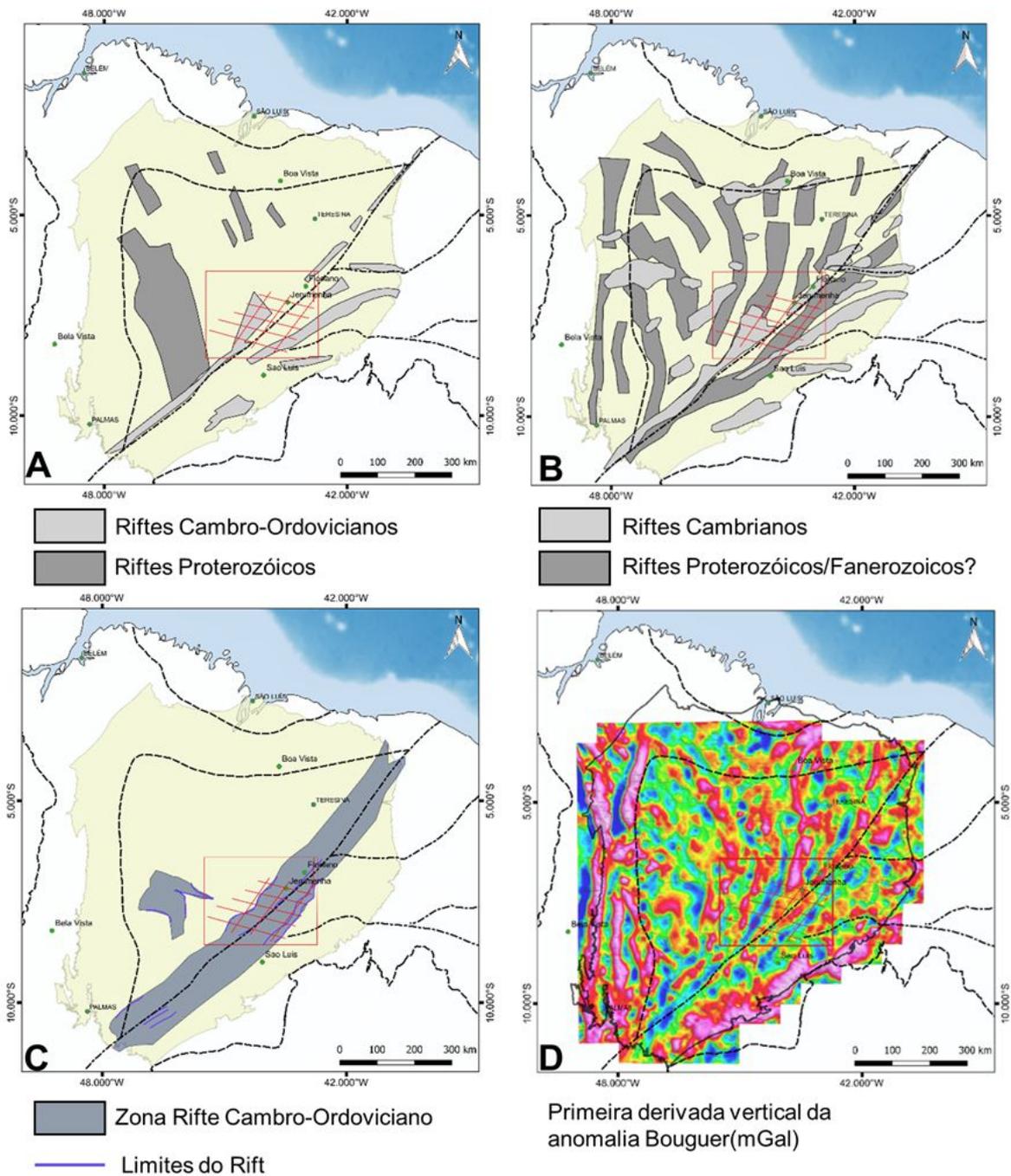


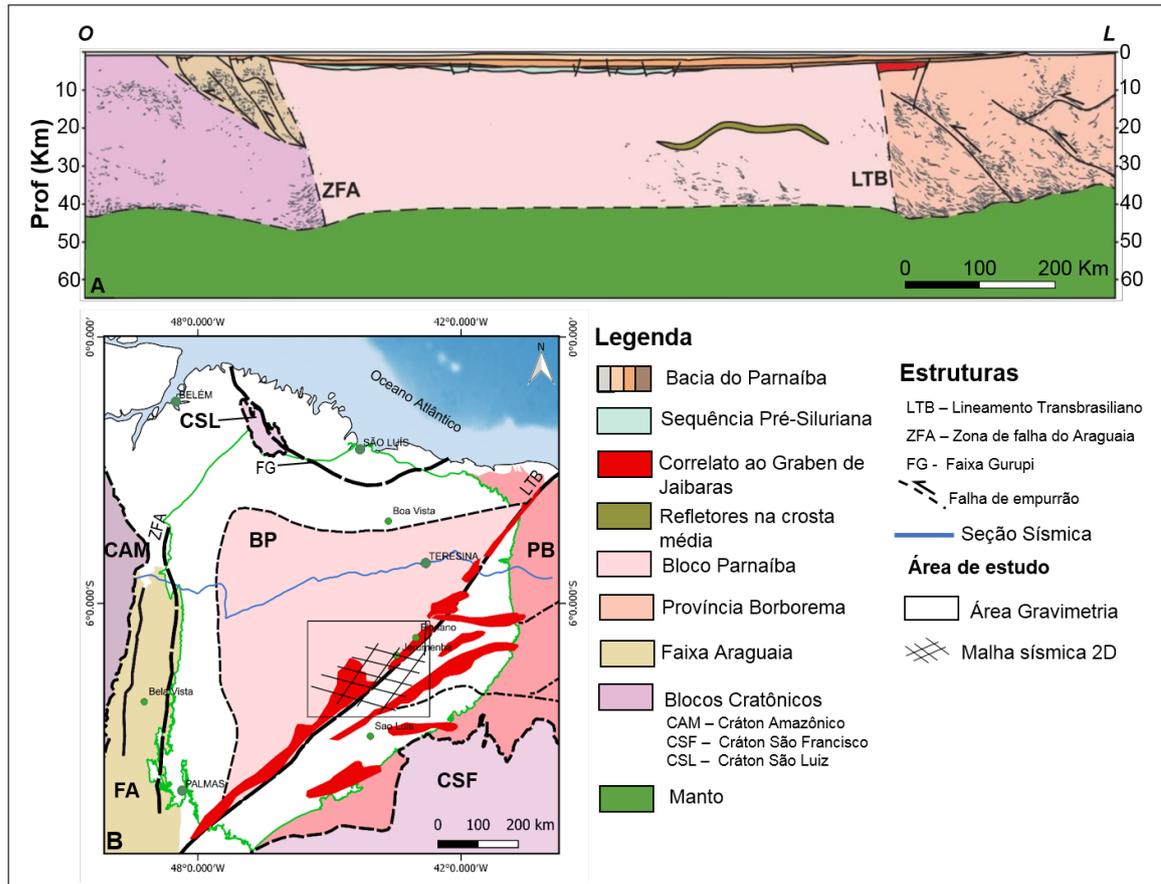
Figura 4 - Diferentes paleoconstruções do embasamento Pré-Siluriano da Bacia do Parnaíba



Legenda: A) Principais riftes Cambro-Ordovicianos e Proterozóicos estruturados por Nunes (1993), B) riftes Cambrianos e Proterozóicos/Fanerozoicos propostos por Castro *et al.* (2014), C) Zona de rift Cambro-Ordoviciano proposto por Castro *et al.* (2016), D) Mapa da primeira derivada vertical da anomalia *Bouguer*, observa-se a correlação entre os baixos gravimétricos e as estruturas grabeniformes delimitadas. Em vermelho observa-se a área de estudo e as linhas sísmicas utilizadas.

Fonte: O autor, 2019

Figura 5 - Seção sísmica profunda interpretada ao longo da Bacia do Parnaíba



Legenda: A) Seção sísmica profunda interpretada num perfil leste-oeste ao longo da Bacia do Parnaíba. B) Localização da linha sísmica e estruturas da Bacia do Parnaíba

Fonte: Modificado de DALY *et al.*, 2014.

