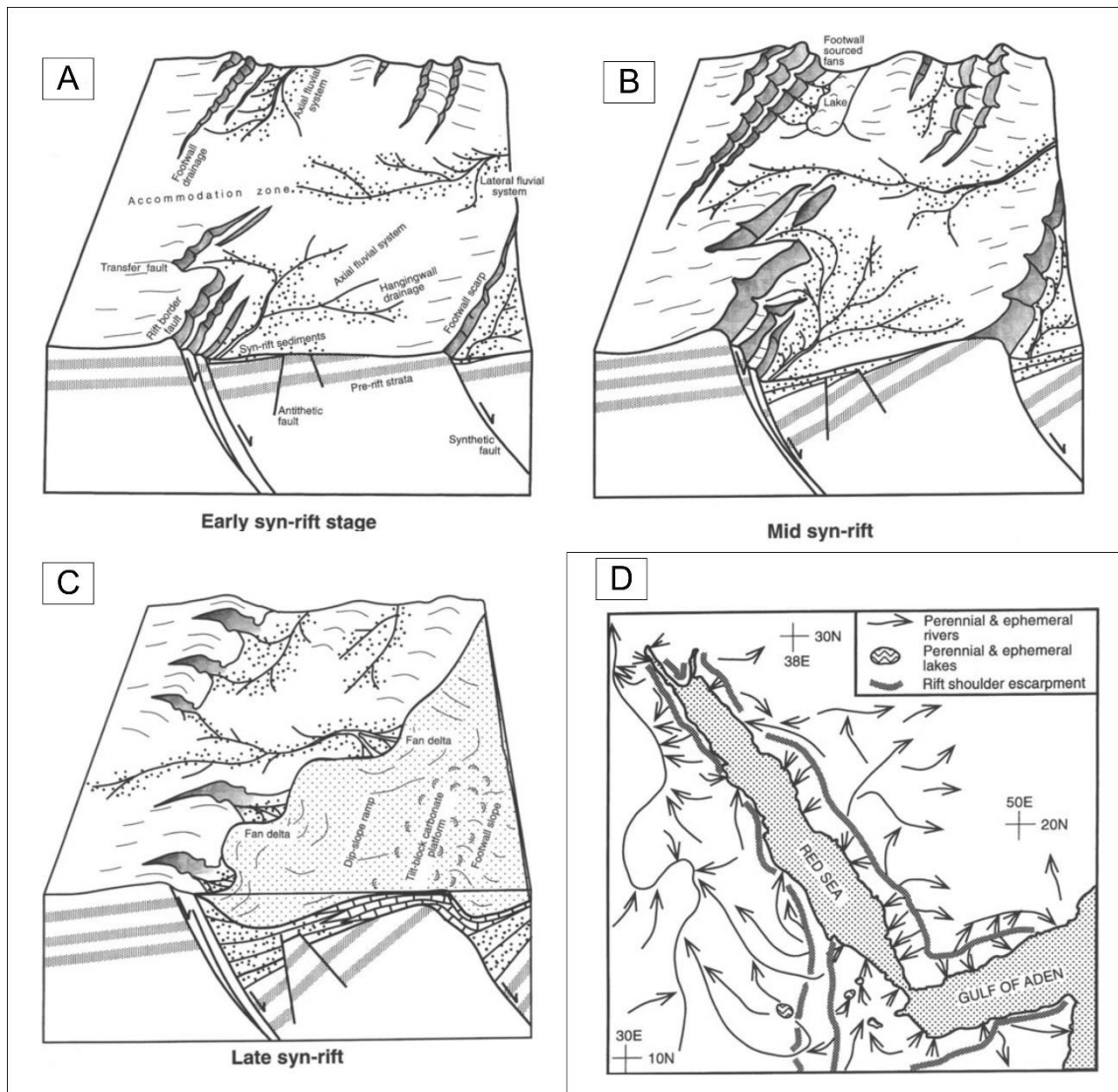


Figura 5 A, B e C: modelo de evolução de rifte (retirado e modificado de BOSENCE, 1998). D: Padrão de drenagem atual no entorno do Mar Vermelho e Golfo de Suez mostrando o afastamento da drenagem das ombreiras do rifte (FROSTICK e REID, 1989 *apud* BOSENCE, 1998).

2.4. Proveniência de sedimentos em bacias rifte

OLIEROOK *et al.* (2019) apresentaram um estudo a respeito do controle tectônico sobre a proveniência sedimentar em bacias rifte, utilizando como estudo de caso a Bacia de Perth, no oeste da Austrália. Os autores concluíram que a direção de extensão controla os principais terrenos fontes que serão drenados axialmente através da bacia e a taxa de extensão controla o aporte de detritos dos terrenos das ombreiras do rifte para o eixo, com maior proporção desses detritos durante os

períodos de extensão mecânica da bacia enquanto nas fases de subsidência termal a contribuição desses terrenos é negligenciável. Os autores também mencionam que nos períodos de maiores taxas de extensão mecânica a proximidade da margem do rifte vai determinar a proporção relativa entre detritos derivados lateralmente ou axialmente. A Bacia de Potiguar apresenta, além do componente extensional, um componente transcorrente, que deve ter influenciado na disposição das áreas fontes e na distribuição dos sedimentos dentro da bacia.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Revisão bibliográfica e elaboração de mapas temáticos

Foi realizada uma revisão da literatura (livros, artigos, teses, dissertações, bancos de dados públicos) apresentando (1) outros trabalhos de proveniência utilizando zircão detrítico como principal *proxy* ou como um dos *proxies* utilizados, (2) informações a respeito da Bacia Potiguar e bacias no entorno, (3) evolução de bacias rifte, (4) a Província Borborema, principalmente informações sobre a geocronologia da área e (5) o Escudo Nigeriano. A partir dos dois últimos foram criados mapas geocronológicos que serviram de base para as discussões e interpretações obtidas.

3.2. Separação de minerais pesados

Foram separadas e analisadas 21 amostras de rocha de quatro poços distintos, sendo dois localizados na porção onshore e dois na porção offshore da Bacia Potiguar. As amostras de calha já se encontravam desagregadas quando chegaram ao laboratório, de modo que foi feita secagem das amostras em estufa, quarteamento e peneiramento separando para análise a fração areia fina (0,250 mm) a muito fina (0,062 mm). Em seguida foi feita descarbonatação das amostras utilizando ácido clorídrico, separação por densidade utilizando bromofórmio ($\rho=2,89 \text{ g/cm}^3$) e, por fim, separação magnética em Separador Magnético Isodinâmico Frantz com amperagem entre 1,0 A até 1,5 A. Esses procedimentos foram realizados no Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Após isso, foi realizada a catação dos grãos de zircão desse concentrado em lupa binocular, e colagem dos mesmos em uma pastilha (*mount*). As pastilhas foram então polidas com pasta de diamante para expor o interior dos grãos. A catação dos grãos, montagem e polimento foi realizada no Laboratório de Termocronologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

3.3. Imageamento com Microsonda Eletrônica de Varredura (catodoluminescência)

O imageamento das amostras é realizado previamente a datação dos grãos a fim de observar as texturas dos zircões, presença de inclusões e fraturas de modo a direcionar a análise para porções dos grãos mais limpas e/ou que representem um evento de interesse (bordas dos grãos em relação a um núcleo herdado, por exemplo). O imageamento das amostras foi realizado, em parte, no Laboratório de Geologia Isotópica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e, em parte, no Laboratório de Microscopia e Microanálises da Universidade Federal de Ouro Preto.

3.4. Datação U/Pb

A datação das amostras foi realizada utilizando um espectrômetro de massa *Element 2 Thermo Finnigan* acoplado a um laser *Laser Photom-Machines* 193 nm (LA-SF-ICP-MS) no Laboratório de Geoquímica Isotópica da Universidade Federal de Ouro Preto. Os dados foram obtidos com medição de *background* de 20 segundos, *zircon ablation* de 20 segundos e diâmetro de *spot* de 30 micrômetros. Buscou-se analisar sempre que possível as bordas dos grãos. Os dados isotópicos foram reduzidos no *software* GLITTER. O método envolve subtração do gás em branco seguido da correção do fracionamento *downhole*, comparado com o comportamento dos zircões de referência BB (SANTOS *et al.*, 2017), Gj-1 (JACKSON *et al.*, 2004; MOREL *et al.*, 2008) e Plesovice (SLÁMA *et al.*, 2008). A correção do Pb comum foi realizada, quando necessário, utilizando o modelo composicional de STACEY e KRAMERS (1975). Os dados foram processados utilizando o macro para Excel *Isoplot 3.00* (LUDWIG, 2003). Análises com mais de 10% de discordância foram descartadas, e foram consideradas as idades de $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ para idades maiores que 1.0 Ga e de $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ para idades menores.

3.5. Análise Lu/Hf

Após análise dos dados de U-Pb observou-se em quase todas amostras uma população de zircões com idades brasileiras em ~ 0.6 Ga. A fim de discriminar as possíveis fontes desses grãos, foram realizadas análises Lu-Hf em 61 grãos de zircão com idades brasileiras, em um total de quatro amostras. As análises Lu-Hf também foram realizadas no Laboratório de Geologia Isotópica da Universidade Federal de Ouro Preto, utilizando os mesmos padrões que as análises U-Pb, mais o padrão Mudtank (WOODHEAD e HERGT, 2005). As análises foram realizadas em MC-ICP-MS *Thermo Finnigan Neptune*, acoplado a um sistema de laser *HelEx Photon Machine*, em *spots* de 40 μm , com um tempo de ablação de 60 segundos. Foi utilizada a constante de decaimento do ^{176}Lu de $1.867 \times 10^{-11}/\text{ano}$ no cálculo das razões $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$. A razão $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ e o ϵ_{Hf} inicial foram calculados utilizando os valores médios para Basaltos de Cadeias Mesoceânicas (*Avg MORB - Mid Ocean Ridge Basalts*) de CHAUVEL *et al.* (2008), de crosta juvenil de DHUIME *et al.* (2011) e TDM2 de BLICHERT-TOFT (2008).

4. CONTEXTO GEOLÓGICO

4.1. Bacia Potiguar

A Bacia Potiguar é uma bacia Eo-cretácea localizada na porção NE da margem brasileira, cuja formação se deu inicialmente durante os primeiros estágios da fragmentação entre as placas Sul-americana e Africana em um regime extensional orientado NW-SE que sofreu rotação mudando sua direção para E-W nos estágios finais do rifte (CHANG *et al.*, 1988; MATOS, 1992 *apud* OLIVEIRA *et al.*, 2018). A Bacia Potiguar é composta por um rifte abortado na porção onshore e uma porção offshore que evoluiu para se tornar uma bacia de margem passiva. É composta por um sistema de horsts e grábens assimétricos limitados por sistemas de falhas que, na sua porção onshore, tem direção preferencial NE-SW, coincidente com a direção dos principais lineamentos do substrato dessa Bacia, a Província Borborema,

provavelmente sendo reativações dos mesmos (MATOS, 1992 *apud* OLIVEIRA *et al.*, 2018).

O rifte abortado da Bacia Potiguar forma um meio-gráben com cerca de 5,5 km de profundidade, 177 km de comprimento e 54 km de largura sobre o qual estão depositados cerca de 500 metros de sedimento da sequência pós-rifte (MATOS, 1992).

A fase rifte foi separada em três estágios tectônicos (MATOS, 1992) O estágio sin-rifte 1 teria ocorrido no Jurássico, em cerca de 150 Ma, sendo caracterizado pelo início da deformação extencional e deposição de sedimentos na Depressão Afro-brasileira. O estágio sin-rifte 2 teria ocorrido em cerca de 145-130 Ma, com o desenvolvimento de bacias rifte formando vários meio-grábens assimétricos em bacias rifte intracontinentais na região. Por fim, o estágio sin-rifte 3, ocorrido em cerca de 130-125 Ma é caracterizado pela concentração de esforços na futura margem equatorial, com movimento transtencional ocorrendo na região (MATOS, 1992), que teria gerado grábens alongados na borda sul do rifte Potiguar (DE CASTRO e BEZERRA, 2015 *apud* DE MELO *et al.*, 2016).

O preenchimento da bacia se deu acompanhando a evolução tectônica da mesma, ocorrendo em quatro fases distintas: fase rifte I, fase rifte II, fase pós-rifte e fase termal (PESSOA NETO *et al.*, 2007). Os autores dividiram as rochas sedimentares em três Supersequências (Figura 6), sendo elas:

- I. Supersequência Rifte, corresponde às fases rifte I (Neoberriasiano - Eobarremiano) e rifte II (Neobarremiano - Eo-Aptiano). Na primeira ocorreu o desenvolvimento de hemi-grábens assimétricos e altos internos, com a deposição de sedimentos da Fm. Pendência em ambientes lacustrinos, flúvio-deltaicos e fandeltaicos. Na segunda, ocorre um deslocamento do eixo de rifteamento para a porção submersa da Bacia, com deposição de sedimentos que atualmente compõe a parte superior da Fm. Pendência e a Fm. Pescada e erosão na porção emersa da bacia.
- II. Supersequência Pós-Rifte (Aptiano – Albiano Inferior), com relativa quietude tectônica e gradação dos sistemas deposicionais de continentais para marinhos, onde foram depositados os sedimentos da Fm. Alagamar.

- III. Supersequência Drifte, do Albiano ao Recente, ocorrendo subsidência termal e composta por uma sequência flúvio-marinha transgressiva à qual se seguiu a deposição de uma sequência clástica e carbonática regressiva.

Três episódios magmáticos ocorreram na região desde o Jurássico, sendo eles representados pelos Enxames de Diques Rio Ceará-Mirim (ca. 132 Ma), Suíte Serra do Cuó (ca. 93 Ma) e Suíte Macau (50-8 Ma) (PESSOA NETO *et al.*, 2007).

4.2. Embasamento

As rochas da porção norte da Província Borborema (PB) compõe o embasamento da Bacia Potiguar. Essa província é formada por um mosaico de cinturões dobrados metassedimentares e maciços separados por zonas de cisalhamento de escala continental (ALMEIDA *et al.*, 1981), e por grande volume de rochas granitoides neoproterozoicas. É dividida nas porções Setentrional, Transversal e Meridional, separadas pelos lineamentos de Patos e Pernambuco. Nesse capítulo são apresentados apenas os domínios mais a norte da província (Setentrional e Transversal) pela sua proximidade com a Bacia Potiguar, e, portanto, potencial como área fonte de sedimentos. Considerando o contexto paleogeográfico de formação da bacia no contexto da quebra do Supercontinente Gondwana, também foi incluído um item a respeito da geologia da contraparte da Província Borborema na África, o Escudo Nigeriano.

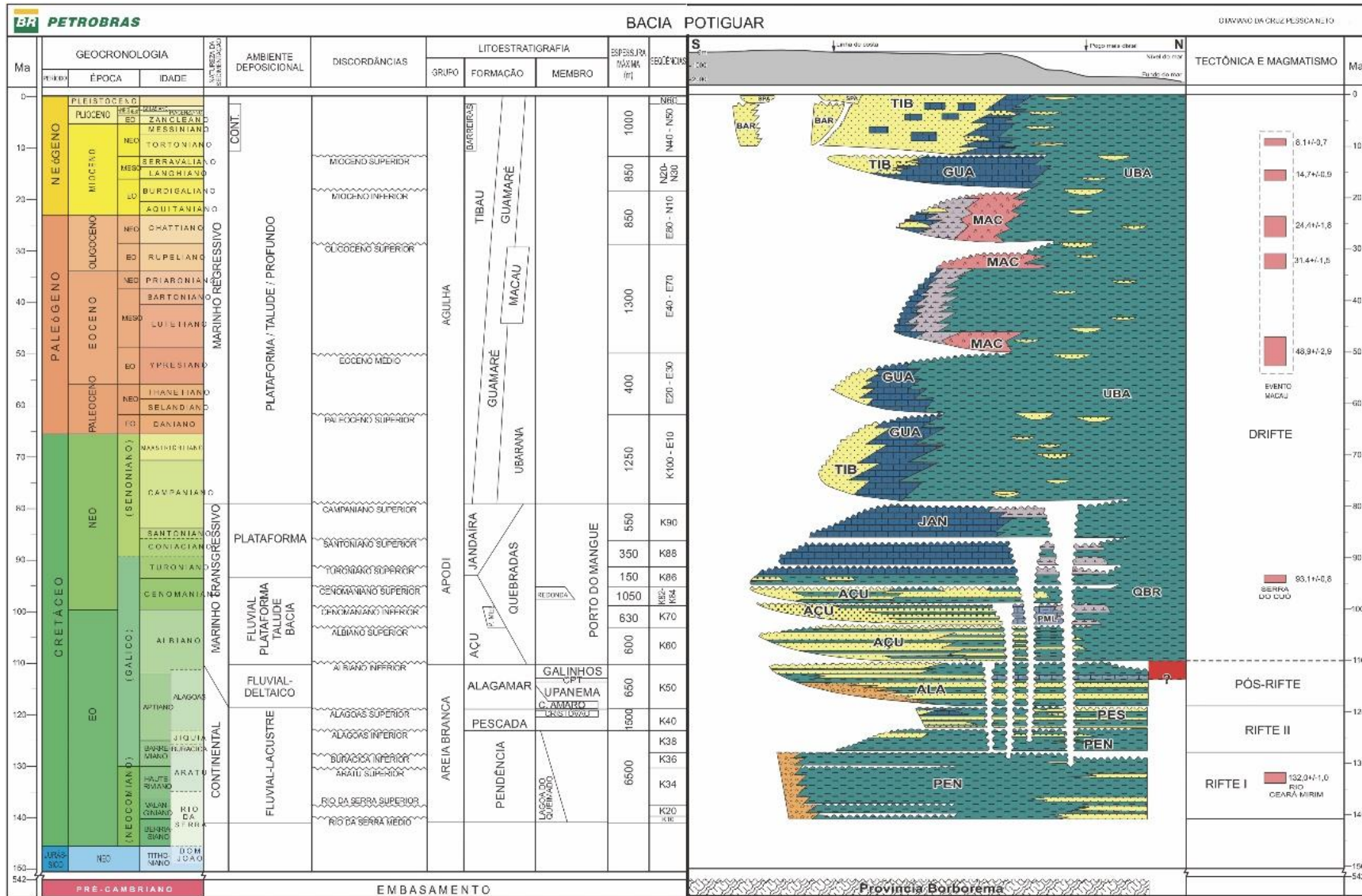


Figura 6: Coluna estratigráfica da Bacia Potiguar. Retirado e modificado de PESSOA NETO et al. (2007).

4.2.1. Escudo Nigeriano

O Escudo Nigeriano é formado pelo Complexo Gnáissico-Migmatítico, Cinturão de Xistos, os *Older Granites* e os *Younger Granites* (OBAJE, 2009). O Complexo Gnáissico-Migmatítico é composto por uma assembleia heterogênea de rochas que compreende migmatitos, ortognaisses, paragnaisses, e rochas básicas e ultrabásicas metamorfisadas. Essas rochas registram três eventos geológicos principais em cerca de 2,5 Ga, com o início de processos de formação de crosta e crescimento crustal por sedimentação e orogenia, em $2,0 \pm 0,2$ Ga e, por fim, o evento Pan-Africano, com rochas de idades entre 0.90 e 0.45 Ga (RAHAMAN e LANCELOT, 1984 *apud* OBAJE, 2009). O Cinturão de Xistos compreende cinturões de rochas metavulcânicas e metassedimentares de baixo grau cuja idade de deposição e magmatismo é geralmente considerada como Paleoproterozoico Superior. Os *Older Granites* são rochas pré, sin e pós-tectônicas que cortam tanto o Complexo Gnáissico-Migmatítico como o Cinturão de Xistos, e representam um ciclo magmático associado com a orogenia Pan-Africana, com idades variando de 750-450 Ma. Os *Younger Granites* envolvem vários complexos anelares Jurássicos, estruturalmente e petrologicamente distintos dos *Older Granites*. Tratam-se do registro de um episódio de magmatismo alcalino anorogênico com idades variando de 213 ± 7 Ma a 141 ± 2 Ma (OBAJE, 2009).

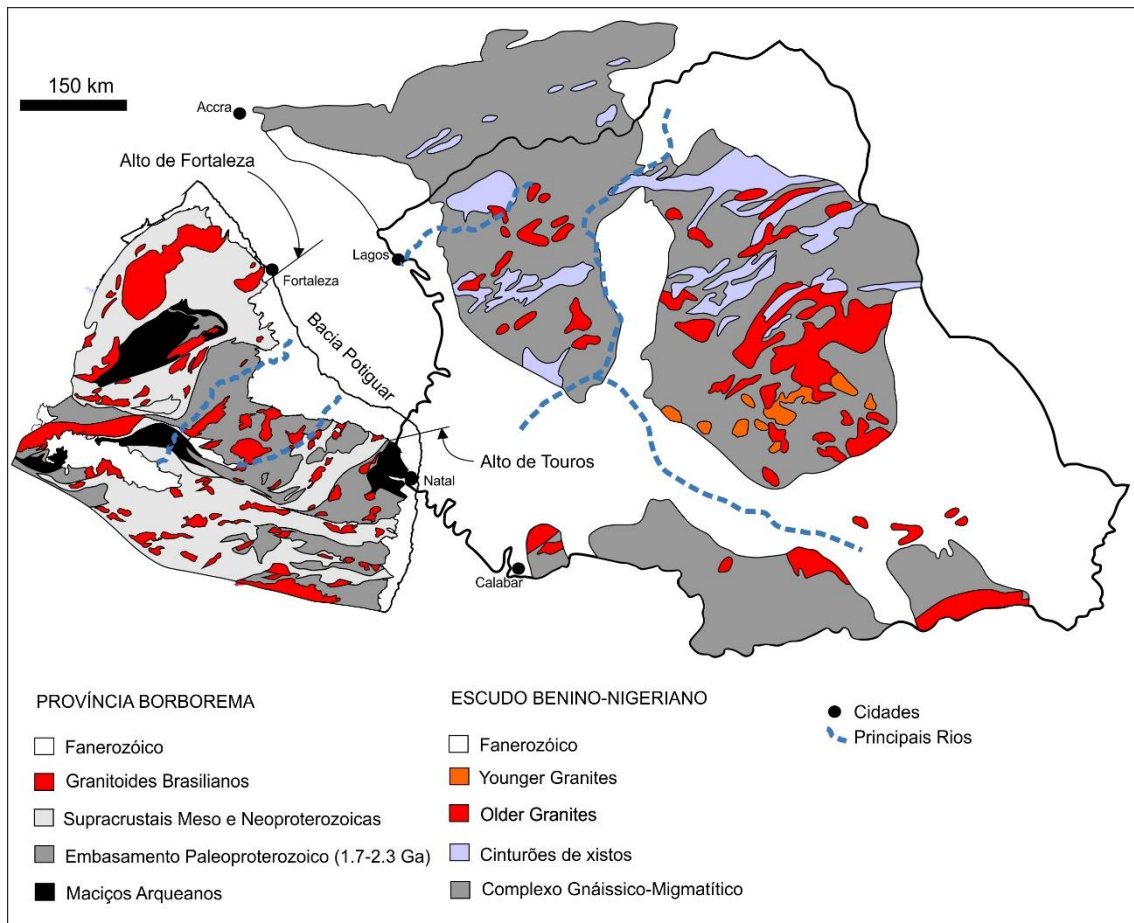


Figura 7: Reconstrução da situação da parte norte da Província Borborema e Escudo Nigeriano no contexto da fragmentação do Supercontinente Gondwana, e a localização da Baía Potiguar. Retirado e modificado de DE LIRA SANTOS *et al.* (2015).

4.2.2. Província Borborema

A Província Borborema apresenta rochas de idades variando do Paleoarqueano ao Ordoviciano. Nos domínios Setentrional e Transversal foram identificados quatro núcleos arqueanos: o Maciço Tróia, o Maciço São José do Campestre (MSJC), o Bloco Campo Grande e o Complexo Granjeiro. O Maciço Tróia compreende rochas metaplutônicas de alto grau de composição granodiorítica, gnaisses com bandamento composicional e rochas supracrustais com idades arqueanas (2,85-2,68 Ga), que fazem parte das unidades Mombaça e Pedra Branca. Além disso, fazem parte desse maciço para e ortognaisses, granitoides, metagrauvacas, mearcóseos, rochas calcissilicáticas e rochas tipo *greenstone* de idades paleoproterozoicas de 2,18 a 2,13 Ga (GANADE *et al.*, 2017). O MSJC é formado predominantemente por ortognaisses, migmatitos e granitoides com idades

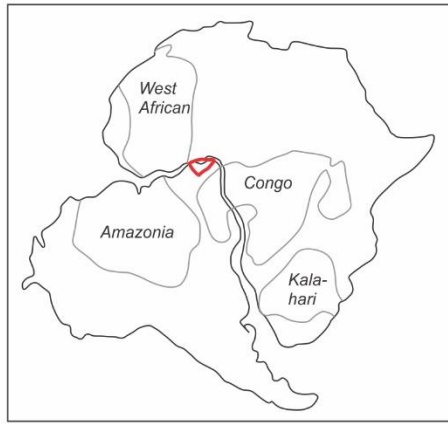
variando de 3,41 a 2,69 Ga (DANTAS *et al.*, 2013; DE SOUZA *et al.*, 2016). O Bloco Campo Grande é um pequeno fragmento crustal localizado próximo a Bacia Potiguar, composto por migmatitos arqueanos tonalíticos a graníticos no seu centro circundados por ortognaisses Paleoproterozoicos. As idades das rochas arqueanas variam de 2,99 a 2,65 Ga (FERREIRA *et al.*, 2020). Por fim, o Complexo Granjeiro se encontra próximo a Bacia do Araripe, e é composto por gnaisses TTG, sequências metavulcanossedimentares, migmatitos e formações ferríferas bandadas, com idades variando de 3,55 Ga a 2,38 Ga (ANCELMI, 2016; PITARELLO *et al.*, 2019).

Rochas Paleoproterozoicas são abundantes em toda a Província Borborema, constituindo o Embasamento Paleoproterozoico, que compreende rochas metamórficas de alto grau e migmatitos com idades predominantemente entre 2,27 Ga e 2,13 Ga (ANGELIN *et al.*, 2006; FETTER *et al.*, 2000; HOLLANDA *et al.*, 2011; SÁ *et al.*, 2014; SANTOS *et al.*, 2015). Algumas idades mais antigas (2,40-2,30 Ga) foram encontradas na porção leste do Domínio Rio Grande do Norte (DRN) e no Domínio Ceará Central (DANTAS *et al.*, 2008 *apud* HOLLANDA *et al.*, 2011; FETTER *et al.*, 2000; HOLLANDA *et al.*, 2011). Ainda no Paleoproterozoico, rochas de idades mais jovens (1,80-1,70 Ga) são encontradas na parte oeste do DRN (CAVALCANTE, 1999; GALINDO *et al.*, 2011; FIGUEIREDO FILHO, 1994; HOLLANDA *et al.*, 2011), englobando sequências metassedimentares e ortognaisses considerados como relacionados a um evento de magmatismo anorogênico.

Rochas Mesoproterozoicas são encontradas apenas no Domínio Zona Transversal (DZT), no Terreno Alto Pajeauú. São andesitos e granitos cálcio-alcálicos e aluminosos com idades de 1,00-0,92 Ga e rochas supracrustais com idades máximas de deposição entre 0,86-0,80 Ga (GUIMARÃES *et al.*, 2012; SANTOS *et al.*, 2019). Essas rochas são representantes do evento Cariris Velhos.

Rochas Neoproterozoicas dos mais variados tipos são abundantes em toda a província, formadas durante o evento Brasileiro e formação do Supercontinente Gondwana. O magmatismo brasileiro é representado por plutons graníticos distribuídos em todos os setores na Província. No DCC as rochas Neoproterozoicas compreendem o Complexo Tamboril-Santa Quitéria (CTSQ), composto por uma associação de rochas ígneas e anatólicas cujas idades se concentram entre 0,64 e 0,61 Ga (CASTRO, 2004; COSTA *et al.*, 2013; FETTER *et al.*, 2003), o Complexo Ceará, formado principalmente por rochas metassedimentares de alto grau, incluindo migmatitos (Unidade Canindé) e de graus mais baixos (Unidade Independência), com

deposição e metamorfismo neoproterozoicos (ARTHAUD *et al.*, 2008; ARTHAUD *et al.*, 2015; CAVALCANTE *et al.*, 2003; DE ARAUJO *et al.*, 2012). Ainda no DCC, ocorrem granitoides com idades de cerca de 580 Ma (plútons de Quixeramobim, Quixadá, granito de Banabuiú) e 530 Ma (Complexos ígneos de Serra da Barriga e Tauá, a oeste do CTSQ), além de magmatismo anorogênico representado pelos stocks Quintas, Pajé e Serrote São Paulo em cerca de 480 Ma (CASTRO *et al.*, 2012). No DRN, rochas neoproterozoicas incluem os gnaisses e migmatitos do Complexo Acopiara, rochas metassedimentares do Grupo Seridó e Formação Lavras da Mangabeira e granitoides brasileiros. DO NASCIMENTO *et al.* (2015) apresentam uma revisão sobre o assunto, onde dividiram essas rochas em seis suítes distintas: shoshonítica (idades U-Pb variando de 599 ± 16 Ma a 579 ± 7 Ma), porfírica alto-K cálcio-alcálica (591 ± 4 Ma a 544 ± 7 Ma), equigranular alto-K cálcio-alcálica (582 ± 5 Ma a 527 ± 8 Ma), cálcio-alcálica (apenas um corpo datado em 598 ± 3 Ma), alcálica (dois corpos datados em 578 ± 14 Ma e 597 ± 4 Ma) e alcálica charnoquítica (dois corpos datados em 601 ± 10 Ma e 593 ± 5 Ma). Ainda, ocorrem nesse domínio diques pegmatíticos com idades U-Pb entre 515 e 510 Ma. Essas idades são substancialmente diferentes das observadas no DCC, e mesmo das idades de granitoides brasileiros do Domínio da Zona Transversal. No DZT, o Neoproterozoico é representado por rochas supracrustais metamorfizadas e granitoides de idades entre 640-570 Ma.



- 892 + Idades U-Pb - Cristalização (Ga) ● Capitais
- 892 + Idades U-Pb - Cristalização (Ma) — Lineamentos
- 893 + Idades U-Pb - Idade máxima de deposição (Ma) □ Litologias
- Rios

Unidades Geológicas

- Cobertura Sedimentar Fanerozoica
- Granitoides Neoproterozoicos a Ordovicianos (ca. 0.68-0.47 Ga)
- a b Complexo Ceará (ca. 0.75 Ga): (a) Unidades Canindé, Quixeramobim e Arneiroz; (b) Unidade Independência.
- Grupo Seridó (ca. 0.60 Ga)
- Complexo Acopiara (ca. 0.68-0.62 Ga)
- Complexo Tamboril-Santa Quitéria (ca. 0.85-0.64 Ga)
- Supracrustais Neoproterozoicas - DZT.
- Rochas Meso-Neoproterozoicas (ca. 1-0.9 Ga).
- Granitoides Mesoproterozoicos (ca. 1.5 Ga)
- Rochas Estaterianas (ca. 1.8-1.7 Ga)
- Suíte Poço da Cruz (ca. 1.95 Ga)
- Complexo Caicó (ca. 2.33-2.15 Ga)
- Embasmamento Paleoproterozoico (ca. 2.4-2.0 Ga)
- Núcleos Arqueanos: (1) Maciço São José do Campestre, ca. 3.41-2.69 Ga; (2) Complexo Granjeiro, ca. 3.5-2.5 Ga; (3) Maciço Tróia, ca. 2.85-2.68 Ga; (4) Bloco Campo Grande, ca. 2.99-2.65 Ga.

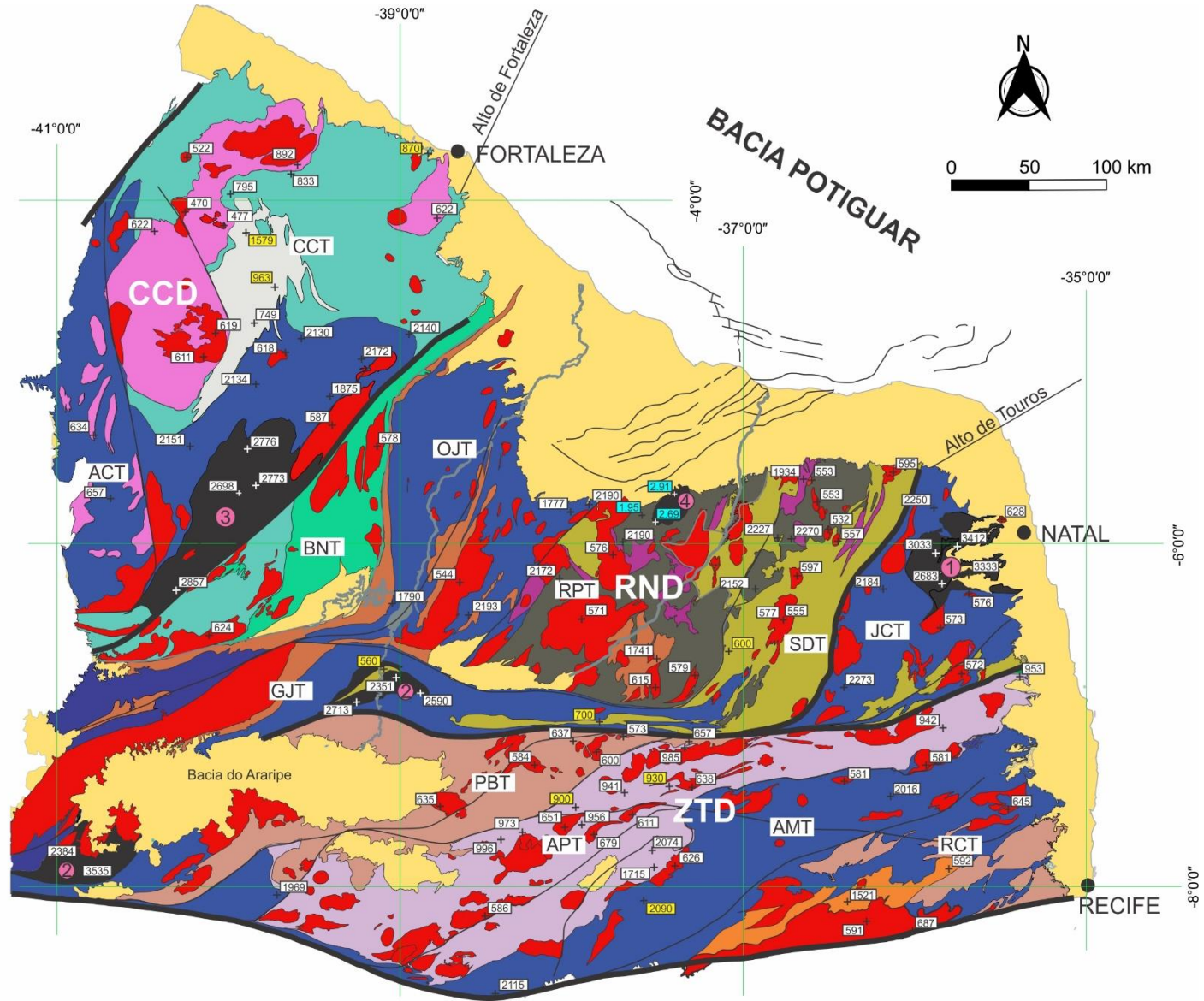


Figura 8: Mapa geológico simplificado da Província Borborema. DRN – Domínio Rio Grande do Norte; DCC – Domínio Ceará Central; DZT – Domínio da Zona Transversal; CCT – Terreno Ceará Central; ACT – Terreno Acaraú; BNT – Terreno Banabuiú; OJT – Terreno Orós-Jaguaribe; RPT – Terreno Rio Piranhas; SDT – Terreno Seridó; JCT – Terreno São José do Campestre; GJT – Terreno Granjeiro; PBT – Terreno Piancó-Alto Brígida; APT – Terreno Alto Pajeau; AMT – Terreno Alto Moxotó; RCT – Terreno Rio Capibaribe. Idades retiradas de ANCELMÍ (2016), ANGELIM *et al.* (2006), ANGELIM e KOSIN (2001), ARCHANJO *et al.* (2013), ARTHAUD *et al.* (2015), BAUTISTA (2012), CASTRO (2004), COSTA *et al.* (2013), SILVA *et al.* (2002), DANTAS *et al.* (2008), DANTAS (1992), DANTAS *et al.* (2013), DE ARAUJO *et al.* (2012), DOS SANTOS *et al.* (2010), FERREIRA *et al.* (2020); FETTER (1999), FETTER *et al.* (2017), GALINDO *et al.* (2011), GANADE *et al.* (2017), GANADE DE ARAUJO *et al.* (2014), GUIMARÃES *et al.* (2012), HOLLANDA *et al.* (2015), (2011), JARDIM DE SÁ (1994), KOZUCH (2003), LEGRAND *et al.* (1997), LIMA *et al.* (2010), MAGINI (2001), MARTINS *et al.* (2009), NOGUEIRA (2004), PITARELLO *et al.* (2019), SÁ *et al.* (2002), SÁ *et al.* (2014), SILVA *et al.* (1997), VAN SCHMUS *et al.* (2003). Base vetorial retirada de CPRM (2019).

5. RESUMO DOS RESULTADOS, INTERPRETAÇÕES E DISCUSSÕES

A análise das texturas dos zircões a partir das imagens de catodoluminescência mostra um predomínio de texturas tipicamente ígneas (zonação oscilatória) em zircões dos poços POT1 e POT2, enquanto nos grãos dos poços POT3 e POT4 são observadas texturas indicativas de anatexia (zonação irregular, convoluta, feições de reabsorção). Zircões tipicamente metamórficos, com catodoluminescência clara, são raros. O poço POT3 apresenta uma variação nas texturas dos grãos de zircão, passando de um predomínio de grãos de zircão com texturas indicativas de anatexia na amostra inferior (A) passando para predomínio de zircões com texturas ígneas nas amostras B e C. No poço POT4 observa-se um predomínio de zircões ígneos na Formação Pescada (basal) passando para zircões com feições de anatexia nas amostras da Formação Alagamar. Zircões arredondados ocorrem em todas as amostras, mas sempre em pequenas quantidades, indicando que uma contribuição de zircão policíclico pouco significativa. As razões Th/U são predominantemente maiores que 0,3 sugerindo uma origem ígnea para a maioria dos zircões.

Foram obtidas 131 idades concordantes de zircões da Formação Pendência, a partir de duas amostras do Poço POT1. São observados cinco intervalos de idades que abarcam a maioria das análises: 2,42-2,34 Ga; 2,19-2,00 Ga; 1,80-1,60 Ga; 0,67-0,62 Ga e 0,60-0,55 Ga.

Amostras da Formação Pescada foram coletadas dos poços POT2 (duas amostras) e POT4 (duas amostras). Foram obtidas 350 idades concordantes, predominantemente nos intervalos 2,40-2,00 Ga, 1,78-1,63 Ga, 0,68-0,61 Ga e 0,60-0,59 Ga. Os zircões do poço POT4 apresentaram a maioria de suas idades no intervalo 2,40-2,00 Ga, estando praticamente ausentes zircões com idades de 1,78-1,63 Ga.

Amostras do Mb. Upanema da Fm. Alagamar foram obtidas nos poços POT2 (três amostras), POT3 (três amostras) e POT4 (duas amostras) das quais foram obtidas 593 análises concordantes. As idades se concentram nos intervalos 2,30-2,00 Ga, 1,80-1,60 Ga e 0,61-0,55 Ga. No Poço POT3 há uma variação entre as amostras, com idades concentradas no intervalo 2,30-2,00 Ga na amostra inferior (amostra A), passando para um predomínio de idades nos intervalos 1,80-1,60 Ga e 0,61-0,55 Ga na amostra intermediária (B) e voltando a um predomínio de idades no intervalo 2,30-2,00 Ga na amostra superior (C). No Poço POT4 as idades se concentram nos intervalos 2,30-2,00 Ga e 0,61-0,55 Ga.

Foram analisados zircões de duas amostras do Mb. Canto do Amaro retiradas do poço POT1, tendo sido obtidas 89 análises concordantes. As idades se concentram nos intervalos 2,30-2,00 Ga (amostra inferior – D) e 1,90-1,60 Ga na amostra superior dessa formação (amostras E).

De uma amostra da Camada Ponta do Tubarão da Fm. Alagamar (poço POT1) foram obtidas 73 análises concordantes, sendo que as idades se distribuem nos intervalos de 2,40-2,20 Ga, 2,20-2,00 Ga, 1,80-1,60 Ga, 0,70-0,63 Ga e 0,61-0,55 Ga.

Foram analisados zircões de quatro amostras do Mb. Galinhos da Fm. Alagamar dos poços POT2 (duas amostras) e dos poços POT1 e POT4, tendo sido obtidas 350 análises concordantes. As idades se concentram nos intervalos de 2,30-2,00 Ga, 1,80-1,60 Ga, 0,67-0,61 Ga, 0,61-0,55 Ga e 0,55-0,50 Ga.

As análises de Lu-Hf foram realizadas em zircões do poço POT1, em amostras das Formações Pendência e Pescada e Mbs. Upanema e Galinhos, em zircões de

idade brasileira. Os valores obtidos de ϵ_{Hf} são bastante variáveis, e apresentam um trend onde os zircões brasileiros mais antigos ($>0,59$ Ga) apresentam predominantemente valores positivos, que passam a ser negativos nos zircões mais jovens, refletindo um padrão típico de evolução de um orógeno dos termos iniciais, com maior contribuição de material mantélico na geração das rochas, para um estágio de colisão continental, com geração de magmas com assinatura crustal.

Uma característica comum em todas as amostras é a ausência ou presença pouco expressiva de zircões de idades Cariris Velhos ($\sim 1,0$ Ga). Rochas dessa idade são comuns na Zona Transversal da Província Borborema, no Terreno Piancó-Alto Brígida, a sul do Lineamento Patos. Assim, pode-se interpretar que apenas os terrenos mais a norte da PB serviram de fonte para os sedimentos das amostras estudadas.

Na parte norte da PB, rochas com idades entre 1,80-1,60 Ga são encontradas nos terrenos Orós-Jaguaribe e Rio Piranhas. Essas áreas devem ter contribuído com sedimentos para gerar os arenitos representados nas amostras dos poços POT1, POT2 e na amostra B do poço POT3. Granitoides brasileiros são distribuídos por toda a Província, mas há predominância de granitoides com idades maiores que 0,61 Ga no Terreno Ceará Central, enquanto são raros em outros terrenos. Picos de idades brasileiras maiores que 0,61 Ga são observados em amostras da Camada Ponta do Tubarão e Mb. Galinhos do poço POT1 e das Fms. Pendência e Pescada do poço POT2, indicando uma contribuição dos terrenos mais a oeste da PB nesses poços, em contraste com o que se observa nos poços POT3 e POT4. Por fim, rochas com idades entre 0,55 e 0,50 Ga são pouco comuns, sendo principalmente corpos ígneos pequenos pós-orogênicos e pegmatitos. As áreas com maior presença de pegmatitos são o Distrito Pegmatítico Solonópole-Quixeramobim no terreno Banabuiú e a Província Pegmatítica Seridó no Terreno Seridó. Quantidades significativas de zircões com essas idades foram encontradas nas amostras do Mb. Galinhos no poço POT2. Considerando a presença de zircões de idade de 1,80-1,60 Ga nas mesmas amostras, e a proximidade de rochas dessa idade no embasamento com o Distrito Pegmatítico Solonópole-Quixeramobim, foi interpretado que essa foi a área fonte desses grãos. Rochas com idades de 2,2-2,0 Ga são comuns por toda a PB, de modo que a presença dessas idades nas amostras não permite especificar terrenos que possam ter servido de fonte.

Assim, foi interpretado que os terrenos mais a oeste serviram de fonte de sedimentos para as rochas estudadas nos poços POT1 e POT2, enquanto os terrenos a leste foram fonte dos sedimentos para as rochas estudadas nos poços POT3 e POT4. Esses dois conjuntos de poços se encontram separados pelo sistema de horsts e grábens que nos estágios iniciais da formação da bacia foi o eixo do rifte, sugerindo que o condicionamento estrutural decorrente da abertura do rifte separou a bacia em dois setores em termos de proveniência, e impediu a mistura de sedimentos entre esses setores, mesmo na fase pós-rifte.

Variações verticais no padrão de distribuição de idades são observadas em todos os poços, mas são mais nítidas nos poços POT1 e POT3, localizados na porção onshore da bacia. No poço POT1, as variações são observadas entre as amostras do Mb. Canto do Amaro e de outras unidades e entre amostras da mesma unidade, apresentando populações unimodais, provavelmente como consequência de áreas fontes geograficamente restritas. No poço POT3 são observadas variações dentro da mesma unidade (Mb. Upanema), podendo ser consequência de variações no padrão de drenagem nas áreas fontes ou proximidade da confluência entre duas redes de drenagem.

Os valores de ϵ_{Hf} obtidos são condizentes com os poucos dados encontrados na literatura para rochas da PB (e.g. GANADE DE ARAÚJO *et al.*, 2014; GORAYEB *et al.*, 2020), corroborando com as interpretações feitas a partir das idades U-Pb.

6. CONCLUSÕES

As fontes dos sedimentos das rochas clásticas da Bacia Potiguar nas porções rifte e pós-rifte foram as rochas da parte norte da Província Borborema, dos domínios Rio Grande do Norte e Ceará Central, com pouca ou nenhuma contribuição de rochas do Domínio da Zona Transversal. Variações na distribuição de idades verticalmente são mais significativas nos poços onshore.

O zircão apresenta uma distinção entre os poços localizados a noroeste do sistema de grábens de direção nordeste e os poços localizados a sudeste, tanto texturalmente como nas idades obtidas. As rochas da porção oeste da PB (Domínio Ceará Central e parte oeste do Domínio Rio Grande do Norte) provavelmente foram

as fontes dos sedimentos do segmento da bacia a noroeste do sistema de grábens, enquanto rochas da porção leste do Domínio Ceará Central devem ter servido de fonte de sedimentos para o segmento sudeste. Assim, as estruturas geradas durante as fases iniciais do rifteamento parecem ter controlado a distribuição de sedimentos na bacia mesmo na fase pós-rifte. É possível que essa diferenças nas áreas fontes resulte em diferentes qualidades nos reservatórios dos dois segmentos da bacia.

Ainda, identifica-se pela primeira um *trend* de idades x Lu-Hf nos zircões dos arenitos da Bacia Potiguar, onde os grãos Brasilianos mais antigos mostram derivação juvenil-mantélica e os mais jovens, derivação de crosta continental. Este *trend* nas assinaturas de idade x Lu-Hf mimetizam a evolução geotectônica de geração dos granitoides no embasamento adjacente a Bacia Potiguar durante o Brasiliano.

7. REFERÊNCIAS

- Ancelmi, M.F., 2016. Geocronologia e geoquímica das rochas arqueanas do Complexo Granjeiro, Província Borborema. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.
- Andersen, Tom. Detrital zircons as tracers of sedimentary provenance: limiting conditions from statistics and numerical simulation. **Chemical Geology**, v. 216, n. 3-4, p. 249-270, 2005.
- Angelim, L.A. de A., Nesi, J.R., Torres, H.H.F., Medeiros, V.C., Santos, C.A., Junior, J.P. V., Mendes, V.A., 2006. Geologia e Recursos Minerais do Estado do Rio Grande do Norte.
- Angelim, Luiz Alberto de Aquino; Kosin, Marília. Aracaju-NW: folha SC. 24-V. 2001.
- Archanjo, Carlos J. et al. Timing of the HT/LP transpression in the Neoproterozoic Seridó Belt (Borborema Province, Brazil): constraints from UPb (SHRIMP) geochronology and implications for the connections between NE Brazil and West Africa. **Gondwana Research**, v. 23, n. 2, p. 701-714, 2013.
- Arthaud, M.H., Caby, R., Fuck, R.A., Dantas, E.L., Parente, C. V., 2008. Geology of the Northern Borborema Province, NE Brazil and its correlation with Nigeria, NW Africa, in: Pankhurst, R.J., Trouw, R.A.J., Brito Neves, B.B., De Wit, M.J. (Eds.), West

Gondwana: Pre-Cenozoic Correlations Across the Atlantic Region. Geological Society, London, pp. 49–67.