Atualmente, não existe um modelo evolutivo preciso que traduza os processos percorridos à instalação de estruturas em formas de grabens de idade pré-siluriana ao longo da Bacia do Parnaíba. Segundo Oliveira e Mohriak (2003), bacias pré-silurianas, mais precisamente cambro-ordovicianas, se instalaram em resposta a um contexto puramente distensional, do tipo rifte, ao longo de principais zonas de fraqueza, como o Lineamento Transbrasiliiano, seguido por eventos compressoriais ocasionando uma inversão que afetou os estratos sedimentares da sequência pré-siluriana. Já Cacama *et al.* (2015), ao analisar a assinatura estrutural e geofísica do LTB ao longo do Graben do Jaibaras sugerem uma cinemática transcorrente, típica de bacias do tipo *pull-apart*, conforme já sugerido por Gorayeb *et al.* (1988). Neto *et al.* (2013), por meio de interpretação sísmica de seções ao longo do Lineamento Transbrasiliiano, sugerem a atuação de esforços transtrativos dextrais durante a nucleação e deposição da seção sedimentar basal, numa orientação NE-SW ao longo do LTB. Porto *et al.* (2018), por meio de análise de dados sísmicos, gravimétricos e de poços no segmento centro-oeste da bacia, sugerem que os depósitos pré-silurianos e as estruturas tectônicas mapeadas se caracterizam por estruturas oriundas de bacia do tipo antepaís, de possível idade ediacarana (Neoproterozóico).

### 2.2.1 Bacia do Jaibaras

A Bacia do Jaibaras (BJ) está inserida no extremo noroeste da Província Borborema, na borda NE da Bacia do Parnaíba (Figura 2) e se estende por 120 Km com direção preferencial NE-SW ao longo do Lineamento Transbrasiliano e com largura de 10 a 20 Km. Sua formação é relacionada a processos de reativação de estruturas preexistentes associados ao Lineamento Transbrasiliano (OLIVEIRA; MOHRIAK, 2003). Diversas estruturas grabeniformes são correlacionadas ao Graben do Jaibaras, alinhadas ao Lineamento Transbrasiliano, como o Graben Cococi, São Julião, Raimundo Nonato e demais, ilustrados na Figura 2.