Arthaud, M.H., Fuck, R.A., Dantas, E.L., Santos, T.J.S., Caby, R., Armstrong, R., 2015. 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. *J. South Am. Earth Sci.* 58, 223–237. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2014.09.007>

Bautista, John Mauricio Rico. **Estudo de proveniência sedimentar de sequências neoproterozoicas ao longo do Lineamento Patos (Província Borborema, NE do Brasil)**. 2012. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

Belousova, E. A. et al. Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type. **Contributions to mineralogy and petrology**, v. 143, n. 5, p. 602-622, 2002.

Blichert-Toft, Janne. The Hf isotopic composition of zircon reference material 91500. **Chemical Geology**, v. 253, n. 3-4, p. 252-257, 2008.

Bosence, D. W. J. Stratigraphic and sedimentological models of rift basins. In: **Sedimentation and Tectonics in Rift Basins Red Sea:-Gulf of Aden**. Springer, Dordrecht, 1998. p. 9-25.

Bosworth, William. Geometry of propagating continental rifts. **Nature**, v. 316, n. 6029, p. 625-627, 1985.

Bruguier, O.; Lancelot, J. R.; Malavieille, J. U–Pb dating on single detrital zircon grains from the Triassic Songpan–Ganze flysch (Central China): provenance and tectonic correlations. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 152, n. 1-4, p. 217-231, 1997.

Canile, Fernanda M.; Babinski, Marly; Rocha-Campos, Antonio C. Evolution of the Carboniferous-Early Cretaceous units of Paraná Basin from provenance studies based on U-Pb, Hf and O isotopes from detrital zircons. **Gondwana Research**, v. 40, p. 142-169, 2016.

Canile, Fernanda Maciel. Geologia isotópica em zircões detríticos (U-Pb, Hf e O) e em rocha total (Sm-Nd e Pb-Pb) das rochas da Bacia do Paraná em Santa Catarina. 2015. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo

Castro, N.A., Ganade de Araujo, C.E., Basei, M.A.S., Osako, L.S., Nutman, A.A., Liu, D., 2012. Ordovician A-type granitoid magmatism on the Ceará Central Domain, Borborema Province, NE-Brazil. *J. South Am. Earth Sci.* 36, 18–31. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jsames.2011.11.007>

Castro, Neivaldo Araujo de. **Evolução geológica proterozóica da região entre Madalena e Taparuaba, domínio tectônico Ceará Central (Província Borborema)**. 2004. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

Cavalcante, J.C., 1999. Limites e Evolução Geodinâmica do Sistema Jaguaribeano, Província Borborema, Nordeste do Brasil. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN.

Cavalcante, J.C., Vasconcelos, A.M., Medeiros, M.F., Paiva, L.P., Gomes, F.E.M., Cavalcante, S.N., Cavalcante, J.E., Melo, A.C.R., Duarte Neto, V.C., Bevenides, H.C., 2003. Mapa Geológico do Estado do Ceará - Escala 1:500.000.

Chang, Hung K.; KOWSMANN, Renato O.; DE FIGUEIREDO, Antonio MF. New concepts on the development of East Brazilian marginal basins. **Episodes Journal of International Geoscience**, v. 11, n. 3, p. 194-202, 1988.

Chauvel, Catherine et al. Role of recycled oceanic basalt and sediment in generating the Hf–Nd mantle array. **Nature geoscience**, v. 1, n. 1, p. 64, 2008.

Corfu, Fernando et al. Atlas of zircon textures. **Reviews in mineralogy and geochemistry**, v. 53, n. 1, p. 469-500, 2003.

Costa, F. G. et al. U-Pb (LA-ICPMS) zircon ages and Nd isotopes for granitoids of the Tamboril-Santa Quitéria Complex, Ceará Central domain: implication for Neoproterozoic syncollisional magmatism in north Borborema Province. **Geologia USP, Série Científica**, v. 13, p. 159-174, 2013.

CPRM, 2019. Unidades Geológico-Ambientais - 1:1.000.000 [WWW Document]. CPRM - Serviço Geológico do Bras. URL http://geowebapp.cprm.gov.br/ViewerWEB/index_geodiv.html (accessed 5.12.19)

Cremonini, O. A.; Goulart, J. P. M.; Soares, U. M. O Rifte Potiguar: novos dados e implicações tectônicas. In: SIMPÓSIO SOBRE O CRETÁCEO DO BRASIL, 4., 1996. Boletim do... Rio Claro: UNESP, 1996. p. 89-93.

Da Costa, F.G., De Araújo, C.E.G., Da Silva Amaral, W., Vasconcelos, A.M., Rodrigues, J.B., 2013. U-Pb (LA-ICPMS) zircon ages and Nd isotopes for granitoids of the Tamboril-Santa Quitéria Complex, Ceará Central Domain: Implication for neoproterozoic syncollisional magmatism in north Borborema Province. *Geol. USP - Ser. Cient.* 13, 159–174. <https://doi.org/10.5327/Z1519-874X2013000200009>

DANTAS, E. L. **Evolução tectono-magmática do maciço polidiapírico São Vicente/Florânia-RN.** 1992. Tese de Doutorado. M. Sc. dissertation, Universidade Estadual Paulista (Unesp), Rio Claro.

Dantas, E. L.; Negrão, M. M.; Buhn, B. 2.3 Ga continental crust generation in the Rio Grande do Norte terrane, NE Brazil. In: **VI South American Symposium on Isotope Geology, San Carlos de Bariloche, Argentina (CD-ROM, 4p), Abstracts.** 2008. p. 40.

Dantas, E.L., De Souza, Z.S., Wernick, E., Hackspacher, P.C., Martin, H., Xiaodong, D., Li, J.W., 2013. Crustal growth in the 3.4-2.7Ga São José de Campestre Massif, Borborema Province, NE Brazil. *Precambrian Res.* 227, 120–156. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2012.08.006>

Dantas, E.L., Negrão, M.M., Buhn, B., 2008. 2.3 Ga continental crust generation in the Rio Grande do Norte terrane, NE Brazil., in: VI South American Symposium on Isotope Geology. Bariloche, p. 40.

DANTAS, Elton Luiz et al. Crustal growth in the 3.4–2.7 Ga São José de Campestre Massif, Borborema Province, NE Brazil. **Precambrian Research**, v. 227, p. 120-156, 2013.

DE ALMEIDA, F. F. M. et al. Brazilian structural provinces: an introduction. **Earth-Science Reviews**, v. 17, n. 1-2, p. 1-29, 1981.

De Araujo, C.E.G., Cordani, U.G., Basei, M.A.S., Castro, N.A., Sato, K., Sproesser, W.M., 2012. U-Pb detrital zircon provenance of metasedimentary rocks from the Ceará Central and Médio Coreaú Domains, Borborema Province, NE-Brazil: Tectonic implications for a long-lived Neoproterozoic active continental margin. *Precambrian Res.* 206–207, 36–51. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2012.02.021>

DE ARAUJO, Carlos E. Ganade et al. Tracing Neoproterozoic subduction in the Borborema Province (NE-Brazil): Clues from U-Pb geochronology and Sr-Nd-Hf-O isotopes on granitoids and migmatites. **Lithos**, v. 202, p. 167-189, 2014.

- DE CASTRO, D. L.; BEZERRA, F. H. R. Fault evolution in the Potiguar rift termination, equatorial margin of Brazil. **Solid Earth**, v. 6, n. 1, 2015.
- DE LIRA SANTOS, Lauro César Montefalco et al. Early to late Paleoproterozoic magmatism in NE Brazil: The Alto Moxotó Terrane and its tectonic implications for the pre-West Gondwana assembly. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 58, p. 188-209, 2015.
- DE MELO, Alanny Christiny Costa et al. Rift fault geometry and evolution in the Cretaceous Potiguar Basin (NE Brazil) based on fault growth models. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 71, p. 96-107, 2016.
- de Souza, Z.S., Kalsbeek, F., Deng, X.-D., Frei, R., Kokfelt, T.F., Dantas, E.L., Li, J.-W., Pimentel, M.M., Galindo, A.C., 2016. Generation of continental crust in the northern part of the Borborema Province, northeastern Brazil, from Archaean to Neoproterozoic. *J. South Am. Earth Sci.* 68, 68–96. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jsames.2015.10.006>
- DE SOUZA, Zorano Sérgio et al. Generation of continental crust in the northern part of the Borborema Province, northeastern Brazil, from Archaean to Neoproterozoic. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 68, p. 68-96, 2016.
- DEGRAAFF-SURPLESS, Kathleen et al. Detrital zircon provenance analysis of the Great Valley Group, California: Evolution of an arc-forearc system. **Geological Society of America Bulletin**, v. 114, n. 12, p. 1564-1580, 2002.
- DHUIME, Bruno; HAWKESWORTH, Chris; CAWOOD, Peter. When continents formed. **Science**, v. 331, n. 6014, p. 154-155, 2011.
- Do Nascimento, M.A.L., Galindo, A.C., de Medeiros, V.C., 2015. Ediacaran to Cambrian magmatic suites in the Rio Grande do Norte domain, extreme Northeastern Borborema Province (NE of Brazil): Current knowledge. *J. South Am. Earth Sci.* 58. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2014.09.008>
- DOS SANTOS, Edilton José et al. The Cariris Velhos tectonic event in northeast Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 29, n. 1, p. 61-76, 2010.
- Ferreira, A., Dantas, E., Fuck, R., Nedel, I., 2020. Arc accretion and crustal reworking from late Archean to Neoproterozoic in Northeast Brazil. *Sci. Rep.* 10, 7855. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64688-9>

FERREIRA, Alanielson CD et al. Arc accretion and crustal reworking from late Archean to Neoproterozoic in Northeast Brazil. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 1-12, 2020.

Fetter, A.H., Van Schmus, W.R., Santos, T.J.S., Arthaud, M.H., Nogueira Neto, J.A., 2000. U-Pb and Sm-Nd geochronological constraints on the crustal evolution and basement architecture of Ceará State, NW Borborema Province, NE Brazil: implications for the existence of the Paleoproterozoic supercontinent Atlantica. *Rev. Bras. Geociências* 30, 102–106.

FETTER, Allen H. **U-Pb and Sm-Nd geochronological constraints on the crustal framework and geologic history of Ceará State, NW Borborema Province, NE Brazil: Implications for the assembly of Gondwana**. 1999. Tese de Doutorado. University of Kansas, Geology.

FETTER, Allen Hutcheson et al. U-Pb and Sm-Nd Geochronological constraints on the crustal evolution and basement architecture of Ceará State, NW Borborema Province, NE Brazil: Implications for the existence of the Paleoproterozoic Supercontinent “Atlantica”. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 30, n. 1, p. 102-106, 2017.

Figueiredo Filho, O.A., 1994. Geoquímica e geocronologia de metavulcânicas e metagranitoides dos cinturões Orós e Jaguaribe, Sudeste do Ceará. Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.

FROSTICK, Lynne; REID, Ian. Is structure the main control of river drainage and sedimentation in rifts?. **Journal of African Earth Sciences (and the Middle East)**, v. 8, n. 2-4, p. 165-182, 1989.

GALINDO, A. C. et al. Nota Explicativa da Folha Apodi. 2011.

Ganade, Carlos E, Basei, M.A.S., Grandjean, F.C., Armstrong, R., Brito, R.S., 2017. Contrasting Archean (2.85–2.68Ga) TTGs from the Tróia Massif (NE-Brazil) and their geodynamic implications for flat to steep subduction transition. *Precambrian Res.* 297, 1–18. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.05.007>

GANADE, Carlos E. et al. Contrasting Archean (2.85–2.68 Ga) TTGs from the Tróia Massif (NE-Brazil) and their geodynamic implications for flat to steep subduction transition. **Precambrian Research**, v. 297, p. 1-18, 2017.

GARZANTI, Eduardo; ANDÒ, Sergio; VEZZOLI, Giovanni. Grain-size dependence of sediment composition and environmental bias in provenance studies. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 277, n. 3-4, p. 422-432, 2009.

GEHRELS, George. Detrital zircon U-Pb geochronology: Current methods and new opportunities. **Tectonics of sedimentary basins: Recent advances**, p. 45-62, 2011.

GIBBS, A. D. Structural evolution of extensional basin margins. **Journal of the Geological Society**, v. 141, n. 4, p. 609-620, 1984.

GORAYEB, Paulo Sergio de Sousa; SILVA-SILVA, Luana Camile; GALARZA, Marco Antonio. Geology, geochronology Pb-Pb, U-Pb-Hf zircon and Sm-Nd TDM of the Uruburetama batholith, Northern Borborema Province: contextualization in the Santa Quitéria Magmatic Arc. **Brazilian Journal of Geology**, v. 50, n. 2, 2020.

GRIMES, Craig B. et al. Trace element chemistry of zircons from oceanic crust: A method for distinguishing detrital zircon provenance. **Geology**, v. 35, n. 7, p. 643-646, 2007.

Guimarães, I.P., Van Schmus, W.R., De Brito Neves, B.B., Bretas Bittar, S.M., Silva Filho, A.F., Armstrong, R., 2012. U-Pb zircon ages of orthogneisses and supracrustal rocks of the Cariris Velhos belt: Onset of Neoproterozoic rifting in the Borborema Province, NE Brazil. *Precambrian Res.* 192–195, 52–77.
<https://doi.org/10.1016/j.precamres.2011.10.008>

HOLLANDA, M. H. B. M. et al. Detrital zircon ages and Nd isotope compositions of the Seridó and Lavras da Mangabeira basins (Borborema Province, NE Brazil): evidence for exhumation and recycling associated with a major shift in sedimentary provenance. **Precambrian Research**, v. 258, p. 186-207, 2015.

Hollanda, M.H.B.M., Archanjo, C.J., Souza, L.C., Dunyi, L., Armstrong, R., 2011. Long-lived Paleoproterozoic granitic magmatism in the Seridó-Jaguaribe domain, Borborema Province-NE Brazil. *J. South Am. Earth Sci.* 32, 287–300.
<https://doi.org/10.1016/j.jsames.2011.02.008>

IIZUKA, Tsuyoshi et al. Detrital zircon evidence for Hf isotopic evolution of granitoid crust and continental growth. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 74, n. 8, p. 2450-2472, 2010.

JACKSON, Simon E. et al. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U–Pb zircon geochronology. **Chemical geology**, v. 211, n. 1-2, p. 47-69, 2004.

Jardim De Sá, E.F., 1994. A faixa Seridó (Província Borborema NE do Brasil) e o seu significado geodinâmico na cadeia Brasileira / Pan-Africana. Universidade de Brasília.

KINNY, Peter D.; MAAS, Roland. Lu–Hf and Sm–Nd isotope systems in zircon. *Reviews in mineralogy and geochemistry*, v. 53, n. 1, p. 327-341, 2003.

KOMAR, Paul D. The entrainment, transport and sorting of heavy minerals by waves and currents. **Developments in Sedimentology**, v. 58, p. 3-48, 2007.

KOŠLER, Jan et al. U–Pb dating of detrital zircons for sediment provenance studies—a comparison of laser ablation ICPMS and SIMS techniques. **Chemical Geology**, v. 182, n. 2-4, p. 605-618, 2002.

KOZUCH, Marianne. Isotopic and trace element geochemistry of early Neoproterozoic gneissic and metavolcanic rocks in the Cariris Velhos orogen of the Borborema Province, Brazil, and their bearing on tectonic setting. 2003.

LEGRAND, J. M.; DANTAS, E. L.; LIEGEOIS, J. P. Definição e caracterização do embasamento da porção oeste da Faixa Seridó (Província Borborema, NE-Brasil). **SBG/Simp. Geol. NE**, v. 17, p. 50-55, 1997.

LIMA, M. N. et al. Geología y geocronología U-Pb del granito de Banabuiú, Noreste de Ceará, Brasil. **Estudios Geológicos**, v. 66, n. 1, p. 35-44, 2010.

Ludwig, K.R., 2003. User's manual for Isoplot 3.00, a geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center special publication no.4. Components.

MAGINI, C. **Evolução pré-cambriana da Província Borborema: o extremo oeste Potiguar**. 2001. Tese de Doutorado. Tese de Doutoramento. IGCE, Unesp, Rio Claro, 218p.

MARTINS, Guttenberg; OLIVEIRA, Elson P.; LAFON, Jean-Michel. The Algodões amphibolite–tonalite gneiss sequence, Borborema Province, NE Brazil: geochemical and geochronological evidence for Palaeoproterozoic accretion of oceanic plateau/back-arc basalts and adakitic plutons. **Gondwana Research**, v. 15, n. 1, p. 71-85, 2009.

MATOS, Renato M. Darros. The northeast Brazilian rift system. **Tectonics**, v. 11, n. 4, p. 766-791, 1992.

MOECHER, David P.; SAMSON, Scott D. Differential zircon fertility of source terranes and natural bias in the detrital zircon record: Implications for sedimentary provenance analysis. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 247, n. 3-4, p. 252-266, 2006.

MOREL, M. L. A. et al. Hafnium isotope characterization of the GJ-1 zircon reference material by solution and laser-ablation MC-ICPMS. **Chemical geology**, v. 255, n. 1-2, p. 231-235, 2008.

NETO, João Marinho Milhomem et al. Lu-Hf em zircão por LA-MC-ICP-MS no laboratório Pará-Iso (UFPA): metodologia e primeiro exemplo de aplicação na porção sudeste do Escudo das Guianas, estado do Amapá. *Contribuição à Geologia da Amazônia* – v. 10, 2017.

NOGUEIRA, Johnson Fernandes. Estrutura, geocronologia e alojamento dos batólitos de Quixadá, Quixeramobim e Senador Pompeu-Ceará central. 2004.

OBAJE, Nuhu George. **Geology and mineral resources of Nigeria**. Springer, 2009.

OLIEROOK, Hugo KH et al. Tectonic controls on sediment provenance evolution in rift basins: Detrital zircon U–Pb and Hf isotope analysis from the Perth Basin, Western Australia. **Gondwana Research**, v. 66, p. 126-142, 2019.

OLIVEIRA, Karen M. Leopoldino et al. Architectural framework of the NW border of the onshore Potiguar Basin (NE Brazil): An aeromagnetic and gravity based approach. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 88, p. 700-714, 2018.

PATCHETT, P. J.; TATSUMOTO, M. Lu–Hf total-rock isochron for the eucrite meteorites. *Nature*, v. 288, n. 5791, p. 571, 1980.

PESSOA NETO, O. da C. et al. Bacia potiguar. **Boletim de Geociências da PETROBRÁS**, v. 15, n. 2, p. 357-369, 2007.

Pitarelo, M.Z., Santos, T.J.S. dos, Ancelmi, M.F., 2019. Syn-to post-depositional processes related to high grade metamorphic BIFs: Geochemical and geochronological evidences from a Paleo to Neoproterozoic (3.5–2.6 Ga) terrane in NE Brazil. *J. South Am. Earth Sci.* 96, 102312. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102312>

PUPIN, J. P. Zircon and granite petrology. **Contributions to Mineralogy and Petrology**, v. 73, n. 3, p. 207-220, 1980.

Rahaman MA, Lancelot JR (1984) Continental crust evolution in SW Nigeria: constraints from U/Pb dating of pre-Pan-African gneisses. In: Rapport d'activite 1980–1984 – Documents et Travaux du Centre Geologique et Geophysique de Montpellier 4:pp 41.

RAINBIRD, Robert H.; HAMILTON, Michael A.; YOUNG, Grant M. Detrital zircon geochronology and provenance of the Torridonian, NW Scotland. **Journal of the Geological Society**, v. 158, n. 1, p. 15-27, 2001.

SÁ, J. M. et al. Geochemistry and geochronology of pre-Brasiliano rocks from the Transversal zone, Borborema province, northeast Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 14, n. 8, p. 851-866, 2002.

Sá, J.M., Souza, L.C., Legrand, J.M., Galindo, A.C., Maia, H.N., Fillippi, R.R., 2014. U-Pb e Sm-Nd em Ortognaisses Riacionos e Estaterianos nos Terrenos Rio Piranhas-Seridó e Jaguaribeano, Província Borborema, Brasil. *Geol. USP - Ser. Cient.* 14, 97–110. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.5327/Z1519-874X201400030007>

SÁ, Jaziel Martins et al. U-pb and Sm-Nd data of the Rhyacian and Statherian orthogneisses from Rio Piranhas-Seridó and Jaguaribeano terranes, Borborema Province, northeast of Brazil. **Geologia USP, Série Científica**, v. 14, n. 3, p. 97-110, 2014.

Santos, L.C.M. de L., Dantas, E.L., Cawood, P.A., Lages, G. de A., Lima, H.M., dos Santos, E.J., Caxito, F.A., 2019. Early to late Neoproterozoic subduction-accretion episodes in the Cariris Velhos Belt of the Borborema Province, Brazil: Insights from isotope and whole-rock geochemical data of supracrustal and granitic rocks. *J. South Am. Earth Sci.* 96, 102384. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102384>

Santos, L.C.M. de L., Dantas, E.L., Santos, E.J. dos Santos, R.V., Lima, H.M., 2015. Early to Late Paleoproterozoic magmatism in NE Brazil: The Alto Moxotó Terrane and its tectonic implications for the Pre-West Gondwana assembly. *J. South Am. Earth Sci.* 58, 188–209. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jsames.2014.07.006>

SANTOS, Maristella M. et al. A new appraisal of Sri Lankan BB zircon as a reference material for LA-ICP-MS U-Pb geochronology and Lu-Hf isotope tracing. **Geostandards and Geoanalytical Research**, v. 41, n. 3, p. 335-358, 2017.

SILVA, LC da et al. U-Pb SHRIMP ages in southern State of Ceará, Borborema Province, NE Brazil: Archean TTG accretion and Proterozoic crustal reworking. In: **Second International Symposium on Granites and Associated Mineralizations, Salvador**. 1997. p. 280.

SIRCOMBE, Keith N. Tracing provenance through the isotope ages of littoral and sedimentary detrital zircon, eastern Australia. **Sedimentary Geology**, v. 124, n. 1-4, p. 47-67, 1999.

SLÁMA, Jiří et al. Plešovice zircon—a new natural reference material for U–Pb and Hf isotopic microanalysis. **Chemical Geology**, v. 249, n. 1-2, p. 1-35, 2008.

SOARES, U. M.; ROSSETTI, E. L. Tectonismo e sedimentação na porção SW do Rifte Potiguar–Bacia Potiguar emersa. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 13, n. 2, p. 149-166, 2005.

STACEY, JS t; KRAMERS, 1JD. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model. **Earth and planetary science letters**, v. 26, n. 2, p. 207-221, 1975.

THOMAS, William A. Detrital-zircon geochronology and sedimentary provenance. **Lithosphere**, v. 3, n. 4, p. 304-308, 2011.

VAN SCHMUS, William Randall et al. The Seridó Group of NE Brazil, a late Neoproterozoic pre-to syn-collisional basin in West Gondwana: insights from SHRIMP U–Pb detrital zircon ages and Sm–Nd crustal residence (TDM) ages. **Precambrian Research**, v. 127, n. 4, p. 287-327, 2003.

VERMEESCH, Pieter. How many grains are needed for a provenance study?. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 224, n. 3-4, p. 441-451, 2004.

VERMEESCH, Pieter. On the visualisation of detrital age distributions. **Chemical Geology**, v. 312, p. 190-194, 2012.

VERVOORT, Jeffrey D.; KEMP, Anthony IS. Clarifying the zircon Hf isotope record of crust–mantle evolution. **Chemical Geology**, v. 425, p. 65-75, 2016.

WANG, Ce et al. Detrital zircon provenance record of the oligocene Zhuhai Formation in the Pearl River Mouth Basin, northern South China sea. **Marine and Petroleum Geology**, v. 98, p. 448-461, 2018.

WOODHEAD, Jon D.; HERGT, Janet M. A preliminary appraisal of seven natural zircon reference materials for in situ Hf isotope determination. **Geostandards and Geoanalytical Research**, v. 29, n. 2, p. 183-195, 2005.

8. ARTIGO CIENTÍFICO

Marine and Petroleum Geology

Insights on sedimentary provenance and evolution of Potiguar Basin, NE Brazil, using U-Pb ages and Lu-Hf isotopes in detrital zircons
--Manuscript Draft--

| | |
|------------------------------|--|
| Manuscript Number: | |
| Article Type: | Full Length Article |
| Keywords: | Detrital zircon provenance; Potiguar basin; Early Cretaceous; Rift; Post-rift |
| Corresponding Author: | Anderson Baesso Universidade Federal do Rio Grande do Sul BRAZIL |
| First Author: | Anderson Baesso |
| Order of Authors: | Anderson Baesso Marcus Vinicius Dorneles Remus Bruno Rafael de Barros Pereira Cristiano Lana Maria Lidia Medeiros Vignol-Lelarge Carla Cristine Porcher |
| Abstract: | U-Pb and Lu-Hf data obtained from detrital zircon of 21 samples from four wells were used to determine the source terrains of the Cretaceous sedimentary rocks of the Pendência, Pescada and Alagamar Formations (rift and post-rift sections) of Potiguar Basin, northeast Brazil. More than 1500 U-Pb concordant ages allowed the determination of the main age peaks in Paleoproterozoic (ca. 2.2-2.0 Ga and 1.9-1.7 Ga) and Neoproterozoic (ca. 0.62-0.55 Ga), matching the ages of rocks from the basement adjacent to the basin (northern portion of Borborema Province). The ϵ_{Hf} values obtained from 61 zircon grains range from 7.67 to -25.43 and are consistent with previously published ϵ_{Hf} values from zircons of the adjacent basement. A meaningful trend in U/Pb age vs ϵ_{Hf} in zircons from Potiguar Basin arenites, where the older Brazilian age grains show juvenile-mantelic signature and the younger, continental crustal signature. This trend mimics the evolution of granitoid generation in the basement adjacent to the Potiguar Basin during the Neoproterozoic orogeny. The age pattern varies vertically in most wells, reflecting the contribution of distinct source areas following the rift evolution. Furthermore, there is a significant difference between the age pattern distribution of samples from wells located at southeast of the grabens and horsts system of the onshore Potiguar Basin and the wells located at northwest, suggesting that this system acted as a barrier to sediment transport, delimiting two sectors on the basin with different sediment sources both in the rift and post-rift sections. Such differences can result in distinct quality for the potential reservoirs in these sectors and would be an important guide for hydrocarbon exploration in Potiguar basin. |
| Suggested Reviewers: | Marc Norman, Ph. D. Senior Fellow, Australian National University Research School of Earth Sciences marc.norman@anu.edu.au Léo Afrâneo Hartmann Universidade Federal do Rio Grande do Sul leo.hartmann@ufrgs.br Neal McNaughton Curtin University n.mcnaughton@curtin.edu.au Cândido Moura Universidade Federal do Para candido@ufpa.br |

Insights on sedimentary provenance and evolution of Potiguar Basin, NE Brazil, using U-Pb ages and Lu-Hf isotopes in detrital zircons

Baesso, A.^{a*}, Remus, M.V.D.^b, Pereira, B.R.B.^c, Lana, C.C.^d, Vignol-Lelarge, M.L.^e, Porcher, C.C.^b

^a Programa de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves, 9500, 91501-970, Porto Alegre, RS, Brazil

^b Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves, 9500, 91501-970, Porto Alegre, RS, Brazil

^c Petrobras Research Center, Ilha do Fundão, Cidade Universitária, Q. 7, 21949-900, Rio de Janeiro, RJ, Brazil

^d Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Morro do Cruzeiro, 35400-000, Ouro Preto, MG, Brazil

^e Departamento de Mineralogia e Petrologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves, 9500, 91501-970, Porto Alegre, RS, Brazil

*corresponding author

Highlights

- Zircon U-Pb ages and Lu-Hf isotopic analyses revealed provenance on Potiguar Basin rift and post-rift sections.
- Northern portion of Borborema Province acted as sediment source.
- Zircon indicates two distinct sectors in the basin in terms of provenance.
- Lu-Hf data reflects the evolution of Neoproterozoic granitoid generation in the adjacent basement.

Abstract

U-Pb and Lu-Hf data obtained from detrital zircon of 21 samples from four wells were used to determine the source terrains of the Cretaceous sedimentary rocks of the Pendência, Pescada and Alagamar Formations (rift and post-rift sections) of Potiguar Basin, northeast Brazil. More than 1500 U-Pb concordant ages allowed the determination of the main age peaks in Paleoproterozoic (ca. 2.2-2.0 Ga and 1.9-1.7 Ga) and Neoproterozoic (ca. 0.62-0.55 Ga), matching the ages of rocks from the basement adjacent to the basin (northern portion of Borborema Province). The ϵ_{Hf} values obtained from 61 zircon grains range from 7.67 to -25.43 and are consistent with previously published ϵ_{Hf} values from zircons of the adjacent basement. A meaningful trend in U/Pb age vs ϵ_{Hf} in zircons from Potiguar Basin arenites, where the older Brazilian age grains show juvenile-mantelic signature and the younger, continental crustal signature. This trend mimics the evolution of granitoid generation in the basement adjacent to the Potiguar Basin during the Neoproterozoic orogeny. The age pattern varies vertically in most wells, reflecting the contribution of distinct source areas following the rift evolution. Furthermore, there is a significant difference between the age pattern distribution of samples from wells located at southeast of the grabens and horsts system of the onshore Potiguar Basin and the wells located at northwest, suggesting that this system acted as a barrier to sediment transport, delimiting two sectors on the basin with different sediment sources both in the rift and post-rift sections. Such differences can result in distinct quality for the potential reservoirs in these sectors and would be an important guide for hydrocarbon exploration in Potiguar basin.

Keywords: Detrital zircon provenance; Potiguar basin; Early Cretaceous; Rift; Post-rift

1. Introduction

The combination of conventional (diagnostic paragenesis) and varietal (chemical and/or isotopic composition of the different species) analyses of heavy minerals allows to identify with precision particular source-rocks, and has become one of the most sensitive and robust tools to constrain the provenance of sediments and sedimentary rocks (Morton, 1985; Stattegger, 1987; Hurst and Morton, 1988; Grigsby, 1992; Morton and Hallsworth, 1994, 1999; Morton and Yaxley, 2007; Remus et al., 2008). These techniques, added to modern analytical microanalysis methodologies, allow the precise determination of the ages of individual grains of detrital zircon, including its chemical (trace and rare earth elements) and isotopic (e.g. Hf) compositions through Inductively-Coupled Plasma Mass Spectrometry by Laser Ablation (LA-ICPMS). These data directly connect the grains found in the sedimentary rocks to the ages of igneous or metamorphic rocks from the source terrains.

The Brazilian marginal basins were formed during the breakup of the Gondwana Supercontinent and present large hydrocarbon reservoirs in their pre-salt and the post-salt sections. These basins are subdivided into East Margin Basins and Equatorial Margin Basins, according to their distinct tectono-stratigraphic histories (Milani et al., 2000). The Potiguar Basin is the easternmost basin of the equatorial margin and represents the link between the Equatorial and East Margin Basins (Milani et al., 2000), with elements of both contexts (Fig. 1). This basin shows a Rift Supersequence deposited on the Lower Cretaceous, a Post-Rift Supersequence deposited during the Alagoas local Stage (corresponding approximately to the Aptian) and a Drift Supersequence deposited from the Albian to the Recent (Pessoa Neto et al., 2007). The oil exploration in this basin started in the 1970s, and recent deep water discoveries have attracted the attention to new exploratory plays, especially in the Aptian section.

Previous provenance studies of the Potiguar Basin based on Nd isotopes are mainly focused on rocks from the Drift section (Maruoka, 2007; Vital et al., 2013). Heavy minerals have been applied to assess the provenance of modern river sediments on the basin (Silva, 1999), however there are no provenance studies based on heavy minerals of rocks from the rift and post-rift sections, only provenance assessments based on essential mineral of the post-rift sections (Pereira, 2020). The lack of outcrops of the rift and post-rift sections of the Potiguar Basin requires the

application of alternative methods to complement the seismic and coring data. In the present work, the sedimentary provenance of rocks from the rift and post-rift sequences was determined through the analysis of zircons from drill cuttings and core samples of Pendência, Pescada and Alagamar Formation of the Potiguar Basin. Based on U-Pb and Lu-Hf analyses, new insights on the zircon populations and its ages, on the probable source areas of these sediments and on the ages of the crust formation events in these areas were obtained.

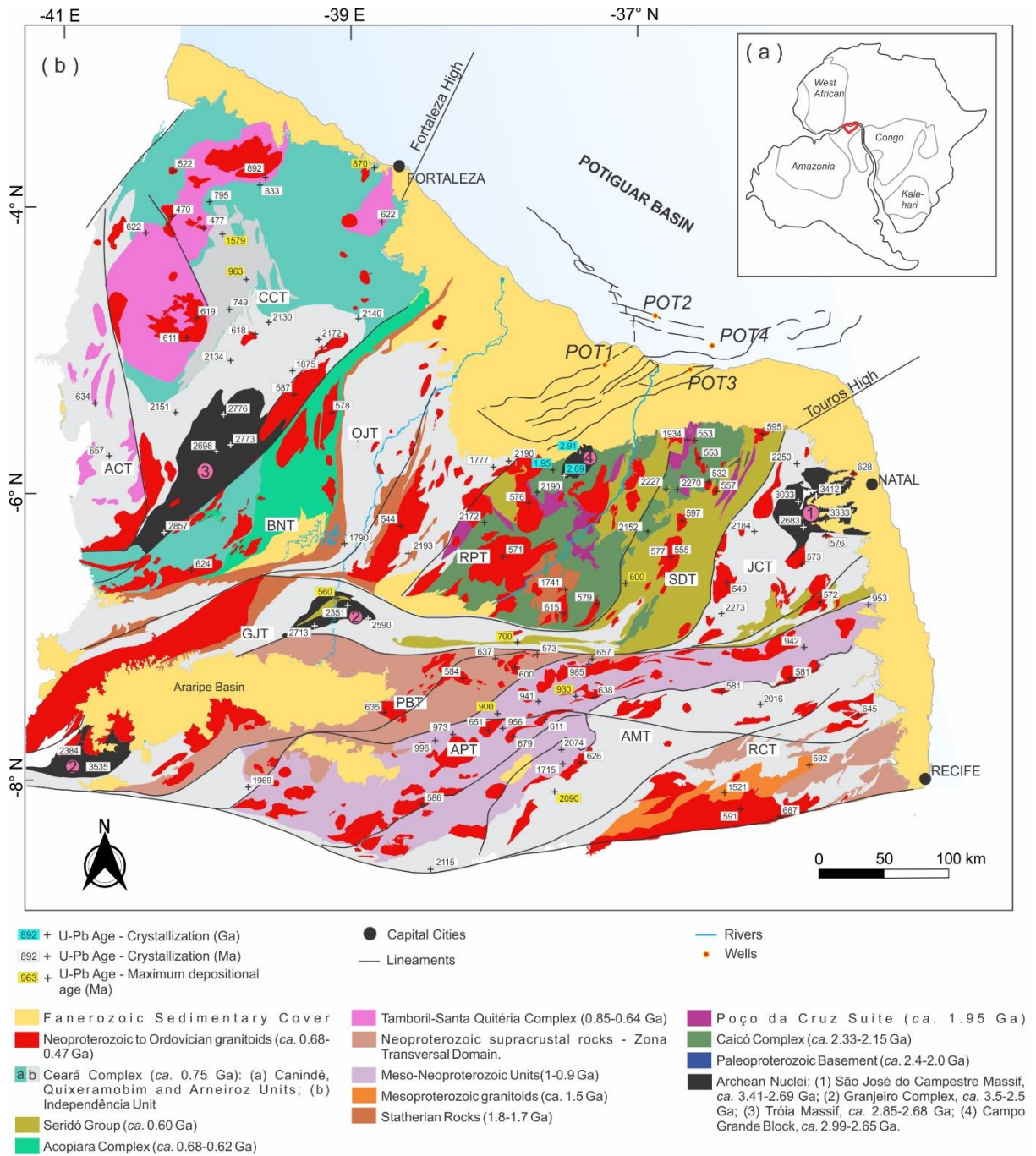


Fig. 1. (a) Location of the study area in the context of the Gondwana Supercontinent. (b) Location of the Potiguar Basin and wells studied, and geology/geochronology of the northern

portion and Transversal Zone of Borborema Province. CCT – Ceará Central Terrain; ACT – Acaraú Terrain; BNT – Banabuiú Terrain; OJT – Orós-Jaguaribe Terrain; RPT – Rio Piranhas Terrain; SDT – Seridó Terrain; JCT – São José do Campestre Terrain; GJT – Granjeiro Terrain; PBT – Piancó-Alto Brígida Terrain; APT - Alto Pajeau Terrain; AMT – Alto Moxotó Terrain; RCT – Rio Capibaribe Terrain. Ages from Dantas (1992), Jardim de Sá (1994), Legrand et al. (1997), Silva et al. (1997), Fetter (1999), Fetter et al. (2000), Angelim and Kosin (2001), Magini (2001), Sá et al. (2002), Silva et al. (2002), Kozuch, (2003), Van Schmus et al. (2003), Castro (2004), Nogueira (2004), Angelim et al. (2006), Dantas et al. (2008), Martins et al. (2009), Dos Santos et al. (2010), Lima et al. (2010), Galindo et al. (2011), Hollanda et al. (2011), (2015), Bautista (2012), De Araujo et al. (2012), Guimarães et al. (2012), Archanjo et al. (2013), Costa et al. (2013), Dantas et al. (2013), Ganade de Araujo et al. (2014), Sá et al. (2014), Arthaud et al. (2015), Ancelmi (2016), Ganade et al. (2017), Pitarello et al. (2019), Ferreira et al. (2020).

2. Geological setting

The Potiguar Basin is one of the Brazilian Equatorial Margin basins formed during the breakup of the Gondwana Supercontinent and the Atlantic Ocean opening. This basin contains an aborted rift on its onshore portion, originated in an extensional context, and a rift on the offshore portion, developed in a transtensional environment, that evolved to a passive margin basin (Pessoa Neto et al., 2007). The Potiguar Basin is limited to the west by the Fortaleza High and Ceará Basin and to the east by the Touros High and Pernambuco-Paraíba Basin, and its basement and southern limits are represented by the Pre-Cambrian rocks of the Borborema Province. The offshore limit, to the north, is the continental slope (Souto Filho et al., 2000).

2.1. Tectonic History and Stratigraphy of the Potiguar Basin

The breakup of the Gondwana Supercontinent on the Equatorial Atlantic occurred during the Aptian-Albian (125-100 Ma), with the opening from west to east (Szatmari et al., 1984; Matos, 1992). Three distensive episodes acted on the region, forming the sedimentary basins located on the Brazilian Equatorial Margin and its African counterparts (Soares Júnior et al., 2008). According to Soares Júnior et al. (2008), the first episode is linked to the opening of the Central Atlantic Ocean, when rifting started in the northern portion of the South American Plate, at approximately 200 Ma, initiating the formation of Amazonas Basin; the second distensive event started in the Lower Cretaceous and lasted until the Aptian, forming the Marajó, Bragança-Viseu,

São Luís and Ilha Nova basins; in the third event, the Equatorial Atlantic Ocean began its development, with the formation of the Potiguar Basin and the advancement of the rift from SE to NW, forming the Ceará, Barreirinhas and Pará-Maranhão basins, respectively.

The first clues of the Gondwana Supercontinent breakup in the Potiguar Basin are the NE-SW oriented basaltic dikes of the Rio Ceará Mirim Upper Jurassic magmatism, whose intrusion occurred in the Sin-Rift I Phase of Matos (1992). The rifting and sedimentation in the basin started in the Berriasian, with the Sin-Rift II Phase (Berriasian-Late Barremian), forming asymmetric half-grabens NE-SW oriented on the onshore portion, separated by basement highs, transfer faults and accommodation zones (Matos, 1992). In the Sin-Rift II Phase, were deposited the fluvio-lacustrine sediments of the onshore portion of Pendência Formation (Pessoa Neto et al., 2007).

From Late Barremian to Early Aptian an important change in the kinematic of the basin happened, with the displacement of the rift axis to the offshore portion, resulting in uplift and erosion of the onshore portion of Potiguar Basin, that became a shoulder of the new rift, and the beginning of rifting in the equatorial sector, with the establishment of transtensional conditions and continuous sedimentation in the offshore portion, while sedimentation started at Benue Trough, in the African Coast (Matos, 1992; Pessoa Neto et al., 2007). The rocks formed in this phase are included in the Rift Supersequence of Pessoa Neto et al. (2007), corresponding to the pelites and coarse arenites deposited in fluvio-deltaic-lacustrine systems of the superior portion of Pendência Formation and to the alluvial and high energy fluvial sedimentary rocks and carbonate embankments of Pescada Formation.

In the Early Aptian the rifting ceased and began the thermal subsidence phase of the basin, with the deposition of the sediments of the Post-Rift Supersequence (Early Aptian to Early Albian) (Pessoa Neto et al., 2007), both in the offshore and onshore portions of the basin. These sediments are grouped in the Alagamar Formation and were deposited on an angular discordance, in alluvial fans, fan-deltaic and braided fluvial systems and deltaic systems (Canto do Amaro and Upanema Members), followed by black shales and calcilutites of the Ponta do Tubarão Layer, interpreted as the record of the first marine incursion into the basin, that were overlapped by the shales deposited in restricted marine environment of the Galinhos Member. Finally, the Drift Phase started with the deposition of fluvio-marine transgressive sequence followed by a clastic and carbonate regressive sequence

2.2. Basement

The Potiguar Basin is delimited to the south by the Borborema Province, while the African counterpart is bordered by the Nigerian Shield. Considering the context of formation of this basin during the separation of South America and Africa (Fig. 1 a), both areas could have acted as sediment sources for the basin.

Geochronological information of the Nigerian Shield is scarce. In this Shield, the Gneissic-Migmatitic Complex is considered the basement *sensu stricto* and is the most extensive unit of the Nigerian basement (Obaje, 2009). According to the author, the Gneissic-Migmatitic Complex is composed by an assemblage of migmatites, ortho and paragneiss, and basic and ultrabasic metamorphosed rocks. This Complex records three main geological events: the first occurred at approximately 2.5 Ga with the first crust formation, sedimentation and orogenic processes; the second, called Eburnean, dates from 2.0 ± 0.2 Ga; and the third, represented by rocks varying in age from 0.90 to 0.45 Ga, corresponds to the Pan-African Event. The Nigerian Shield also contain metasedimentary and metavolcanic rocks of Meso to Neoproterozoic age (1.30 to 0.90 Ga) grouped in the Schist Belts. The granitoids generated in the Pan-African event are called Older Granites, and were emplaced in two pulses, at 0.64-0.62 Ga and at approximately 0.59 Ga (Obaje, 2009). In the Phanerozoic times, a pulse of anorogenic alkaline magmatism occurred, forming the Younger Granites, with ages varying from 213 ± 7 Ma to 141 ± 2 Ma (Obaje, 2009).

The Borborema Province is composed mainly of Mesoarchean to Neoproterozoic age rocks. There are four Archean/Paleoproterozoic nuclei: the São José do Campestre Massif is composed mainly of orthogneiss, migmatites, amphibolites, mafic and metultramafic rocks dated from 3.4 to 2.5 Ga (Dantas et al., 2004; Angelim et al., 2006); the Troia Massif is a terrain of granite-greenstone type with metaplutonic rocks and the respective supracrustal sequences (Silva et al., 2002), whose ages vary from 3.2 to 2.7 Ga (Silva et al., 2002; Ganade et al., 2017); the Granjeiro Complex occurs in two blocks separated by the Araripe Basin, presenting TTG gneisses of 2.5 Ga (Silva et al., 2002) and a metavolcano-sedimentary sequence of 2.7-2.5 Ga (Ancelmi, 2016) in the northern block, and granodioritic and tonalitic gneisses and a metavolcano-sedimentary sequence of 3.53-2.76 Ga in the southern block (Pitarello et al., 2019); and granitic to tonalitic migmatites and mafic/ultramafic rocks located in a small area (c.a. 350 km²) of the Campo Grande Block, dated in 2.90-2.65 Ga (Ferreira et al., 2020).

The Paleoproterozoic basement (Fig. 1) comprises rocks of Rhyacian age (2.30-2.05 Ga), predominantly gneisses and migmatites (Fetter, 1999; Fetter et al., 2000; Angelim et al., 2006; De Souza et al., 2007; Martins et al., 2009; Hollanda et al., 2011; Sá et al., 2014; Arthaud et al., 2015). Still of Paleoproterozoic age, there are the rocks of the Poço da Cruz Suite (CPRM, 2019), corresponding to the orthogneisses G2 of Sá et al., (1995), composed mainly of granodioritic to sienitic augen-gneisses (Sá et al., 2014) dated in 1990 ± 10 Ma (Sá et al., 1995). Similar ages were obtained in rocks of Campo Grande Block by Ferreira et al. (2020). The Statherian Rocks include the metavolcano-sedimentary rocks of 1.80-1.75 Ga of the Orós-Jaguaribe Belt (Sá, 1991) and the Serra Negra Granitic Intrusion dated in 1.74 Ga (Hollanda et al., 2011). Mesoproterozoic orthogneisses were recorded in a small area in the eastern border of Borborema Province, with zircon ages of 1521 ± 7 Ma (Sá et al., 2002; Guimarães et al., 2008).

The Meso-Neoproterozoic rocks comprise the sequences generated during the Cariris Velhos Event that occurs mainly in Alto-Pajeau Domain, represented by the meta-igneous rocks of the Recanto-Riacho do Forno Complex and supracrustal rocks of the Riacho Gravatá, Lagoa das Contendas and São Caetano Complexes, with geochronological ages indicating deposition at the end of the Mesoproterozoic (Brito Neves et al., 1995), ranging between 1.00-0.92 Ga (Caxito et al., 2020). The last event of crust formation in the Borborema Province was the Brazilian/Pan-African orogeny, with the amalgamation of land masses and formation of the Gondwana Supercontinent and associated orogenesis, that resulted in the genesis of basins that were later metamorphosed (Seridó Group, Ceará and Acopiara Complexes, Neoproterozoic Supracrustal Rocks) and in magmatism occurring across the Province. In the NW portion of the Borborema Province the granitoids and migmatites of the Tamboril-Santa Quitéria Complex present ages distributed predominantly between 0.64-0.61 Ga (Fetter et al., 2003; Castro, 2004; Costa et al., 2013), although has been proposed an evolution in an arc environment to Himalayan type collision from approximately 850 Ma to 640 Ma (Costa et al., 2013). Ages up to 0.88 Ga were measured in detrital zircons in the northern part of the Tamboril-Santa Quitéria Complex (Ganade de Araujo et al., 2014). The granitic magmatism in the Province is represented by pre-collisional calc-alkaline plutons ranging in age between 650-630 Ma (Fetter et al., 2003; Van Schmus et al., 2011; Ganade de Araujo et al., 2014; Sial and Ferreira, 2016), sin-collisional pluton of 620 to 590 Ma (Caxito et al., 2020), post-collisional plutons and

smaller intrusive bodies of 590-520 Ma (Caxito et al., 2020) and pegmatitic dykes dated between 515-510 Ma. Lastly, there are small intrusive granitoid bodies representing the post-orogenic magmatism of Ordovician age (approximately 480 Ma), mainly located in the Ceará Central Terrain (Castro et al., 2012).