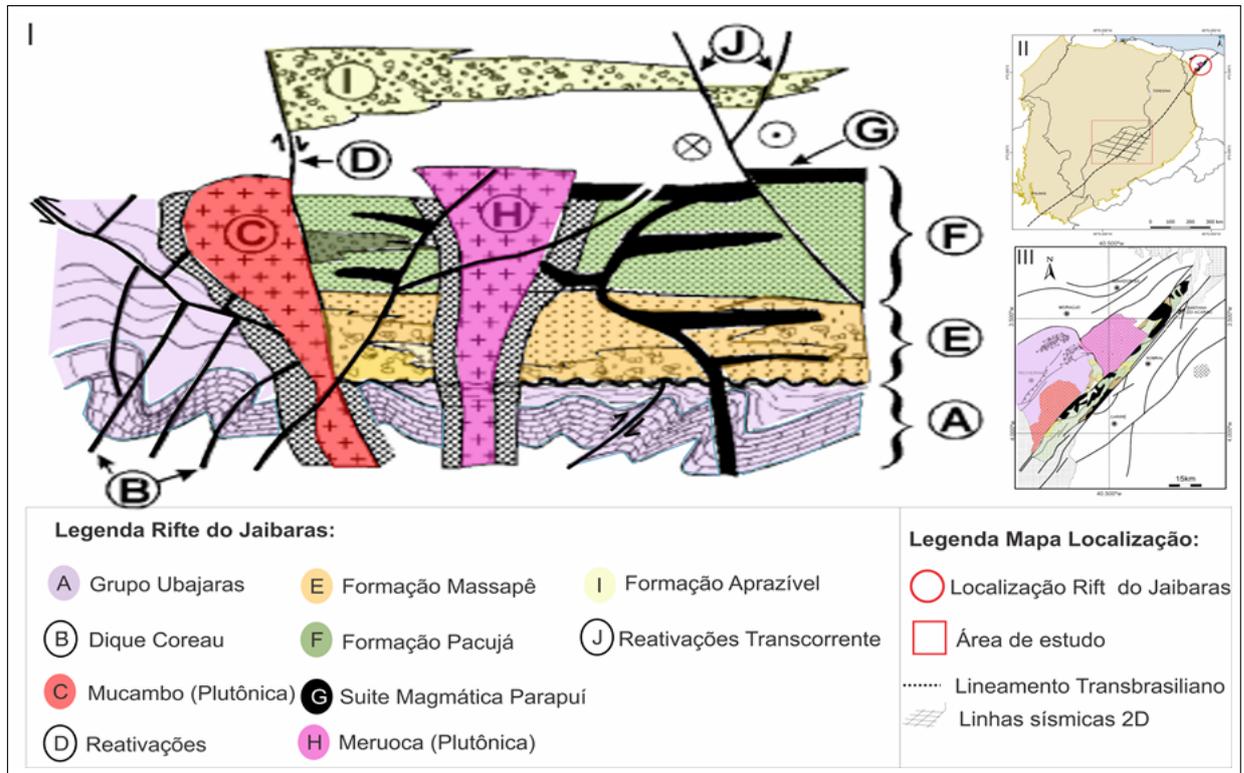
A estratigrafia da Bacia do Jaibaras pode ser dividida em duas sequências, a sequência inferior (Ediacarano-Cambriano), representada pelas Formações Massapê, Pacujá e Parapuí, e a sequência superior (Cambro-Ordoviciano), representada por parte de Formação Parapuí e a Formação Aprazível (PARENTE *et al.*, 2004). Tais sequências encontram-se sotopostas a depósitos metassedimentares (plataforma carbonática) de idade entre o Pré-Cambriano superior ao Paleozóico inferior, deformados durante a orogenia Brasileira, representados pelos carbonatos do Grupo Ubajara (Formação Frecheirinha), interpretados como rochas do embasamento ou sequências tipo pré-rifte

As sequências sedimentares do Grupo Jaibaras que representam a fase sin-rifte da bacia podem ser caracterizadas, da base para o topo, por:

- a) Formação Massapê: essencialmente composta por conglomerados, sua estrutura interna sugere proximidade entre a fonte e a área de deposição, sua base está em contato com rochas do embasamento, incluindo sequências do Grupo Ubajara (COSTA *et al.*, 1973);
- b) Formação Pacujá: representa a seção distal da Formação Massapê e compreende intercalações rítmicas de arenitos arcossianos finos a siltitos;
- c) Formação Parapuí: consiste num sistema magmático bimodal incluindo extensos derrames de lava, diques e soleiras (GORAYEB *et al.*, 1988);
- d) Formação Aprazível, no topo da sequência sedimentar, ocorre ao longo das margens do rifte e apresenta contato discordante das formações mais antigas. Sua composição compreende conglomerados com clastos das Formações Massapê, Pacujá e Parapuí (COSTA *et al.*, 1973).

Dois corpos graníticos, denominados Meruoca e Mucambo, ocorrem ao longo do sistema de falhas Café-Ipueiras e intrudem na sequência sedimentar dos Grupos Ubajara e Jaibaras (ALMEIDA, 1998). A leste, a bacia é limitada pela falha Sobral-Pedro Segundo, que também possui orientação NE-SW.

Figura 6 - Seção tectonoestratigráfica representativa do Graben do Jaibaras.



Legenda: I) Seção representativa das estruturas inseridas ao longo do Graben do Jaibaras sendo representadas por: A) Grupo Ubajara, B) Dique Coreau, C) Mucambo (plutônica), D) Reativação normal de zonas cisalhantes herdadas do embasamento, E) Formação Massapê, F) Formação Pacujá, G) Suite Magmática Parapuí, H) Meruoca (plutônica), I) Formação Aprazível, J) Reativação Transcorrente de falhas principais e geração de estruturas associadas.

II) Mapa de localização do Graben do Jaibaras.

III) Mapa geológico do Graben do Jaibaras.

Fonte: Modificado de OLIVEIRA; MOHRIAK, 2003.