3. Methodology

Twenty-one core samples from four wells located both in the onshore and offshore portions of the Potiguar Basin were collected by Petróleo Brasileiro S.A. (Fig. 1). The samples were collected in irregular intervals, until the depth of 3.7 km, from the rift (Pendência and Pescada Formations) and post-rift (Alagamar Formation) sections. The samples were sent to the Instituto de Geociências of the Universidade Federal do Rio Grande do Sul, where the separation of the minerals and mounting of the grains were performed. In the samples with sufficient material, at least 100 grains of zircon per sample were selected and analysed.

The heavy minerals fraction was separated using the methodology described by Mange and Maurer (1992), with the separation of fine to very fine sand fraction (0.250 - 0.062 mm), followed by decarbonation using hydrochloric acid, separation by density in bromoform and magnetic separation through a Frantz Isodynamic Magnetic Separator. The zircon grains were picked manually using a binocular magnifier and mounted in 25 mm diameter mounts and polished to expose the interior of the grains. The grains were imaged by Backscattered Scanning Electron and Cathodoluminescence, part in the Universidade Federal do Rio Grande do Sul and part in the Universidade Federal de Ouro Preto. The images were used to identify the internal textures and inclusions on the grains, as well as overgrowths and recrystallization textures, to locate the spot for the U/Pb analyses and, in some cases, Lu/Hf.

The U/Pb and Lu/Hf analyses were made at the Laboratório de Geoquímica Isotópica of Universidade Federal de Ouro Preto. A mass spectrometer Element 2 Thermo-Finnigan Neptune ICP-MS coupled to a Photom-Machines 193 nm excimer laser system was used for the U/Pb analyses. The data were obtained with a 20 s measurement of gas blank and spot diameter of 30 μm , aiming whenever possible to the grain borders. The isotopic data reduction was done using the GLITTER software. The method consists in subtraction of the blank gas and then the correction of the

downhole fractionation, compared to the reference zircons used (BB, Santos et al., 2017; GJ-1, Jackson et al., 2004, Morel et al., 2008; and Plesovice, Sláma et al., 2008). The common lead correction was made, when necessary, using the compositional model of Stacey and Kramers (1975). The data were processed using the Microsoft Excel macro Isoplot 3.00 (Ludwig, 2003). Zircon ages with discordance higher than 10% were discarded. The interpretation of zircons older and younger than 1.0 Ga was based on $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages, respectively. The R package for provenance of Vermeesch et al. (2016) was used for statistical treatment of the data and generation of a multidimensional scaling graph.

After the analysis of the U/Pb data, it was observed the presence of zircon grains of Brazilian age of approximately 0.6 Ga in all the samples. In order to try to discriminate the possible sources of these grains were analysed the Lu/Hf isotopic ratio in 61 zircon grains of four samples from the POT-2 well. The Lu/Hf analyses were performed at the same laboratory than the U/Pb, using the same patterns plus the Mudtank (Woodhead and Hergt, 2005) pattern. A MC-ICP-MS Thermo Finnigan Neptune coupled to a HelEx Photon Machine laser with a 40 μm spot and ablation time of 60 s was used to perform the analysis. The ^{176}Lu decay constant used to calculate the $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ was of $1.867 \times 10^{-11}/\text{year}$. The $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ ratio and ϵ_{Hf} were calculated using the average values for Mid Ocean Ridge Basalts of Chauvel et al., (2008), juvenile crust of Dhuime et al. (2011) and TDM2 of Blichert-Toft (2008).

4. Results

4.1. U/Pb age

Zircons from 21 samples of four wells (POT-1, POT-2, POT-3 and POT-4) were analyzed, adding up to more than 2000 grains. The results are presented by well and stratigraphic unit (Fig. 2), except in the intervals where were observed significative differences of the age populations of different samples in the same unit. The Canto do Amaro and Upanema members of these same wells were studied by Pereira (2020) from the sedimentologic and petrologic viewpoint in order to evaluate the quality of these reservoirs.

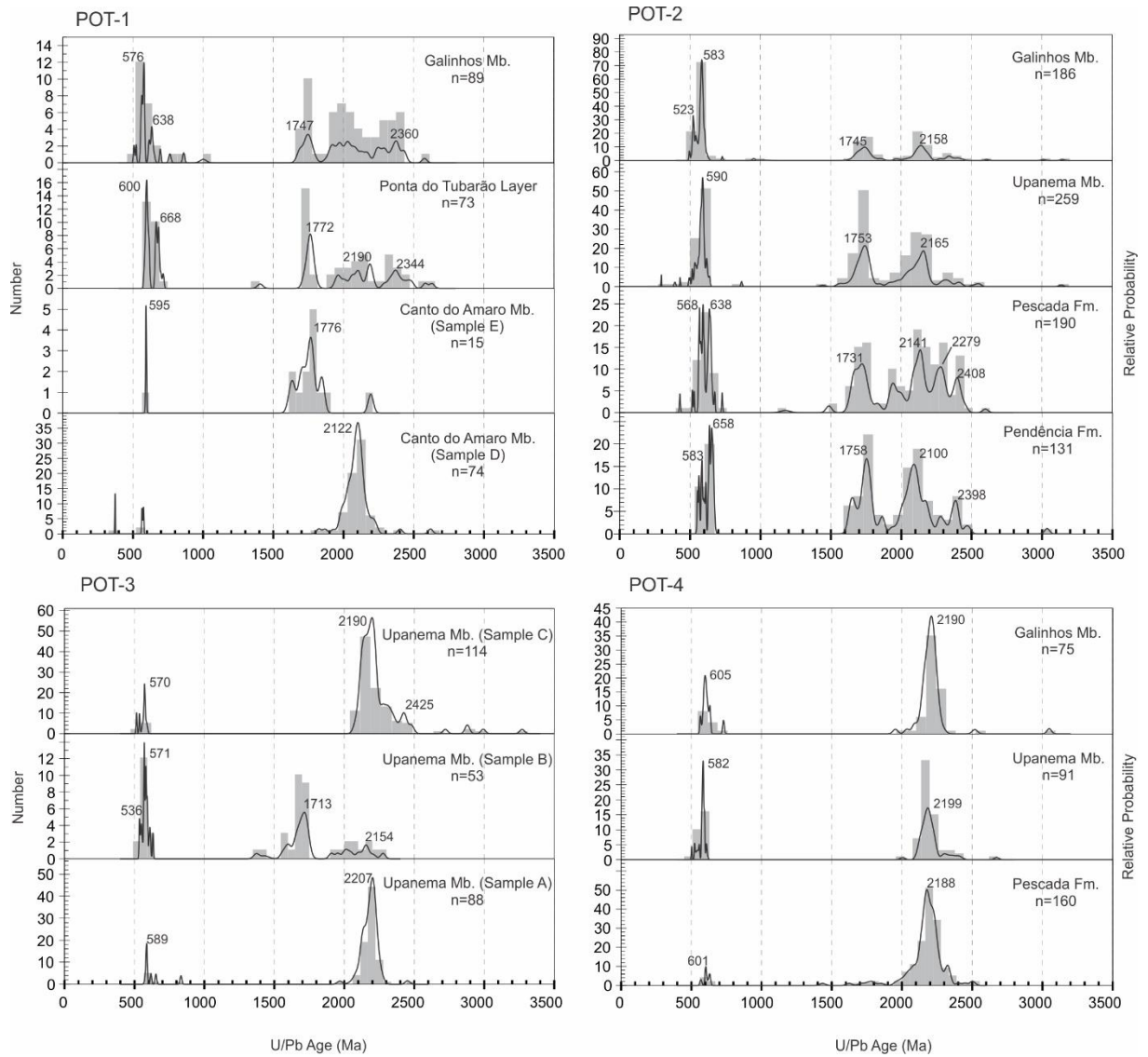


Fig. 2. Probability distribution of zircon U/Pb ages for the studied units and samples of POT-1, POT-2, POT-3 and POT-4 wells.

4.1.1. *Pendência Formation*

A total of 162 grains were dated from two samples of the Pendência Formation (well POT-2), with 131 concordant grains. The ages vary from 3035 to 553 Ma, revealing important peaks in the Paleoproterozoic and Neoproterozoic. Paleoproterozoic grains are distributed predominantly in the 2420-2340 Ma (7%), 2190-2000 Ma (30%), and 1800-1600 Ma (27%) intervals. The Neoproterozoic U/Pb ages are concentrated in the 670-620 Ma (11%) and 600-550 Ma (7%) intervals.

4.1.2. *Pescada Formation*

Four samples of this unit were dated, two from POT-2 (243 grains of which 190 are concordant) and two from the POT-4 (192 grains of which 160 are concordant). The ages range from 2599 to 428 Ma, with the Paleoproterozoic and Neoproterozoic peaks. The ages are mainly in the 2400-2000 Ma (62%), 1780-1630 Ma (11%), 680-610 Ma (6%) and 600-590 Ma (6%) intervals.

4.1.3 *Alagamar Formation – Upanema Member*

Nine samples of the Upanema Member were dated, three from POT-2 (315 analyzes, 256 concordant ages), three from POT-3 (337 grains analyzed, 256 concordant ages) and two from POT-4 (192 grains analyzed and 91 concordant ages), resulting in a total of 844 U/Pb analyses and 603 concordant ages. The ages vary between 3138 Ma and 295 Ma, and show the same Paleoproterozoic and Neoproterozoic peaks as the samples from the inferior formations (Fig. 2), with ages concentrated in the 2300-2000 Ma (50%), 1800-1600 Ma (15%) and 610-550 Ma (17%).

4.1.4. *Alagamar Formation – Canto do Amaro Member*

The samples of this unit were collected only in POT-1 (two samples), from which were analyzed 141 zircon grains, resulting in 89 concordant ages. The majority of the ages are Paleoproterozoic, distributed in two main intervals: 2300-2000 Ma (70%) and 1900-1600 Ma (16%). Neoproterozoic grains are rare.

4.1.5. *Alagamar Formation – Ponta do Tubarão Layer*

One sample of this unit from POT-1 was studied, with 84 zircon grains analyzed that resulted in 73 concordant ages, varying from 2630 Ma to 581 Ma, distributed predominantly in the 2400-2200 Ma (11%), 2200-2000 Ma (18%), 1800-1600 Ma (22%), 700-630 Ma (14%) and 610-550 Ma (14%).

4.1.6. *Alagamar Formation – Galinhos Member*

Four samples of the Galinhos Member were analyzed from three different wells: POT-2 (two samples), POT-4 and POT-1. A total of 390 grains was analyzed, resulting in 350 concordant ages. The obtained ages vary from 3147 Ma to 494 Ma, distributed mainly in the 2300-2000 Ma (34%), 1800-1600 Ma (10%), 670-610 Ma (4%), 610-550 Ma (25%) and 550-500 Ma (7%).

4.1.7. *Th/U ratio and zircon textures and morphology*

The Th/U ratios showed values predominantly higher than 0.3 for all the samples (Fig. 3), indicating a predominance of igneous rocks as sediment source of these zircons. It can be observed that zircon grains from POT-3 and POT-4 wells shows Th/U ratios higher than grains from POT-1 and POT-2 wells. Classically, zircons with Th/U ratio higher than 0.1 are classified as igneous, but there are cases when metamorphic zircons can present high Th/U ratios that superimpose the igneous, as zircons derived from granulitic rocks (Rubato, 2017).

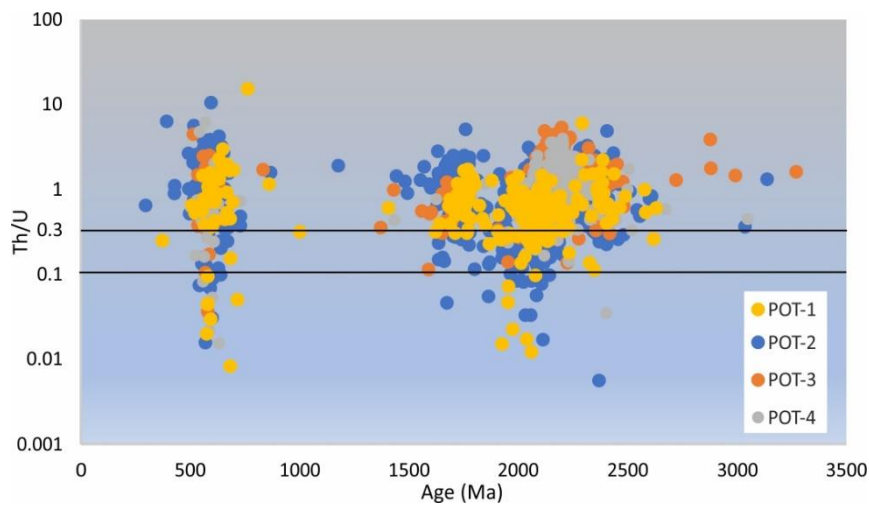


Fig. 3. Th/U ratios vs U/Pb ages for the analyzed zircons showing a predominance of Th/U ratios higher than 0.3 for all ages, and higher ratios in zircons of POT-3 and POT-4 than in POT-1 and POT-2 wells.

The morphological and textural characteristics of the analyzed grains, separated by well, unit and sample when relevant, are presented in Table 1. Some selected images of the zircons are show in Fig 4.

Table 1. Morphological and textural characteristics of the analysed zircons.

| Well | Unit | Age Peaks (Ga) | Detrital zircon morphology |
|-----------|--|--|--|
| POT-1 | Galinhos Mb. | 0.59-0.55 | Subangulous with oscillatory zoning |
| | | 0.65-0.61 | Subangulous with oscillatory zoning |
| | | 1.80-1.65 | Subangulous to rounded, homogeneous or showing oscillatory zoning, sometimes with a bright rim |
| | | 2.50-1.90 | Angulous to rounded, homogeneous, or with concentric, oscillatory, sector or convolute zoning, sometimes with a bright rim |
| | Ponta do Tubarão Layer | 0.61-0.55 | Angulous grains, with oscillatory zoning, and, rarely, homogeneous |
| | | 0.70-0.63 | Angulous to rounded, with oscillatory or irregular zoning, sometimes with bright rims. |
| | | 1.80-1.70 | Angulous to subangulous, with oscillatory zoning. Rare grains rounded and homogenous also occur. |
| | 2.50-1.90 | Angulous to rounded, showing oscillatory or parallel, often with a bright rim. Homogeneous grains and with inherited cores also occur. | |
| | Sample E (Canto do Amaro Mb) | 1.90-1.60 | Angulous to rounded, homogeneous or with concentric or irregular zonation, sometimes with a bright rim. |
| | Sample D (Canto do Amaro Mb) | 2.30-2.00 | Subangulous to rounded, generally with reabsorption features and metamorphic rims. |
| POT-2 | Galinhos Mb. | 0.55-0.50 | Generally fragmented, angulous with concentric zonation, rarely with a bright rim or inherited core |
| | | 0.61-0.55 | Generally fragmented, angulous to subrounded, bright or dark homogeneous, or with concentric zonation, sometimes faint or partially obliterated, with inclusions |
| | | 1.80-1.60 | Subangulous to subrounded, homogeneous or with faint oscillatory zoning, rarely with reabsorption features |
| | | 2.20-2.10 | Subangulous to subrounded, homogeneous or with oscillatory zoning partially obliterated or reabsorption features, sometimes with a bright rim |
| | Upanema Mb. | 0.60-0.55 | Angulous to rounded, homogeneous or with oscillatory or parallel zoning |
| | | 1.80-1.65 | Angulous to rounded, homogeneous or with oscillatory or parallel zoning, sometimes with bright rim |
| | | 2.20-2.00 | Angulous to rounded, with oscillatory zonation, sometimes with a bright rim, rarely homogeneous |
| | Pescada Fm. | 0.60-0.55 | Angulous to subangulous, homogeneous or with oscillatory zoning |
| | | 0.68-0.61 | Predominantly subrounded, homogeneous or with oscillatory or irregular zonation |
| | | 1.78-1.63 | Subangulous to subrounded, with oscillatory zoning, rarely with recrystallization and regrowth zoning |
| | Pendência Fm. | 2.40-1.90 | Subangulous to subrounded, homogeneous or with complex zonation, rarely with oscillatory zonation |
| | | 0.60-0.55 | Angulous to subrounded, homogeneous or with oscillatory or convolute zoning |
| | | 0.67-0.62 | Predominantly rounded, homogeneous or with irregular zoning, or with features indicative of metamorphism and anatexy |
| | | 1.80-1.70 | Angulous to rounded, homogeneous or with oscillatory zoning, sometimes partially obliterated |
| 2.40-2.00 | Angulous to rounded, homogeneous or with oscillatory or convolute zonation, rarely with inherited core or metamorphic rims | | |
| POT-3 | Sample C (Upanema Mb.) | 2.30-2.05 | Angulous to rounded, with concentric, parallel, in sector or convolute zonation, rarely homogeneous, often with a bright rim |
| | Sample B (Upanema Mb.) | 0.60-0.55 | Angulous to subrounded with oscillatory zonation, rarely with convolute zonation or homogeneous |
| | | 1.80-1.60 | Angulous to subrounded, with oscillatory zoning, often with a bright rim, rarely homogeneous |
| | | 2.30-1.90 | Angulous, homogeneous or with oscillatory zoning |
| | Sample A (Upanema Mb.) | 0.60-0.55 | Angulous to subrounded, homogeneous or with oscillatory zoning |
| 2.30-2.00 | | Subrounded to rounded, with complex internal textures, sometimes with convolute zoning | |
| POT-4 | Galinhos Mb. | 0.67-0.55 | Subangulous to subrounded, predominantly homogeneous, but also with oscillatory zoning |
| | | 2.30-2.15 | Angulous to rounded, with internal textures indicative of anatexy, and some homogeneous grains or with concentric or convolute zoning |
| | Upanema Mb. | 0.61-0.55 | Angulous to rounded, homogeneous or with oscillatory zoning, sometimes partially obliterated |
| | | 2.30-2.10 | Subrounded to rounded, with internal textures indicative of anatexy, and some grains with oscillatory zoning |
| | Pescada Fm. | 0.67-0.55 | Angulous to subangulous, homogeneous or with oscillatory zoning |
| | | 2.30-2.10 | Angulous to rounded, homogeneous or with oscillatory or convolute zoning, some showing a bright rim |

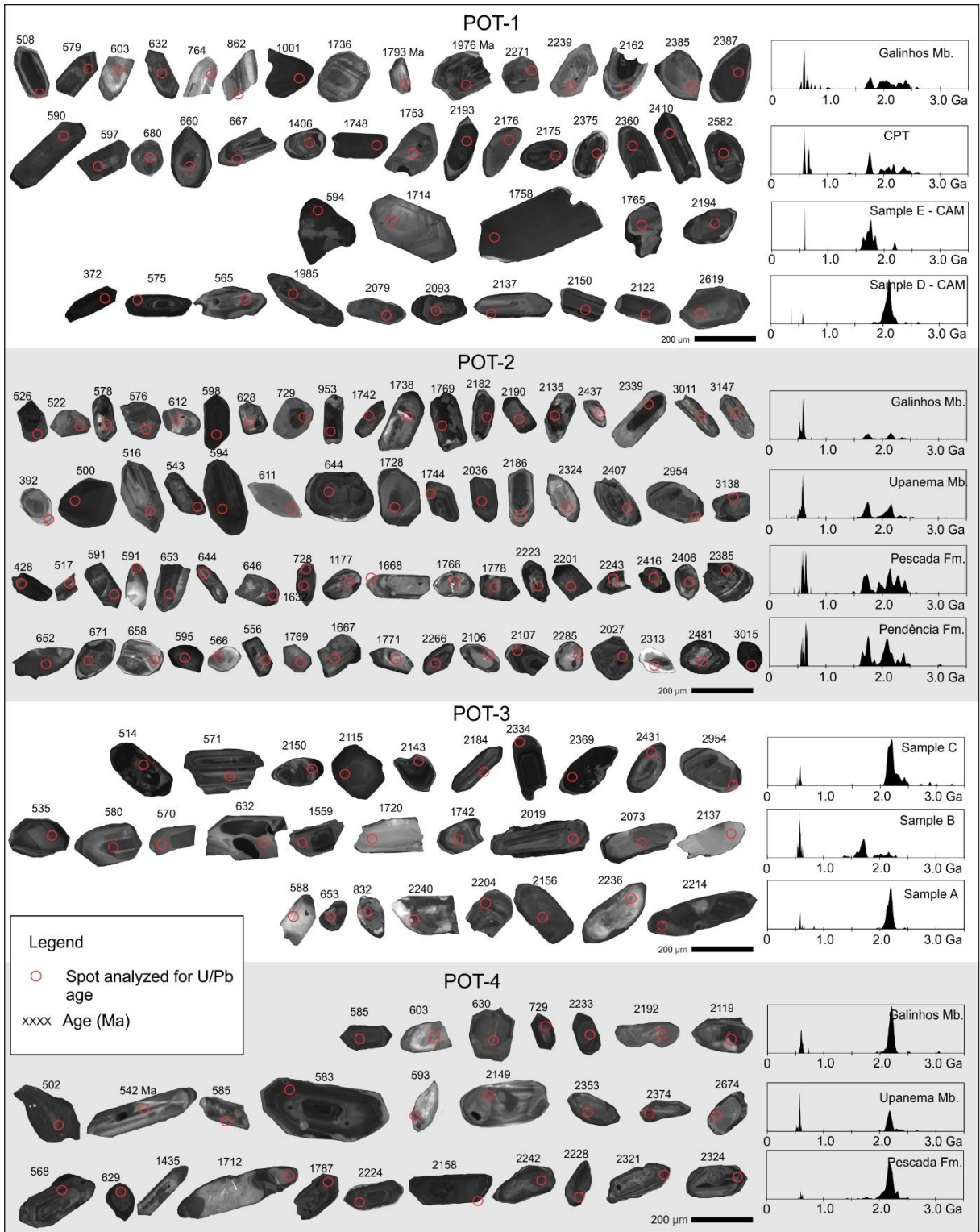


Fig. 4. Cathodoluminescence images of representative detrital zircon grains. The red circles indicate the spots of analysis, with diameter of 30 μ m. Numbers above the grains are the ages obtained in Ma (without the error). Graphs at the right shows the probability distribution of ages for each unit or sample studied.

Generally, it is observed a predominance of zircons with igneous textures (oscillatory zoning) in POT-1 and POT-2 wells, while in POT-3 and POT-4 wells zircons with textures indicative of anatexy are more common (e.g. convolute zoning, reabsorption features), mainly in the Paleoproterozoic grains. Metamorphic zircons are rare in all samples. The samples from POT-1 and POT-2 wells do not show significant textural variances of the zircons vertically, while in the POT-3 well, in the inferior sample (A) there is a majority of zircons with textures indicative of anatexy, followed by a dominance of igneous zircons in the samples B and C. In the POT-4 well igneous zircons are most present in the sample of Pescada Formation, changing to a predominance of zircons with anatexy features in the Upanema and Galinhos Members of Alagamar Formation. Rounded zircons are present in all samples, but always in small quantities, and mainly Paleoproterozoic in age.

4.2. Lu/Hf ratios

Sixty-one zircon grains were analyzed from four samples of POT-2 well, from Pendência and Pescada Formations and Upanema and Galinhos Members of Alagamar Formation. The majority of the analyzed grains are Neoproterozoic in age, but nine Statherian grains were also analyzed. ϵ_{Hf} positive values were found only in Neoproterozoic grains (Fig. 5), mainly in those older than 590 Ma, in the Pendência and Pescada Formations and Upanema Member. Positive values are indicative of juvenile contribution in the magma from which these zircons formed. Zircons younger than 590 Ma presents ϵ_{Hf} values predominantly negative, reaching values up to -25.4 and TDM ages of 2.6 Ga. A trend is observed in the ϵ_{Hf} values of the Neoproterozoic zircons, where older grains (>590 Ma) showed positive values, that reduce with age, showing an increase in the crustal contribution in the magmas where these zircons formed. TDM ages for Neoproterozoic grains vary from 2.6 to 0.8 Ga. Statherian zircons presents only negative ϵ_{Hf} values and TDM ages ranging from 2.6 to 2.2 Ga.

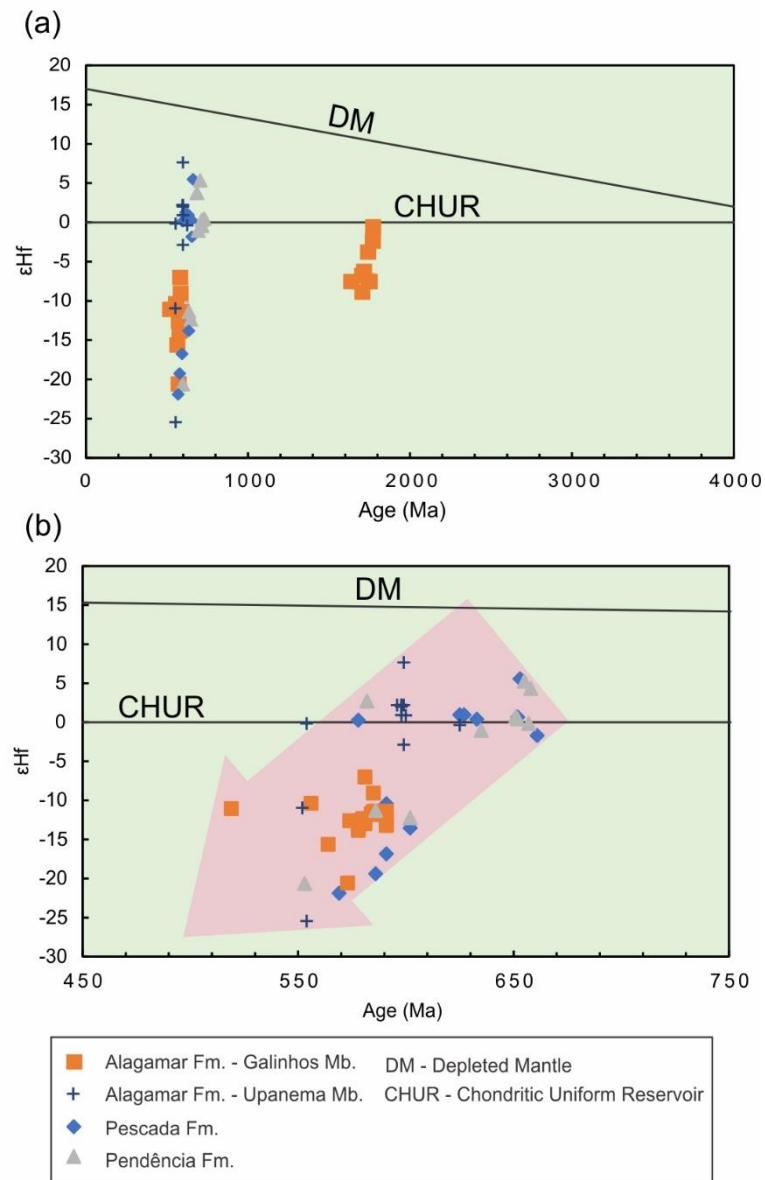


Fig. 5. In (a), diagram ϵ_{Hf} vs age of the units of well POT-2. In (b) is shown a zoom in the Neoproterozoic-Ordovician interval. The arrow indicates a trend observed in the Neoproterozoic zircons, where older grains show positive ϵ_{Hf} values and younger grains, negative values.

5. Discussions

5.1. Provenance of detrital zircon

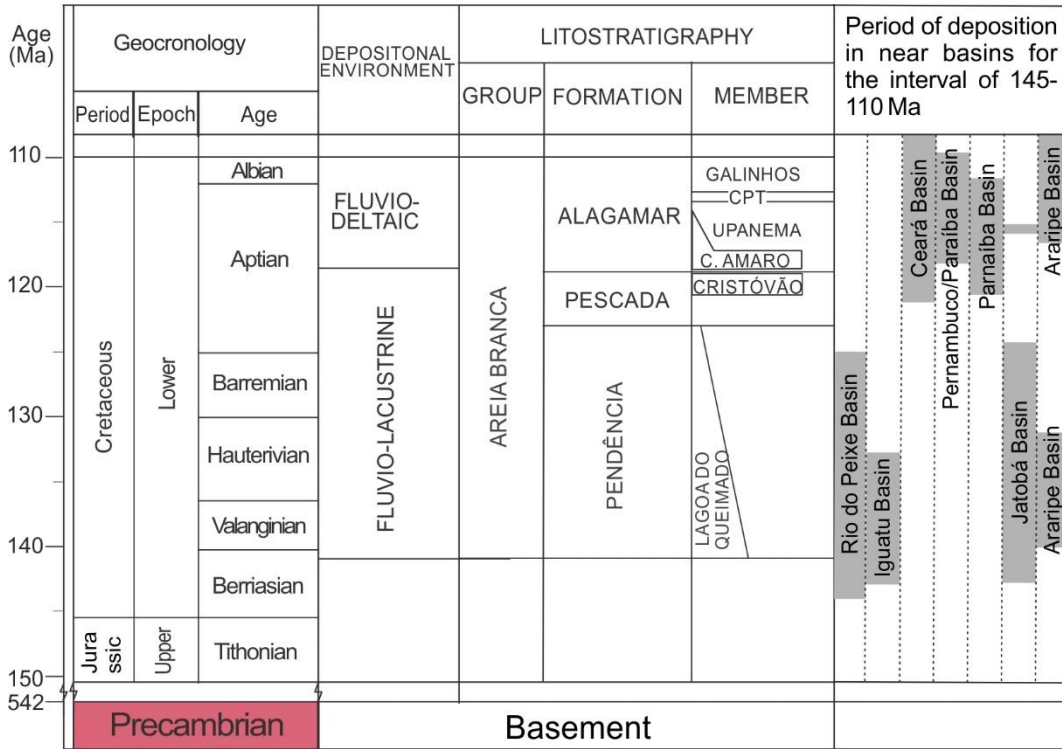
5.1.1. Paleogeographic context and premises

The deposition of the sediments of the Pendência, Pescada and Alagamar formations of Potiguar Basin occurred from early Berriasian to early Albian (Pessoa Neto et al., 2007). Paleogeographic reconstructions indicate that, besides the

Borborema Province, the Nigerian Shield was located adjacently to the basin (Basile et al., 2005; Seton et al., 2012; Ganade et al., 2016), also representing a possible source area for detritus. However, considering the position of the studied wells (two onshore and two offshore, but close to the Brazilian coast) and the absence of an age group on our samples that combine with specific ages of the Nigerian Shield, the Brazilian portion was assumed as the only source of the sediments that filled the basin.

The widespread development of rift and passive margin basins in the Brazilian and African continental margins and in the continent interior during the opening of the Atlantic Ocean probably has caused the reorganization of the drainage systems and competition for sediments between the basins. The presence of the Pernambuco/Paraíba, Parnaíba, Araripe, Ceará, Iguatu and Rio do Peixe basins with active sedimentation contemporaneously to the deposition of the studied units of the Potiguar Basin probably restricted the sediments sources to the closest portions of the basement (Fig. 6). This scenario is illustrated by Assine (1994) and Assine et al. (2016). Based in the proximal to distal transition from southwest to northeast observed in the Alagamar Formation of the Potiguar Basin and in the stratigraphic framework of the Parnaíba Basin, where continental facies in the south and southeast transitioning to marine facies to the north point out to the existence of emerged land in the south and southeast at the time, Assine et al (2016) suggests the existence of a division in the drainage systems between the Potiguar and Parnaíba basins in the Aptian. Taking into account this transition observed in the Alagamar Formation and drainage patterns indicating transport from north to south in the continental sequences of Araripe Basin, Assine (1994) proposes a division in the drainages between the Potiguar and Araripe basins, following approximately the Patos Lineament. The absence of zircons of Cariris Velhos age in the rocks of the rift and post-rift sections of Potiguar Basin apparently confirms this hypothesis, since a large amount of rocks was formed during this event in the Transversal Zone, south of the Patos Lineament (Guimarães et al., 2012, 2016; Santos et al., 2019).

(a)



(b)

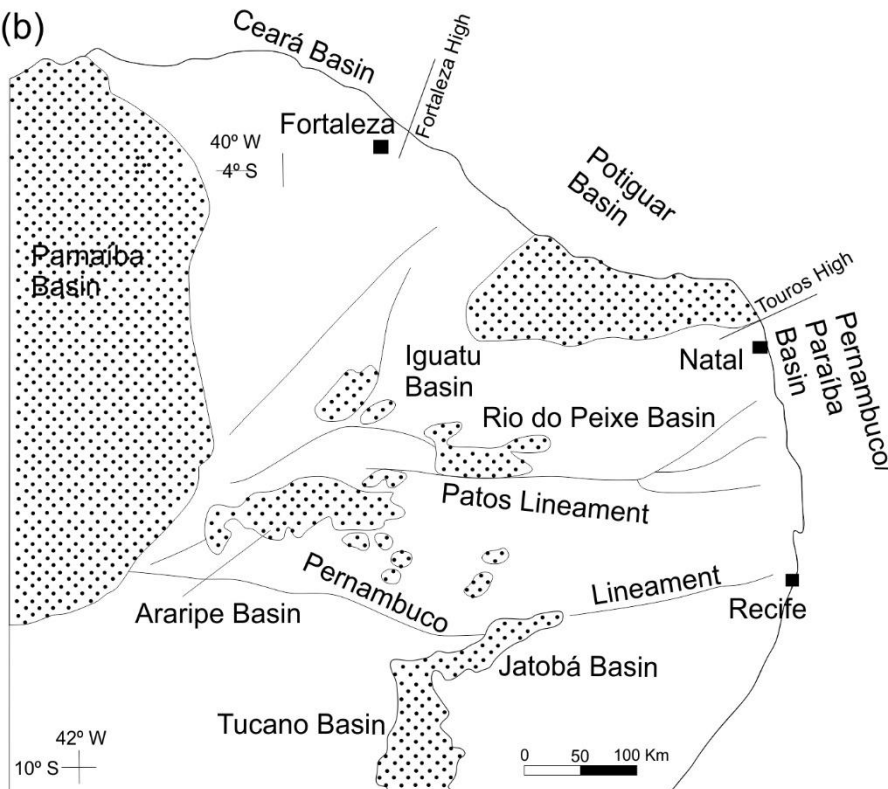


Fig. 6. (a) Stratigraphic chart of the Potiguar Basin in the period of 145-110 Ma (modified from Pessoa Neto et al., 2007) and periods of deposition in near basins (Lima Filho et al., 2006; Condé et al., 2007; Costa et al., 2007; Vaz et al., 2007; Córbona et al., 2008; Marques et al., 2014; Silva, 2018). (b) Location of main related basins (modified from Ponte and Asmus, 1976, 1978, Sztatmari et al., 1987 and Garcia et al., 1998).

5.1.2. Provenance

The results of the zircon analyses indicate multiple sediment sources of the units studied in the different wells and even in distinct samples of a same unit (Upanema Member – Alagamar Formation, POT-3 and Canto do Amaro Member – Alagamar Formation, POT-1). A feature common to all samples is the insignificant presence of 1.0-0.9 Ga ages, indicating small or no contribution of sediments from Alto Pajeau Terrain, constraining the source areas to the northern portion of the Borborema Province (Fig. 1).

The Pendência Formation was sampled only in the well POT-2. The main peak ages observed are approximately (1) 2.40 Ga, (2) 2.15 Ga, (3) 1.75 Ga, (4) 0.65 Ga e (5) 0.58 Ga. These ages correspond to ages found in the (1) Paleoproterozoic Basement, on some small-scale occurrences in the Ceará Central and Seridó terrains, (2) Paleoproterozoic Basement, (3) Statherian Rocks, (4) some Neoproterozoic granitoids and rocks of the Tamboril-Santa Quitéria Complex and (5) Neoproterozoic granitoids. The source rocks for the sediments of the Pendência Formation in the region of the well probably were located in the Ceará Central (2.40, 2.15, 0.65 Ga), Banabuiú (1.75, 0.57 Ga), Orós-Jaguaribe (2.15, 1.75, 0.57 Ga), Rio Piranhas (2.15, 1.75, 0.57 Ga) e Granjeiro (2.15, 1.75, 0.57 Ga) terrains. The eastern terrains, Seridó and São José do Campestre, could also have been source of sediments, but the transport routes would need to crosscut the grabens and horsts of the onshore portion of the basin.

Samples from Pescada Formation were obtained in the wells POT-2 and POT-4. This unit shows peaks in (1) 2.40 Ga, (2) 2.20 Ga, (3) 2.15 Ga, (4) 1.75 Ga, (5) 0.63 Ga and (6) 0.57 Ga in well POT-2, while in well POT-4 there was only a main peak at 2.20 Ga and some ages at approximately 0.60 Ga. The different ages indicate distinct sources for the sediments in this unit, with more variety of ages in well POT-2, probably as consequence of a bigger variety of rock types contributing with sediments and, possibly, reflecting the existence of a hydrographic basin draining a greater area than in the well POT-4. The probable source terrains for well POT-2 rocks are the Ceará Central Terrain (2.40, 2.15, 0.65 Ga), Banabuiú Terrain (1.57, 0.57 Ga), Orós-Jaguaribe (2.15, 1.75, 0.57 Ga), Rio Piranhas (2.15, 1.75, 0.57 Ga) e Granjeiro (2.15, 1.75, 0.57 Ga) terrains. In well POT-4 the source rocks probably are located in the northeast Rio Piranhas Terrain (2.19, 0.60 Ga), in the Seridó (2.19, 0.60 Ga) and São José do Campestre (2.19, 0.60 Ga) terrains.

The Canto do Amaro Member of Alagamar Formation was sampled only in the well POT-1, in two depth intervals. These samples showed significant variations in the age distribution, while the sample of the inferior portion (Sample D) presents only a significant peak at 2.10 Ga, indicating a contribution virtually limited to the Paleoproterozoic basement, probably in the most proximal to the basin portions of Orós-Jaguaribe and Rio Piranhas terrains. The Sample E presents majority of the ages c.a. 1.77 Ga, indicating a source different from the previous sample, but also geographically constrained to the Orós-Jaguaribe and Rio Piranhas terrains. According to Pessoa Neto et al. (2007), this formation is characterized by fan-deltaic and braided fluvial systems, which agrees with an interpretation of small distances of transport and source area close to the basin and geographically restrict.

The Upanema Member was sampled in the POT-2, POT-3 and POT-4 wells, and presents important age peaks at 2.20 Ga, 2.15 Ga, 1.75 Ga and 0.58 Ga. Ages of 2.15, 1.75 and 0.58 Ga occur in well POT-2, with small variations in the three samples, indicating small or no variation in the source areas during this unit's deposition. These same ages occur in well POT-3, but with significant variations in the samples (Fig. 2), with A and C samples presenting a main peak at 2.20 Ga and few Neoproterozoic ages, and the B sample showing predominantly 1.70 and 0.58 Ga ages. In well POT-4 there are two main peaks in 2.20 and 0.58 Ga. The inferred sources can be located at the Banabuiú (1.75, 0.58 Ga), Orós-Jaguaribe (2.15, 1.75, 0.58 Ga), Rio Piranhas (2.15, 1.75, 0.58 Ga) Granjeiro (2.15, 1.75, 0.58 Ga) and eastern part of Ceará Central (2.15 Ga) Terrain for well POT-2; northeast part of Rio Piranhas Terrain (2.19, 0.58 Ga) and Seridó (2.19, 0.58 Ga) and São José do Campestre (2.19, 0.58 Ga) terrains for well POT-4; proximal portions of Rio Piranhas (2.15, 0.58 Ga), Seridó (2.15, 0.58 Ga) and São José do Campestre (2.15 and 0.58 Ga and rare Archean ages) terrains for A and C samples of well POT-3 and São José do Campestre (2.15, 0.58 Ga), Seridó (2.15, 0.58 Ga), Rio Piranhas (2.15, 1.75, 0.58 Ga), Orós-Jaguaribe (2.15, 1.75, 0.58 Ga), Banabuiú (2.15, 1.75, 0.58 Ga) and Granjeiro (2.15, 1.75, 0.58 Ga) terrains for Sample B. Considering that Neoproterozoic granitoids are widespread in the Borborema Province, the presence of few zircons of this age being transported into the basin probably indicates a geographically restricted and proximal source area, with the drainage system collecting sediments predominantly from Paleoproterozoic Basement for A and C samples of POT-3 well, while Sample B had a distinct source. The observed distinction between these samples could (1) indicate a relatively fast

variation in the drainage patterns in the source areas and in the distribution of sediments inside the basin, or (2) be consequence of a positioning in a paleogeographic context proximal to a river junction, where lateral migrations of the channels (Dixon et al., 2018) could have deposited sediments in the same point coming from two distinct sources without the need of significative changes in the drainage pattern as a whole. The similarity between the age distribution of samples A and C and the small difference in depth among the three samples (the difference in depth from Sample A to C is of only 27 meters, and Sample B is in the middle) suggests to be the second case.

The one sample analyzed from Ponta do Tubarão Layer, in well POT-1, showed age peaks in approximately 2.35, 2.15, 1.77, 0.66 and 0.60 Ga. Probable source rocks would be in Ceará Central, Banabuiú, Orós-Jaguaribe, Rio Piranhas and Granjeiro terrains. The Seridó and São José do Campestre terrains also comprise rocks with corresponding ages, but the transport routes of sediments would need to crosscut the grabens system in the onshore portion of Potiguar Basin.

Finally, the samples from Galinhos Member were collected in POT-1, POT-2 and POT-4 wells. This unit shows ages of 2.35, 2.19, 2.00, 1.75, 0.63, 0.58 and 0.52 Ga, also showing different patterns in different wells. The well POT-4 presents only ages in 2.19 Ga and 0.60 Ga, with the possible sources located in the northeast part of Rio Piranhas Terrain (2.19, 0.60 Ga), in the Seridó and São José do Campestre (2.19, 0.60 Ga) terrains. In well POT-1 this unit presents zircons dated in 2.35, 2.00, 1.75, 0.63 and 0.58 Ga, and the possible source rocks located in the Ceará Central, Banabuiú, Orós-Jaguaribe, Rio Piranhas, and Granjeiro terrains. In well POT-2 the Galinhos Member shows zircons dated in 2.19, 1.75, 0.58 and 0.52 Ga, and rocks with similar ages can be found in the Ceará Central (2.19 Ga), Banabuiú (1.75, 0.58, 0.52 Ga), Orós-Jaguaribe (2.19, 1.75, 0.58 Ga), Rio Piranhas (2.19, 1.75, 0.58 Ga) and Granjeiro (2.19, 1.75, 0.58 Ga) terrains, with emphasis on the larger quantity of zircons dated at 0.52 Ga that probably indicates a proportional increase of pegmatitic bodies as sediment source, possibly associated to the Solonópole-Quixeramobim Pegmatitic District, in the Banabuiú Terrain.

Meso-Neoproterozoic, Mesoproterozoic and Neoproterozoic (0.9-0.7 Ga) zircon grains are rare in the studied samples, never forming significant age groups. Mesoarchean grains are found systematically in the samples of Pendência and Alagamar formations in the POT-2, POT-3 and POT-4 wells, suggesting some

contribution of the Archean rocks of São José do Campestre Terrain. Neoproterozoic and Neoproterozoic (0.90-0.70 Ga) ages can be found in the Ceará Central, Granjeiro, Rio-Piranhas and Alto Pajeau terrains, but it is not possible to affirm that these were the source areas because the Borborema Province comprises Neoproterozoic supracrustal sequences with a complex composition of detrital zircon (Fig. 7), which could also have been the source rocks to the zircon grains. Grains younger than 450 Ma (430 and 296 Ma – Upanema Member of well POT-2 and 371 Ma, Sample D of well POT-1) do not have rocks of corresponding age registered in the Borborema Province. Fig. 9 shows the possible routes of sediment transport from the Province to the Basin.

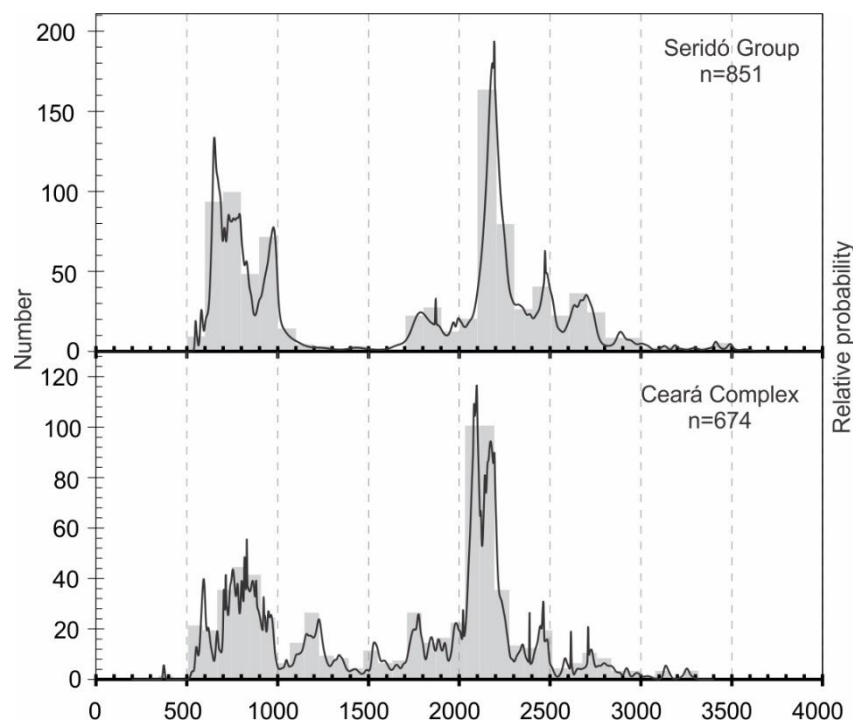


Fig. 7. Probability distribution of U/Pb ages of detrital zircon of Seridó Group and Ceará Complex. Ages compiled from Van Schmus et al. (2003), De Araujo et al. (2012), Arthaud et al. (2015) and Hollanda et al. (2015).

In Fig. 8 is presented a multidimensional scaling diagram generated from the U/Pb analysis using the Kolmogorov-Smirnov method. The diagram shows a clear difference in the age populations of the samples from wells located to northwest of the grabens system of onshore portion of Potiguar Basin (POT-1 and POT-2) and to southeast (POT-3 and POT-4), suggesting distinct source areas and some influence of this system in the control of sediment dispersal at the time of deposition of rift and

port-rift rocks. The samples D and E of well POT-1 are out of any clustering, probably as a consequence of a restricted source area, as discussed above. The Sample B of well POT-3 also is out of both the groupings and presents a more significative similarity with the samples of the wells located northwest of the grabens system, due to the presence of Statherian zircons.

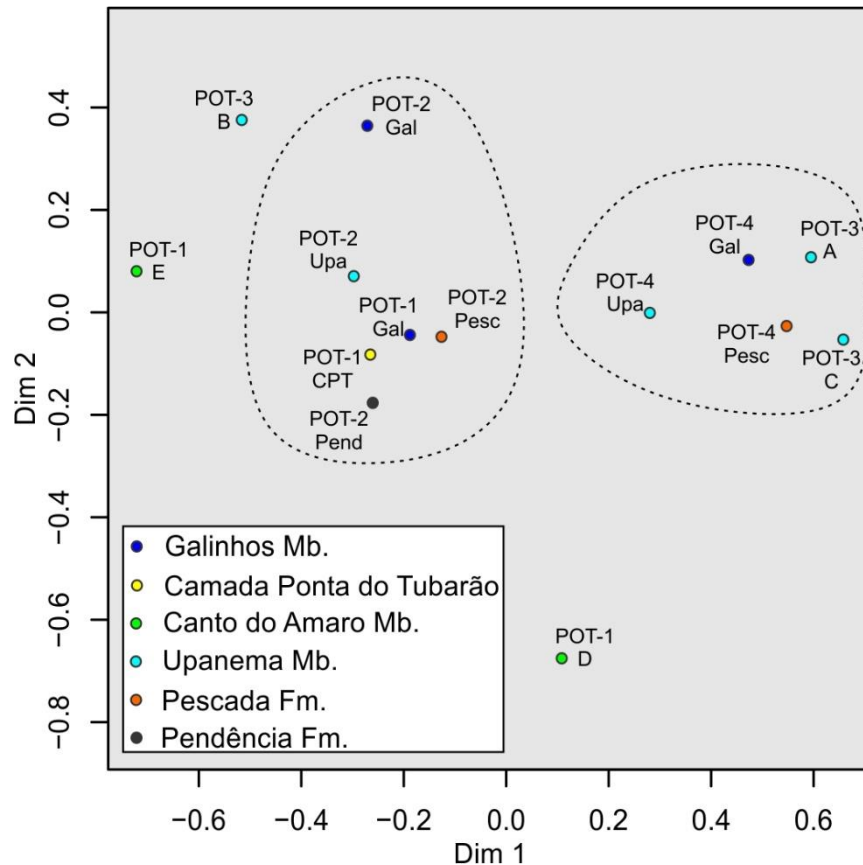


Fig. 8. Multidimensional scaling diagram (MDS) of the U/Pb ages obtained. Pend – Pendência Formation; Pesc – Pescada Formation; Upa – Upanema Member; PTL – Ponta do Tubarão Layer; Gal – Galinhos Member.