A evolução da sequência rifte pode ser observada na seção tectonoestratigráfica (Figura 6), capaz de traduzir os principais eventos do desenvolvimento da bacia. Segundo Oliveira e Mohriak (2003), a evolução da bacia se iniciou com um primeiro pulso tectono-magmático que acarretou na intrusão de diques (Coreau) ao longo do Grupo Ubajaras. Foi acompanhado de um segundo pulso tectônico originado pela reativação de antigas zonas de cisalhamento de idade pré-cambriana, resultando na instalação das rochas plutônicas Mucambo. Tanta influência magmática destas intrusões, desencadeou processos de subsidência acompanhados por preenchimento sedimentar, criando condições para deposição das Formações Massapê e Pacujá, e intrusões magmáticas das rochas da Formação Parapuí. Em seguida ocorreu a instalação de outro bloco plutônico, denominado Meruoca, que se instalou ao longo das zonas de fraqueza reativadas em fases anteriores. A Formação Aprazível representa o fim dos processos deposicionais na Bacia do Jaibaras e é representada por depósitos de leques aluviais de ambiente restrito.

### 2.3 Bacia Parnaíba

Desenvolvida sobre crosta continental e ocupando uma área total de 600 mil  $Km^2$  da porção noroeste do nordeste brasileiro, a Bacia do Parnaíba abrange parte dos estados do Piauí, Maranhão, Tocantins, Pará, Ceará e Bahia, com depocentro localizado em sua porção central e de formato levemente elíptico alongado na direção NW-SE. Trata-se de uma bacia intracratônica, de idade paleozoica, posicionada entre faixas de dobramentos que bordejam os crátons do Amazonas, São Luiz e São Francisco (Figura 2). Sua origem, assim como a de outras bacias intracratônicas, ainda é controversa, porém, alguns autores (GÓES; FEIJÓ, 1994), (GOES, 1990), (VAZ *et al.*, 2007) acreditam que sua subsidência esteja correlacionada aos efeitos de contração térmica e adensamento litosférico ocorrido no final da orogênese Brasileira. Segundo Vaz *et al.* (2007), estima-se que o depocentro da bacia apresente espessura de até 3500 m.

O preenchimento da bacia se processou às custas de lenta subsidência, em região cratônica e longe da influência direta de grandes orogêneses. Os episódios de sedimentação se encerraram no Cretáceo. As baixas taxas de sedimentação, os estratos pouco perturbados e o baixo mergulho das camadas sedimentares sugerem que as atividades tectônicas foram restritas a reativação de falhas e antigas zonas de fraqueza do embasamento (GÓES; FEIJÓ, 1994).

A estratigrafia da Bacia do Parnaíba é considerada razoavelmente bem entendida, intensos trabalhos realizados por Vaz *et al.* (2007) permitiram a elaboração da carta estratigráfica mais recente da bacia, conforme observa-se na Figura 7.

A coluna sedimentar da bacia foi dividida em cinco sequências deposicionais (Figura 8), denominadas siluriana, mesodevoniana-eocarbonífera, neo carbonífera-eotriássica, jurássica e cretácea, e delimitadas por discordâncias que se estendem em toda a bacia ou abrangem regiões externas (VAZ *et al.*, 2007). Tendo como base quatro grandes descontinuidades no interior da bacia, Góes (1995) classificou a Bacia do Parnaíba em Província Parnaíba e a segmentou em quatro sítios deposicionais, denominando-as como Bacia do Grajaú, Espigão-Mestre, Alpercatas e Bacia Parnaíba propriamente dita. A sedimentação da Província Parnaíba é predominantemente siliciclástica ocorrendo subordinadamente níveis de calcários, anidridas e sílex, além de diabásios e basaltos.

Cada sequência deposicional tem características específicas:

As sequências siluriana e devoniana correspondem aos Grupos Serra Grande e Canindé, respectivamente. Representam ciclos transgressivo-regressivo com depósitos de ambiente transicional, continental e marinho. O máximo transgressivo ocorreu durante o Devoniano com a deposição de folhelhos da Formação Pimenteiras (GÓES; FEIJÓ, 1994). Dois importantes lineamentos estruturais, sendo o Lineamento Transbrasileiro de direção NE-SW e o Lineamento Picos-Santa Inês de direção NW-SE (Figura 8) tiveram importante contribuição na configuração deposicional deste período.



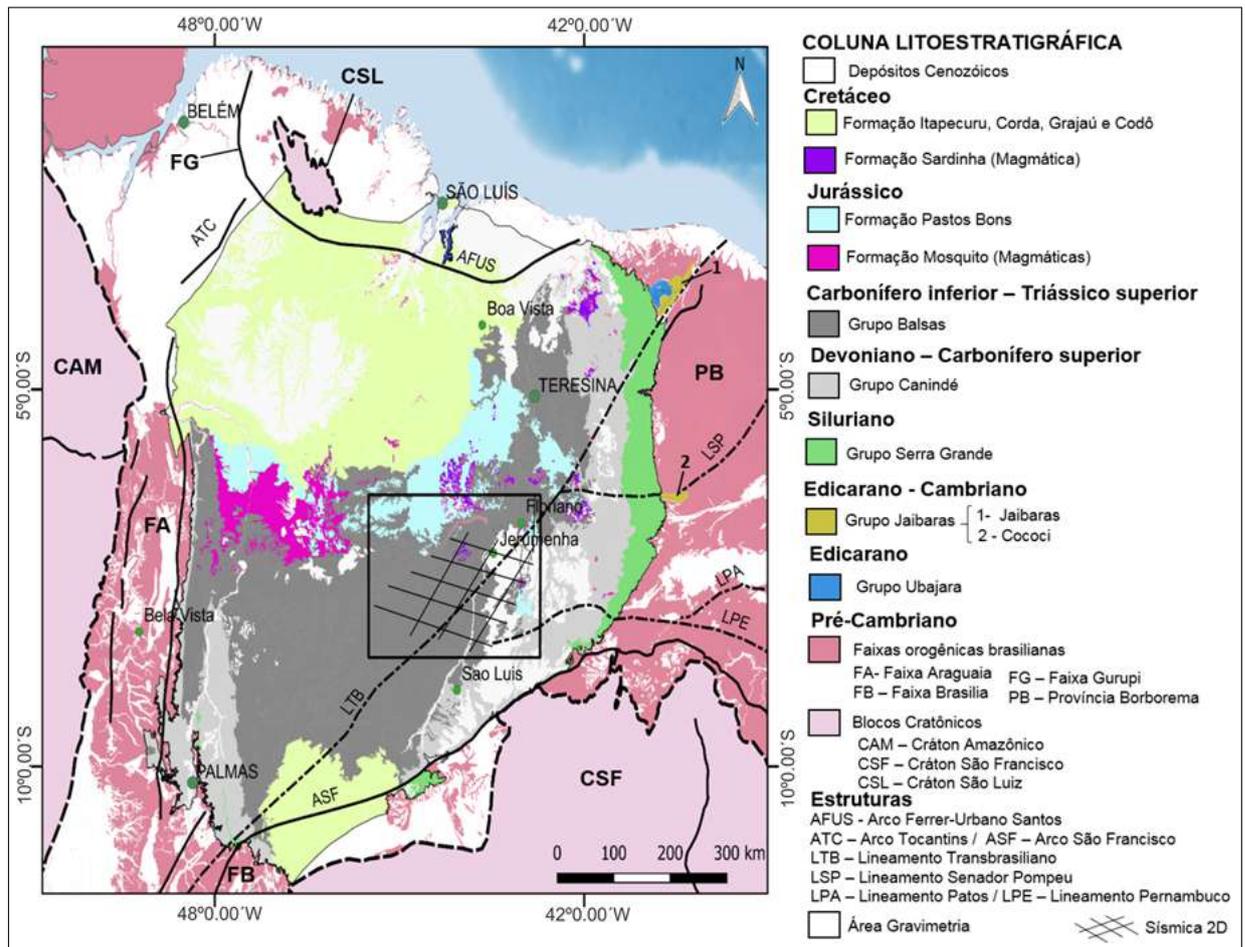
A sequência carbonífera-triássica corresponde ao Grupo Balsas e se caracteriza por apresentar mudanças estruturais e ambientais profundas