The internal textures of the zircons are also evidences of this distinction between samples from the wells located northwest and southeast of the grabens system, showing a predominance of zircons with igneous textures in POT-1 and POT-2 wells, and textures that can indicate high-grade metamorphism of anatexis in POT-3 and POT-4 wells.

It is worth to note that these differences in the provenance pattern are not limited to the rift phase (Pendência and Pescada formations) but continue during the post-rift phase (Alagamar Formation), indicating that the patterns of sediment distribution

established in the rift phase persisted, at least in basin scale, to the post-rift phase. This division of the source areas can reflect different potential quality in the siliciclastic reservoirs of Pendência and Alagamar formations in the two sectors of the basin.

The Lu/Hf analysis of zircons of well POT-2 showed negative ϵ_{Hf} values for Statherian grains. Statherian rocks occur in the Banabuiú, Orós-Jaguaribe, Rio Piranhas and Granjeiro terrains, and are essentially metavolcano-sedimentary and granitic-granodioritic orthogneiss interpreted as anorogenic magmatism (Sá, 1991). There has no Lu/Hf information of these rocks. The analysis of Neoproterozoic zircons presents ϵ_{Hf} values close to 0 in 660-610 Ma age zircons, and more negative values in younger zircons (590-550 Ma). The zircons also present a trend where the ϵ_{Hf} values decrease from the lower units to the top, with lower values in the Galinhos Member, that coincide with the younger U/Pb ages. A similar pattern of ϵ_{Hf} in Neoproterozoic zircons was observed in rocks of the Uruburetama Granite (Gorayeb et al., 2020), located in the northern portion of the Ceará Central Terrain, suggesting that this area could have been a source for these sediments. However, the scarce studies using Hf isotopes in Neoproterozoic rocks of Borborema Province hamper precise correlations between source and sediments by this method.

5.1.3. *Polycyclic zircons*

In all studied wells the zircons are predominantly of first sedimentary cycle, with a subordinate quantity of rounded grains, typically polycyclic. The rounded zircons present ages mainly Paleoproterozoic, while Neoproterozoic zircons are predominantly subangulose to angulose. The possible sources for the polycyclic zircons are (1) sedimentary rocks of Phanerozoic basins, such as Parnaíba Basin, (2) metamorphic rocks of the Neoproterozoic supracrustal sequences (Seridó Group and Ceará Complex) and (3) reworking of sediments deposited in the onshore portion of Potiguar Basin during Rift I Phase. In the case of reworking of sediments, a lesser proportion of polycyclic zircons in the onshore wells and in the Pendência Formation samples would be expected, but this was not observed. The erosion of Phanerozoic sedimentary rocks is plausible, but the predominance of rounded zircons of Paleoproterozoic age suggests the erosion of the Neoproterozoic supracrustal sequences as the main source of these grains.

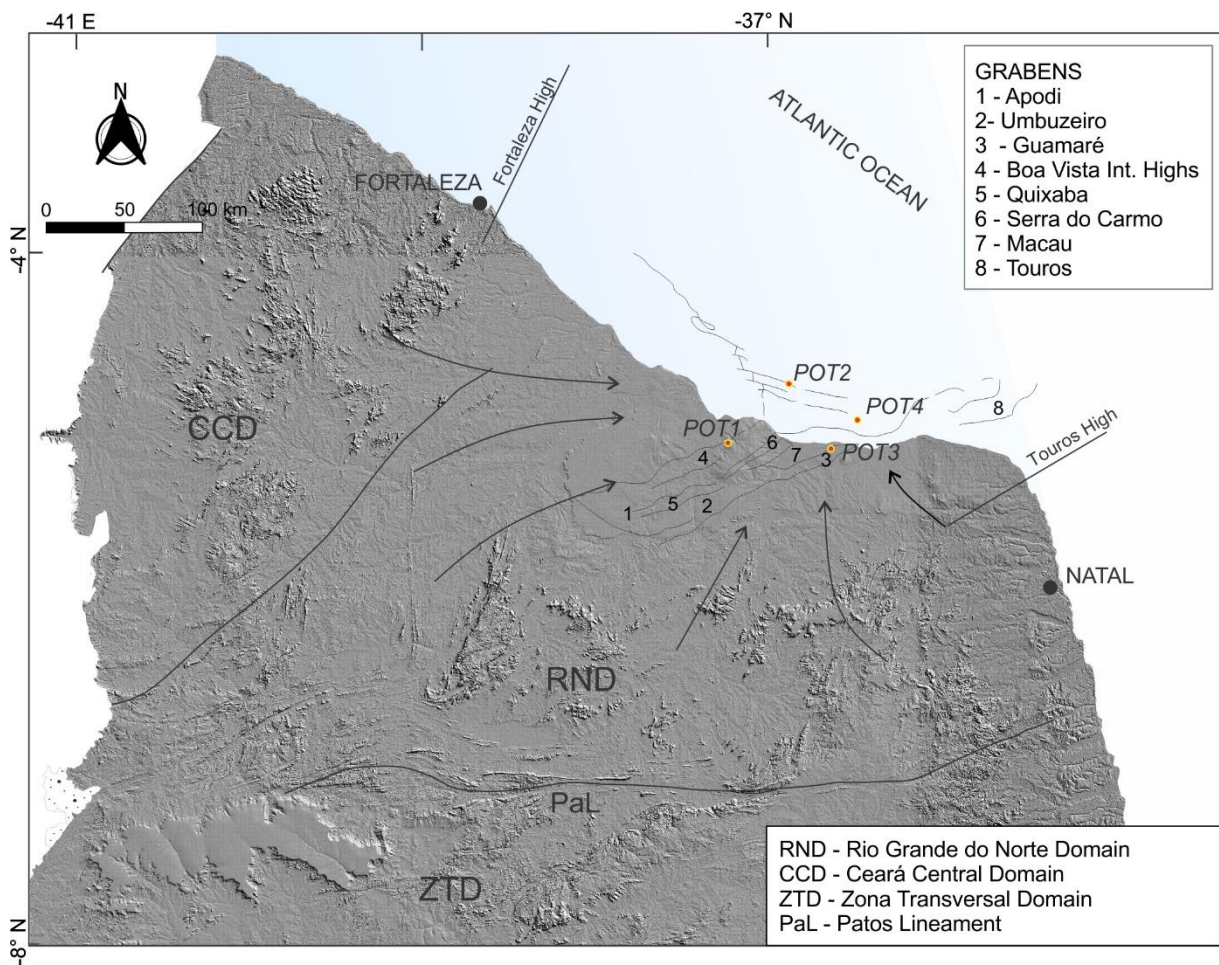


Fig. 9. Digital elevation map (SRTM, 30 m) showing the northern portion of Borborema Province. The arrows indicate the probable sediment routes in the basin.

5.1.4. Trend Lu/Hf in the Neoproterozoic detrital zircons and the connection with juvenile arc x crustal melting Neoproterozoic granitoids

Caxito et al. (2020) summarize the Neoproterozoic magmatism of the Borborema Province in four main intervals: (1) 820-650 Ma, without direct evidence of magmatism, but indicated by detrital zircon in the Ceará Central Terrain (Ganade de Araujo et al., 2014), interpreted as island arc magmatism; (2) 650-620 Ma, represented by pre-collisional calc-alkaline plutons that can be found in the Ceará Central Terrain and to the south of the Patos Lineament, in the Piancó-Alto Brígida and Alto Pajeáu terrains; (3) 620-590 Ma, represented by sin-collisional plutons; (4) 590-510 Ma, with the formation of post-collisional granitic plutons. The Neoproterozoic detrital zircons analyzed for Lu/Hf in this study show a trend of participation of continental crust in the

generation of the magmas in the zircons younger than 610 Ma. This trend, where the older grains show juvenile-mantelic derivation and the younger grains show continental crust derivation, mimics the geotectonic evolution and granitoid generation in the basement adjacent to the Potiguar Basin in the Neoproterozoic times. The older events involve the generation of arc granitoids with participation of mantelic material (island arc in the Ceará Central Terrain), followed by granitoids of crustal melting as a consequence of crustal thickening occurred during the closing of oceans and continental collisions.

Detailed but local studies using Lu/Hf in zircon were performed in the Uruburetama Granite (Gorayeb et al., 2020) and in granitoids and migmatites in the northern portion of the Tamboril-Santa Quitéria Complex (Ganade de Araujo et al., 2014). The results obtained in this work are consistent with the results obtained by Gorayeb et al. (2020), where zircons dated between 650-630 Ma shows values of ϵ_{Hf} close to zero and younger zircons (590-550 Ma), values lower than -15, and with the data obtained by Ganade de Araujo et al. (2014) for the Tamboril-Santa Quitéria Complex, with ϵ_{Hf} values close to zero to slightly positive for zircons older zircons (660-630 Ma).

In the zircons analyzed in this study, only those younger than 610 Ma showed ϵ_{Hf} values strongly negative, indicating that in its source area the collisional stage with predominant crustal contribution in the formation of magmas had started close by this time. On the other hand, zircons with ϵ_{Hf} values positive or close to 0 were dated in up to 550 Ma, suggesting that the mantelic contribution in the magma generation continued at least to this moment.

6. Conclusions

The clastic sedimentary rocks of the rift and post-rift phases of Potiguar Basin had the rocks of the northern portion of Borborema Province (Ceará Central and Rio Grande do Norte Domains) as their source areas, with small or no contribution of rocks of the central portion (Zona Transversal Domain). Vertical variations in the source areas are significant in the samples of the onshore wells, between units or between samples of the same units, probably as consequence of changes in the depositional systems (variations between units) and/or due to the evolution of the hydrographic basins.

There is a clear distinction between the source areas of the sedimentary rocks located at northwest of the onshore grabens system and the ones located at southeast, for both the rift and post-rift sections. This contrast is evident in the multidimensional scaling diagram generated from the U/Pb ages. There is also a significative difference between the age populations of the samples of wells located northwest of the onshore grabens (POT-1 and POT-2) and southeast (POT-3 and POT-4), suggesting distinct source areas and showing an important influence of this system in the control of sediment dispersion. The grabens and horsts generated in the Rift I phase were determinant in the segmentation of the basin in two sectors regarding the drainage system and sediment dispersal. Therefore, a difference in the quality between the Pendência and Alagamar reservoirs in these two sectors is possible, as a consequence of the distinct source terrains.

Remarkably, it was identified for the first time a trend of ages x Lu/Hf in the arenites of Potiguar Basin, where the older Neoproterozoic grains shows a juvenile-mantelic derivation and the younger, a continental crust derivation. This trend mimics the tectonic and magmatic evolution of the basement adjacent to the Potiguar Basin during the Neoproterozoic. The older events involved the generation of arc granitoids with effective participation of mantelic material.

Acknowledgments

The authors are thankful to the National Petroleum Agency (ANP) for the financial assistance for this project and to PETROBRAS-ANP / UFRGS-FAURGS (TC 5850.0105992.17.9) for granting permission for publication. To the Postgraduate Program in Geosciences (PPGGeo). To the Center for Studies in Petrology and Geochemistry (CPGq) at the Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) and Geology Department of Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) for the availability of analytical techniques and the support of its technical staff.

References

Ancelmi, M.F., 2016. Geocronologia e geoquímica das rochas arqueanas do Complexo Granjeiro, Província Borborema. Universidade Estadual de Campinas.

Angelim, L.A. de A., Kosin, M., 2001. Geologia/Estratigrafia Aracaju-NW: folha SC. 24-V. Recife.

Angelim, L.A. de A., Nesi, J.R., Torres, H.H.F., Medeiros, V.C., Santos, C.A., Junior, J.P. V., Mendes, V.A., 2006. Geologia e Recursos Minerais do Estado do Rio Grande do Norte.

Archanjo, C.J., Viegas, L.G.F., Hollanda, M.H.B.M., Souza, L.C., Liu, D., 2013. Timing of the HT/LP transpression in the Neoproterozoic Seridó Belt (Borborema Province, Brazil): Constraints from UPb (SHRIMP) geochronology and implications for the connections between NE Brazil and West Africa. *Gondwana Res.* 23, 701–714. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.05.005>

Arthaud, M. H., Fuck, R.A., Dantas, E.L., Santos, T.J.S., Caby, R., Armstrong, R., 2015. 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. *J. South Am. Earth Sci.* 58, 223–237. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2014.09.007>

Assine, M.L., 1994. Paleocorrentes e Paleogeografia na Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. *Rev. Bras. Geociências* 24, 223–232.

Assine, M.L., Quaglio, F., Warren, L.V., Simões, M.G., 2016. Comments on paper by M. Arai “Aptian/Albian (Early Cretaceous) paleogeography of the South Atlantic: A paleontological perspective”. *Brazilian J. Geol.* <https://doi.org/10.1590/2317-4889201620150046A>

Basile, C., Mascle, J., Guiraud, R., 2005. Phanerozoic geological evolution of the Equatorial Atlantic domain. *J. African Earth Sci.* 43, 275–282. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2005.07.011>

Bautista, J.M.R., 2012. Estudo de proveniência sedimentar de sequências neoproterozóicas ao longo do lineamento Patos (Província Borborema, NE do Brasil). Universidade de São Paulo, São Paulo. <https://doi.org/10.11606/D.44.2012.tde-12062015-093701>

Blichert-Toft, J., 2008. The Hf isotopic composition of zircon reference material 91500. *Chem. Geol.* <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.05.014>

- Brito Neves, B.B., Van Schmus, W.R., Dos Santos, E.J., Campos Neto, M. da C., Kozuch, M., 1995. O Evento Carirís Velhos na Província Borborema: Integração de Dados, Implicações e Perspectivas. *Rev. Bras. Geociências* 25.
- Castro, N.A., 2004. Evolução Geológica Proterozóica da região entre Madalena e Taparuaba, Domínio Tectônico Ceará Central (Província Borborema). Universidade de São Paulo.
- Castro, N.A., Ganade de Araujo, C.E., Basei, M.A.S., Osako, L.S., Nutman, A.A., Liu, D., 2012. Ordovician A-type granitoid magmatism on the Ceará Central Domain, Borborema Province, NE-Brazil. *J. South Am. Earth Sci.* 36, 18–31. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jsames.2011.11.007>
- Caxito, F., Santos, L., Ganade de Araujo, C., Bendaoud, A., Fettous, E.-H., Bouyo, M., 2020. Toward an integrated model of geological evolution for NE Brazil–NW Africa: The Borborema Province and its connections to the Trans-Saharan (Benino-Nigerian and Tuareg shields) and Central African orogens. *Brazilian J. Geol.* 50. <https://doi.org/10.1590/2317-4889202020190122>
- Chauvel, C., Lewin, E., Carpentier, M., Arndt, N.T., Marini, J.C., 2008. Role of recycled oceanic basalt and sediment in generating the Hf-Nd mantle array. *Nat. Geosci.* <https://doi.org/10.1038/ngeo.2007.51>
- Condé, V.C., Lana, C.C., Pessoa Neto, O. da C., Roesner, E.H., Morais Neto, J.M., Dutra, D.C., 2007. Bacia do Ceará. *Bol. Geociencias da Petrobras* 15, 347–355.
- Córboda, V.C., Antunes, A.F., Jardim De Sá, E.F., Silva, A.N., Sousa, D.C., Lins, F.A.P.L., 2008. Análise estratigráfica e estrutural da Bacia Rio do Peixe, Nordeste do Brasil: integração de dados a partir do levantamento sísmico pioneiro 0295_rio_do_peixe_2d. *Bol. Geociencias da Petrobras* 16, 53–68.
- Costa, F.G., De Araújo, C.E.G., Da Silva Amaral, W., Vasconcelos, A.M., Rodrigues, J.B., 2013. U-Pb (LA-ICPMS) zircon ages and Nd isotopes for granitoids of the Tamboril-Santa Quitéria Complex, Ceará Central Domain: Implication for neoproterozoic syncollisional magmatism in north Borborema Province. *Geol. USP - Ser. Cient.* 13, 159–174. <https://doi.org/10.5327/Z1519-874X2013000200009>
- Costa, I.P., Bueno, G.V., Milhomem, P. da S., Lima e Silva, H.S.R., Kozin, M.D., 2007. Sub-bacia de Tucano Norte e Bacia de Jatobá. *Bol. Geociencias da Petrobras* 15, 445–453.

CPRM, 2019. Unidades Geológico-Ambientais - 1:1.000.000 [WWW Document]. CPRM - Serviço Geológico do Bras. URL http://geowebapp.cprm.gov.br/ViewerWEB/index_geodiv.html (accessed 5.12.19).

Dantas, E.L., 1992. Evolução tectonomagmática do maciço polidiapírico São Vicente/Florânia-RN. Universidade Estadual de São Paulo.

Dantas, E.L., De Souza, Z.S., Wernick, E., Hackspacher, P.C., Martin, H., Xiaodong, D., Li, J.W., 2013. Crustal growth in the 3.4-2.7Ga São José de Campestre Massif, Borborema Province, NE Brazil. *Precambrian Res.* 227, 120–156. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2012.08.006>

Dantas, E.L., Negrão, M.M., Buhn, B., 2008. 2.3 Ga continental crust generation in the Rio Grande do Norte terrane, NE Brazil., in: VI South American Symposium on Isotope Geology. Bariloche, p. 40.

Dantas, E.L., Van Schmus, W.R., Hackspacher, P.C., Fetter, A.H., De Brito Neves, B.B., Cordani, U., Nutman, A.P., Williams, I.S., 2004. The 3.4-3.5 Ga São José do Campestre massif, NE Brazil: Remnants of the oldest crust in South America. *Precambrian Res.* 130, 113–137. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2003.11.002>

De Araujo, C.E.G., Cordani, U.G., Basei, M.A.S., Castro, N.A., Sato, K., Sproesser, W.M., 2012. U-Pb detrital zircon provenance of metasedimentary rocks from the Ceará Central and Médio Coreaú Domains, Borborema Province, NE-Brazil: Tectonic implications for a long-lived Neoproterozoic active continental margin. *Precambrian Res.* 206–207, 36–51. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2012.02.021>

De Souza, Z.S., Martin, H., Peucat, J.J., Jardim De Sá, E.F., De Freitas Macedo, M.H., 2007. Calc-alkaline magmatism at the Archean-Proterozoic transition: The Caicó Complex Basement (NE Brazil). *J. Petrol.* 48, 2149–2185. <https://doi.org/10.1093/petrology/egm055>

Dhuime, B., Hawkesworth, C., Cawood, P., 2011. When continents formed. *Science* (80-.). <https://doi.org/10.1126/science.1201245>

Dixon, S.J., Sambrook Smith, G.H., Best, J.L., Nicholas, A.P., Bull, J.M., Vardy, M.E., Sarker, M.H., Goodbred, S., 2018. The planform mobility of river channel confluences: Insights from analysis of remotely sensed imagery. *Earth-Science Rev.* 176, 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.09.009>

Dos Santos, E.J., Schmus, W.R. Van, Kozuch, M., Neves, B.B. de B., 2010. The Cariris Velhos tectonic event in Northeast Brazil. *J. South Am. Earth Sci.* 29, 61–76. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jsames.2009.07.003>

Ferreira, A., Dantas, E., Fuck, R., Nedel, I., 2020. Arc accretion and crustal reworking from late Archean to Neoproterozoic in Northeast Brazil. *Sci. Rep.* 10, 7855. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64688-9>

Fetter, A.H., 1999. U/Pb and Sm/Nd geochronological constraints on the crustal framework and geologic history of Ceará State, NW Borborema Province, NE Brazil: implications for the assembly of Gondwana. Kansas University.

Fetter, A.H., Saraiva dos Santos, T.J., Van Schmus, W.R., Hackspacher, P.C., de Brito Neves, B.B., Arthaud, M.H., Nogueira Neto, J.A., Wernick, E., 2003. Evidence for Neoproterozoic continental arc magmatism in the Santa Quitéria Batholith of Ceará State, NW Borborema Province, NE Brazil: Implications for the assembly of West Gondwana. *Gondwana Res.* [https://doi.org/10.1016/S1342-937X\(05\)70975-8](https://doi.org/10.1016/S1342-937X(05)70975-8)

Fetter, A.H., Van Schmus, W.R., Santos, T.J.S., Arthaud, M.H., Nogueira Neto, J.A., 2000. U-Pb and Sm-Nd geochronological constraints on the crustal evolution and basement architecture of Ceará State, NW Borborema Province, NE Brazil: implications for the existence of the Paleoproterozoic supercontinent Atlantica. *Rev. Bras. Geociências* 30, 102–106.

Galindo, A.C., Srivastava, N.K., Souza, L.C., Maia, H.N., Sá, J.M., 2011. Nota Explicativa da Folha Apodi.

Ganade, C.E., Basei, M.A.S., Grandjean, F.C., Armstrong, R., Brito, R.S., 2017. Contrasting Archean (2.85–2.68 Ga) TTGs from the Tróia Massif (NE-Brazil) and their geodynamic implications for flat to steep subduction transition. *Precambrian Res.* 297, 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.05.007>

Ganade, C.E., Cordani, U.G., Agbossoumounde, Y., Caby, R., Basei, M.A.S., Weinberg, R.F., Sato, K., 2016. Tightening-up NE Brazil and NW Africa connections: New U-Pb/Lu-Hf zircon data of a complete plate tectonic cycle in the Dahomey belt of the West Gondwana Orogen in Togo and Benin. *Precambrian Res.* 276, 24–42. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2016.01.032>

Ganade de Araujo, C.E., Cordani, U.G., Weinberg, R.F., Basei, M.A.S., Armstrong, R., Sato, K., 2014. Tracing Neoproterozoic subduction in the Borborema Province (NE-

Brazil): Clues from U-Pb geochronology and Sr-Nd-Hf-O isotopes on granitoids and migmatites. *Lithos* 202–203, 167–189. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.05.015>

Garcia, A., Morad, S., De Ros, L., Al-Aasm, I., 1998. Palaeogeographical, palaeoclimatic and burial history controls on the diagenetic evolution of reservoir sandstones: evidence from the Lower Cretaceous Serraria. *Carbonate Cem. Sandstones Distrib. Patterns Geochemical Evol. (Special Publ. 26 IAS)* 107–140.

Gorayeb, P. S. S., Silva-Silva, L. C., Galarza, M. A., 2000. Geology, geochronology Pb-Pb, U-Pb-Hf zircon and Sm-Nd TDM of the Uruburetama batholith, Northern Borborema Province: contextualization in the Santa Quitéria Magmatic Arc. *Brazilian Journal of Geology* 50. <https://doi.org/10.1590/2317-4889202020200034>

Grigsby, J.D., 1992. Chemical fingerprinting in detrital ilmenite; a viable alternative in provenance research? *J. Sediment. Res.* 62, 331–337. <https://doi.org/10.1306/D42678F7-2B26-11D7-8648000102C1865D>

Guimarães, I. de P., Mariano, G., da Silva, J.M.R., Correia, P.D.B., Neves, S.P., Cabral, A.F., Silva, F.M.J. V., Chagas, I.T., Miranda, T.S., Oliveira, S.L., Freire, B.S., 2008. *Geologia da Folha Belo Jardim SC. 24-XB-III. Brasília.*

Guimarães, I.P., de Fatima L. de Brito, M., de A. Lages, G., da Silva Filho, A.F., Santos, L., Brasilino, R.G., 2016. Tonian granitic magmatism of the Borborema Province, NE Brazil: A review. *J. South Am. Earth Sci.* 68, 97–112. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2015.10.009>

Guimarães, I.P., Van Schmus, W.R., de Brito Neves, B.B., Bretas Bittar, S.M., Silva Filho, A.F., Armstrong, R., 2012. U–Pb zircon ages of orthogneisses and supracrustal rocks of the Cariris Velhos belt: Onset of Neoproterozoic rifting in the Borborema Province, NE Brazil. *Precambrian Res.* 192–195, 52–77. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.precamres.2011.10.008>

Hollanda, M.H.B.M., Archanjo, C.J., Bautista, J.R., Souza, L.C., 2015. Detrital zircon ages and Nd isotope compositions of the Seridó and Lavras da Mangabeira basins (Borborema Province, NE Brazil): Evidence for exhumation and recycling associated with a major shift in sedimentary provenance. *Precambrian Res.* 258, 186–207. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.12.009>

- Hollanda, M.H.B.M., Archanjo, C.J., Souza, L.C., Danyi, L., Armstrong, R., 2011. Long-lived Paleoproterozoic granitic magmatism in the Seridó-Jaguaribe domain, Borborema Province-NE Brazil. *J. South Am. Earth Sci.* 32, 287–300. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2011.02.008>
- Hurst, A., Morton, A.C., 1988. An application of heavy-mineral analysis to lithostratigraphy and reservoir modelling in the Oseberg Field, northern North Sea. *Mar. Pet. Geol.* 5, 157–169. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0264-8172\(88\)90020-7](https://doi.org/10.1016/0264-8172(88)90020-7)
- Jackson, S.E., Pearson, N.J., Griffin, W.L., Belousova, E.A., 2004. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon geochronology. *Chem. Geol.* 211, 47–69. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.06.017>
- Jardim De Sá, E.F., 1994. A faixa Seridó (Província Borborema NE do Brasil) e o seu significado geodinâmico na cadeia Brasileira / Pan-Africana. Universidade de Brasília.
- Kozuch, M., 2003. Isotopic and Trace Element Geochemistry of Early Neoproterozoic Gneissic and Metavolcanic rocks in the Cariris Velhos orogen of the Borborema Province, Brazil and their Bearing Tectonic Setting. PhD Thesis, Kansas University, USA.
- Legrand, J.M., Dantas, E.L., Liegeois, J.P., 1997. Definição e caracterização do embasamento da porção Oeste da Faixa Seridó (Província Borborema, NE-Brasil), in: *Simpósio de Geologia do Nordeste*. Fortaleza, p. 50–55.
- Lima Filho, M. de, Barbosa, J.A., Ebenezer, M.S., 2006. Eventos tectônicos e sedimentares nas bacias de Pernambuco e da Paraíba: implicações no quebraamento do Gondwana e correlação com a bacia do rio Muni. *Geociencias* 25, 117–126.
- Lima, M.N., Nogueira Neto, J.A., Azevedo, M.R., Valle Aguado, B., 2010. Geología y geocronología U-Pb del granito de Banabuiü, Noreste de Ceará Brasil. *Estud. Geol.* 66, 35–44. <https://doi.org/10.3989/egeol.40196.113>
- Ludwig, K.R., 2003. User's manual for Isoplot 3.00, a geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center special publication no.4. Components.

- Magini, C., 2001. Evolução pré-cambriana da Província Borborema: o extremo oeste potiguar. Universidade Estadual de Campinas.
- Mange, M. A., & Maurer, H. F. (1992). Heavy minerals in the study of sediments: their application and limitations. In *Heavy Minerals in Colour* (pp. 4-10). Springer, Dordrecht.
- Marques, F.O., Nogueira, F.C.C., Bezerra, F.H.R., de Castro, D.L., 2014. The Araripe Basin in NE Brazil: An intracontinental graben inverted to a high-standing horst. *Tectonophysics* 630, 251–264. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2014.05.029>
- Marques, F.O., Nogueira, F.C.C., Bezerra, F.H.R., de Castro, D.L., 2014. The Araripe Basin in NE Brazil: An intracontinental graben inverted to a high-standing horst. *Tectonophysics* 630, 251–264. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2014.05.029>
- Martins, G., Oliveira, E.P., Lafon, J.M., 2009. The Algodões amphibolite-tonalite gneiss sequence, Borborema Province, NE Brazil: Geochemical and geochronological evidence for Palaeoproterozoic accretion of oceanic plateau/back-arc basalts and adakitic plutons. *Gondwana Res.* 15, 71–85. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2008.06.002>
- Maruoka, M.T. da S., 2007. Isótopos de Nd na Proveniência de Rochas e Sedimentos da Bacia Potiguar, NE do Brasil. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal.
- Matos, R.M.D., 1992. The Northeast Brazilian Rift System. *Tectonics* 11, 766–791. <https://doi.org/10.1029/91TC03092>
- Milani, E.J., Brandão, J.A.S.L., Zalán, P. V., Gamboa, L.A.P., 2000. Petróleo na margem continental Brasileira: Geologia, exploração, resultados e perspectivas. *Rev. Bras. Geofis.* 18, 351–396. <https://doi.org/10.1590/s0102-261x2000000300012>
- Morel, M.L.A., Nebel, O., Nebel-Jacobsen, Y.J., Miller, J.S., Vroon, P.Z., 2008. Hafnium isotope characterization of the GJ-1 zircon reference material by solution and laser-ablation MC-ICPMS. *Chem. Geol.* 255, 231–235. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.06.040>
- Morton, A., Yaxley, G., 2007. Detrital apatite geochemistry and its application in provenance studies. *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.* 420, 319–344. [https://doi.org/10.1130/2006.2420\(19\)](https://doi.org/10.1130/2006.2420(19))
- Morton, A.C., 1985. Heavy Minerals in Provenance Studies, in: Zuffa, G.G. (Org.), *Provenance of Arenites*. Springer Netherlands, Dordrecht, p. 249–277. https://doi.org/10.1007/978-94-017-2809-6_12

- Morton, A.C., Hallsworth, C., 1994. Identifying provenance-specific features of detrital heavy mineral assemblages in sandstones. *Sediment. Geol.* 90, 241–256. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0037-0738\(94\)90041-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0037-0738(94)90041-8)
- Morton, A.C., Hallsworth, C.R., 1999. Processes controlling the composition of heavy mineral assemblages in sandstones. *Sediment. Geol.* 124, 3–29. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(98\)00118-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0037-0738(98)00118-3)
- Nogueira, J.F., 2004. Estrutura, Geocronologia e Alojamento dos Batólitos de Quixadá, Quixeramobim e Senador Pompeu - Ceará Central. Universidade Estadual Paulista. São Paulo.
- Obaje, N.G., 2009. *Geology and Mineral Resources of Nigeria*. Springer.
- Pessoa Neto, O. da C., Soares, M.U., Da Silva, J.G.F., Roesner, E.H., Florencio, C.P., De Souza, C.A.V., 2007. Bacia Potiguar. *Bol. Geociencias da Petrobras* 15, 357–369.
- Pereira, B., 2020. Diagênese e Qualidade dos Reservatórios Continentais da Formação Alagamar, Neoptiano da Bacia Potiguar. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Pitarello, M.Z., Santos, T.J.S. dos, Ancelmi, M.F., 2019. Syn-to post-depositional processes related to high grade metamorphic BIFs: Geochemical and geochronological evidences from a Paleo to Neoproterozoic (3.5–2.6 Ga) terrane in NE Brazil. *J. South Am. Earth Sci.* 96, 102312. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102312>
- Ponte, F.C., Asmus, H.E., 1978. Geological framework of the Brazilian continental margin. *Geol. Rundschau* 67, 201–235.
- Ponte, F.C., Asmus, H.E., 1976. The Brazilian marginal basins: current state of knowledge. *An. Acad. Bras. Cienc.* 48, 215–240.
- Remus, M.V.D., Souza, R., Cupertino, J., De Ros, L., Dani, N., Vignol-lelarge, M.L., 2008. Proveniência sedimentar: métodos e técnicas analíticas aplicadas. *Rev. Bras. Geociências* 38, 166–185. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.2008382S166185>
- Rubatto, D., 2017. Zircon: The Metamorphic Mineral. *Rev. Mineral. Geochemistry* 83, 261–295. <https://doi.org/10.2138/rmg.2017.83.9>
- Sá, E.F.J. de, Fuck, R.A., Macedo, M.H. de F., Peucat, J.J., Kawashita, K., Souza, Z.S. de, Bertrand, J.M., 1995. Pre-Brasiliano Orogenic Evolution in the Seridó Belt, Ne

Brazil: Conflicting Geochronological and Structural Data. *Rev. Bras. Geociências* 25, 307–314. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.1995307314>

Sá, J., 1991. Evolution géodynamique de la ceinture protérozoïque d'Oros, Nord-Est du Brésil. Université de Nancy.

Sá, J.M., Bertrand, J.M., Leterrier, J., Macedo, M.H.F., 2002. Geochemistry and geochronology of pre-Brasiliano rocks from the Transversal Zone, Borborema Province, Northeast Brazil. *J. South Am. Earth Sci.* 14, 851–866. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(01\)00081-5](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(01)00081-5)

Sá, J.M., De Sousa, L.C., Legrand, J.M., Galindo, A.C., Maia, H.N., Fillippi, R.R., 2014. U-Pb and Sm-Nd data of the Rhyacian and Statherian orthogneisses from Rio Piranhas-Seridó and Jaguaribeano terranes, Borborema Province, Northeast of Brazil. *Geol. USP - Ser. Cient.* 14, 97–110. <https://doi.org/10.5327/Z1519-874X201400030007>

Santos, L.C.M. de L., Dantas, E.L., Cawood, P.A., Lages, G. de A., Lima, H.M., dos Santos, E.J., Caxito, F.A., 2019. Early to late Neoproterozoic subduction-accretion episodes in the Cariris Velhos Belt of the Borborema Province, Brazil: Insights from isotope and whole-rock geochemical data of supracrustal and granitic rocks. *J. South Am. Earth Sci.* 96, 102384. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102384>

Santos, M.M., Lana, C., Scholz, R., Buick, I., Schmitz, M.D., Kamo, S.L., Gerdes, A., Corfu, F., Tapster, S., Lancaster, P., Storey, C.D., Basei, M.A.S., Tohver, E., Alkmim, A., Nalini, H., Krambrock, K., Fantini, C., Wiedenbeck, M., 2017. A New Appraisal of Sri Lankan BB Zircon as a Reference Material for LA-ICP-MS U-Pb Geochronology and Lu-Hf Isotope Tracing. *Geostand. Geoanalytical Res.* 41, 335–358. <https://doi.org/10.1111/ggr.12167>

Seton, M., Müller, R.D., Zahirovic, S., Gaina, C., Torsvik, T., Shephard, G., Talsma, A., Gurnis, M., Turner, M., Maus, S., Chandler, M., 2012. Global continental and ocean basin reconstructions since 200Ma. *Earth-Science Rev.* <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.03.002>

Sial, A.N., Ferreira, V.P., 2016. Magma associations in Ediacaran granitoids of the Cachoeirinha–Salgueiro and Alto Pajeú terranes, northeastern Brazil: Forty years of

studies. *J. South Am. Earth Sci.* 68, 113–133.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jsames.2015.10.005>

Silva, A.R.C., 2018. Análise estratigráfica, sedimentar e paleomagnética do Grupo Iguatu, Ceará, Brasil. Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.

Silva, L., Armstrong, R., Delgado, I.M., Pimentel, M., Arcanjo, J.B., Melo, R.C., Teixeira, L., Jost, H., Filho, J.M., Pereira, L.H.M., 2002. Reavaliação da evolução geológica em terrenos pré-cambrianos brasileiros com base em novos dados U-Pb SHRIMP - Parte I: Limite centro-oriental do Cráton do São Francisco. *Rev. Bras. Geosci.* 33, 501–502.

Silva, L.C., McNaughton, N.J., Vasconcelos, A.M., 1997. U-Pb SHRIMP ages in southern State of Ceará, Borborema Province, NE Brazil: Archean TTG accretion and Proterozoic crustal reworking., in: *INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON GRANITES AND ASSOCIATED MINERALIZATIONS - ISGAM*, 2. Salvador, p. 280–281.

Silva, M.G.D., 1999. Caracterização de minerais pesados ao longo do Rio Piranhas-Açu/RN: distribuição e proveniência. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal.


Sláma, J., Košler, J., Condon, D.J., Crowley, J.L., Gerdes, A., Hanchar, J.M., Horstwood, M.S.A., Morris, G.A., Nasdala, L., Norberg, N., Schaltegger, U., Schoene, B., Tubrett, M.N., Whitehouse, M.J., 2008. Plešovice zircon - A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis. *Chem. Geol.* <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.11.005>

Soares Júnior, A.V., Costa, J.B.S., Hasui, Y., 2008. Evolução da margem atlântica equatorial do Brasil: Três fases distensivas. *Geociencias* 27, 427–437.

Souto Filho, J.D., Correa, A.C.F., Neto, E.S., Trindade, L.A.F., 2000. Alagamar-Açu Petroleum System, onshore Potiguar Basin, Brazil: a numerical Approach for Secondary Migration, in: Mello, M.R., Katz, B.J. (Orgs.), *Petroeum Systems of South Atlantic margins*. AAPG Memoir 73, p. 151–158.

Stacey, J.S., Kramers, J.D., 1975. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model. *Earth Planet. Sci. Lett.* [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(75\)90088-6](https://doi.org/10.1016/0012-821X(75)90088-6)

- Stattegger, K., 1987. Heavy minerals and provenance of sands; modeling of lithological end members from river sands of northern Austria and from sandstones of the Austroalpine Gosau Formation (Late Cretaceous). *J. Sediment. Res.* 57, 301–310. <https://doi.org/10.1306/212F8B0C-2B24-11D7-8648000102C1865D>
- Szatmari, P., Françolin, J.B.L., Zanotto, O., Wolff, S., 1987. Evolução tectônica da margem equatorial brasileira. *Rev. Bras. Geociências* 17, 180–188.
- Szatmari, P., Milani, E.J., Lana, M.C., Conceição, J.C.J., Lobo, A.P., 1984. How South Atlantic rifting affects Brazilian oil reserves distribution. *Oil Gas J.* 83, 107–113.
- Van Schmus, W.R., De Brito Neves, B.B., Williams, I.S., Hackspacher, P.C., Fetter, A.H., Dantas, E.L., Babinski, M., 2003. The Seridó Group of NE Brazil, a late Neoproterozoic pre- to syn-collisional basin in West Gondwana: Insights from SHRIMP U-Pb detrital zircon ages and Sm-Nd crustal residence (T DM) ages. *Precambrian Res.* 127, 287–327. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(03\)00197-9](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(03)00197-9)
- Van Schmus, W.R., Kozuch, M., de Brito Neves, B.B., 2011. Precambrian history of the Zona Transversal of the Borborema Province, NE Brazil: Insights from Sm-Nd and U-Pb geochronology. *J. South Am. Earth Sci.* 31, 227–252. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2011.02.010>
- Vaz, P.T., da Mata Rezende, N.G., Wanderley Filho, J.R., Travassos, W.A., 2007. Bacia do Parnaíba. *Bol. Geociências da Petrobras* 15, 253–263.
- Vermeesch, P., Resentini, A., Garzanti, E., 2016. An R package for statistical provenance analysis. *Sediment. Geol.* 336, 14–25. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2016.01.009>
- Vital, H., Gomes, M.P., Dantas, E.L., Soares, C.H., Vital, H., Gomes, M.P., Dantas, E.L., Soares, C.H., 2013. Sediment provenance and dispersal on tropical starved continental margins: Example of the Potiguar Basin margin, NE Brazil. *AGU Fall Meet. Abstr.* 2013, EP43D-0898.
- Woodhead, J.D., Hergt, J.M., 2005. A preliminary appraisal of seven natural zircon reference materials for in situ Hf isotope determination. *Geostand. Geoanalytical Res.* <https://doi.org/10.1111/j.1751-908x.2005.tb00891.x>

| ANEXO I | |
|---|---|
| Título da Dissertação/Tese: | |
| Proveniência dos Arenitos da Bacia Potiguar Utilizando U/Pb e Lu/Hf em Zircão Detrítico | |
| Área de Concentração: Geoquímica | |
| Autor: Anderson Baesso | |
| Orientador: Prof. Dr. Marcus Vinicius Dorneles Remus | |
| Examinador: Prof. Dr. Leo Afraneo Hartmann | |
| Data: 7/3/2021 | |
| Conceito: A Excelente | |
| PARECER: O mestrando Anderson Baesso apresentou uma dissertação de mestrado de alta qualidade. O tema é muito relevante, pois envolve a proveniência de arenitos de uma bacia petrolífera do nordeste Brasileiro. Os métodos utilizados são adequados, incluindo várias técnicas analíticas. Os resultados são qualificados e a interpretação é correta. O artigo científico, que faz parte da dissertação, tem estrutura adequada e foi submetido a uma revista científica de alto nível. Nessa revista, é provável que os revisores solicitem uma inserção internacional mais intensa das interpretações. A minha avaliação do mestrado é positiva, em todos os aspectos. | |
| Assinatura: |  |
| Data: | 7/3/2021 |
| Ciente do Orientador: | |
| Ciente do Aluno: | |

| ANEXO I |
|---|
| Título da Dissertação/Tese: |
| Proveniência dos Arenitos da Bacia Potiguar Utilizando U/Pb e Lu/Hf em Zircão Detrítico |
| Área de Concentração: Geoquímica |
| Autor: Anderson Baesso |
| Orientador: Prof. Dr. Marcus Vinicius Dorneles Remus |
| Examinador: Prof. Dr. Miguel Angelo Stipp Basei |
| Data: 25 de Março de 2021 |
| Conceito: Bom |
| PARECER: |
| <p>A dissertação examinada apresenta grande quantidade de dados geocronológicos U-Pb em zircão detrítico, pontuais, obtidos pela técnica LA ICPMS, em minerais extraídos de unidades sedimentares da Bacia Potiguar. Para tal, foram utilizadas amostras de furos de sondagens dessa Bacia, localizados no continente e onshore. Esse estudo foi complementado por análises de isótopos de Hf em parte dos cristais previamente datados por U-Pb.</p> <p>A dissertação tem duas partes que em muito se sobrepõem com o artigo submetido ao Marine and Petroleum Geology apresentando maior aprofundamento e justificativa das interpretações oferecidas, enquanto a parte primeira inclui uma discussão mais detalhada das técnicas e metodologias utilizadas além de oferecer um panorama mais completo da geologia local e regional.</p> <p>O tratamento dos dados e as interpretações efetuadas, são pertinentes, e o autor demonstra amplo conhecimento das ferramentas utilizadas e da geologia da região de interesse. Entretanto, poderia ter apresentado um tratamento mais elaborado dos dados gerados em sua dissertação, por exemplo, comparado com mais detalhes os dados entre as unidades da Bacia (KS, PDP etc...) para entender melhor as variações laterais e verticais observadas e, acima de tudo, melhor justificar sua interpretação de que os sedimentos da Bacia teriam tido como principal fonte o embasamento que ocorre a Norte da Bacia.</p> <p>Todas as análises foram efetuadas nos laboratórios da Universidade Federal de Ouro Preto e, apesar de conhecermos a alta qualidade das análises realizadas por esse laboratório, sentimos muita falta das tabelas de dados analíticos que não encontramos em meio ao material recebido.</p> <p>Todas observações que fiz estão claramente indicadas no volume da dissertação examinado (em anexo).</p> |

Apesar das ressalvas acima, a dissertação é um material de grande qualidade que reflete o empenho de seu autor. Em função do exame que efetuei, considero que a dissertação tem total condições de ser aprovada e espero que em breve tenhamos o artigo publicado.

Assinatura:



Data:25/03/2021

Ciente do Orientador:

Ciente do Aluno:


| |
|--|
| ANEXO I |
| Título da Dissertação/Tese: |
| Proveniência dos Arenitos da Bacia Potiguar Utilizando U/Pb e Lu/Hf em Zircão Detrítico |
| Área de Concentração: Geoquímica |
| Autor: Anderson Baesso |
| Orientador: Prof. Dr. Marcus Vinicius Dorneles Remus |
| Examinador: Profa. Dra. Rosalia Barili da Cunha |
| Data: 20/03/2021 |
| Conceito: A |
| PARECER: |
| <p>Área de estudo muito pertinente tendo em vista que a Bacia Potiguar é uma das bacias maduras que mais produzem de óleo e gás.</p> <p>Conforme indicado no trabalho, há uma variação entre a proveniência dos sedimentos identificados nos poços estudados, evidenciada e bem discutida no artigo, pela idade das populações dos zircões e sua relação com as possíveis áreas fontes do entorno da bacia. Entretanto, como é indicado nos objetivos e nas conclusões, não identifiquei argumentos na discussão em relação à questão de qualidade de reservatório, que leva em conta não apenas o tipo de sedimento e sua proveniência, mas também a evolução diagenética destas rochas e seu impacto na porosidade e permeabilidade. Também foi pouco discutido o uso do método Lu/Hf e os possíveis ambientes de formação das rochas fonte dos sedimentos, tendo em vista que há relação entre os diferentes ambientes que foram identificados e a evolução diagenética possível de acordo com cada um e o consequente impacto na qualidade do reservatório. Adicionalmente, foi pouco discutida a estratigrafia dos poços estudados, ou mesmo a integração entre o estudo de proveniência/datação e o estudo petrográfico para correlação com a qualidade do reservatório. Valeria a pena incluir, na dissertação, ou posteriormente no artigo, uma figura com a descrição estratigráfica dos poços estudados e as profundidades das amostras e sua correlação lateral, bem como um mapa melhorado, evidenciando quais áreas da bacia receberam mais influência de qual rocha fonte, uma vez que há variação nas populações de zircão. Sugiro, caso seja possível, tentar incluir um bloco diagrama, ou mapa paleogeográfico evidenciando o contexto do relevo que influenciou as diferentes áreas da bacia. Caberia ainda, no artigo, um tópico, mesmo que sucinto, sobre petrografia das rochas utilizadas no estudo.</p> <p>De maneira geral, o trabalho está bem organizado e bem escrito. Algumas questões com parágrafos muito curtos (com apenas uma sentença) intercalados</p> |

com parágrafos extremamente longos. Uso de vocabulário em inglês também deve ser revisado, assim como citações sempre devem ser revisadas, mas nada que comprometa a qualidade do trabalho.

Boa revisão conceitual/metodológica, porém, breve, abrangendo a metodologia utilizada para proveniência e datação utilizando zircões e sobre bacias *rift* e o transporte de sedimentos. Dúvida pontual sobre a metodologia: os zircões foram imageados utilizando microsonda eletrônica ou Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)?

As figuras merecem especial atenção:

- A coluna cronoestratigráfica está com resolução muito baixa e não indica o intervalo estudado.
- A figura que indica a Província Borborema e o Escudo Nigeriano está parte em português, parte em inglês; não indica precisamente que o desenho do lado direito é o Escudo Nigeriano ou que a figura do lado direito é a Província Borborema ou se é da Bacia Potiguar, e a legenda apresenta mesmas cores indicando coisas diferentes.
- Quando a Bacia Potiguar é apresentada, e em todos os mapas em que ela aparece, os limites da bacia devem ser muito claros, em nenhuma figura (corpo da dissertação e artigo) estes limites são indicados com clareza.
- Quanto ao mapa que integra áreas fortes, poços e transporte de sedimento: não fica claro de qual área fonte teve mais influência na sedimentação da área identificada pelos poços. Sugiro incluir um *layer* colorido e com transparência (45% a 65%) sobre a imagem SRTM com as duas principais áreas fontes e os limites da bacia.
- No geral, nas legendas das figuras falta alguma explicação / contextualização delas em relação ao resultado que se quis apresentar. Esta informação deve ser discutida no parágrafo no qual a figura é apresentada/citada, mas também deve estar resumidamente contida na legenda.

Assinatura:  Data: 20/03/2021

Ciente do Orientador:

Ciente do Aluno: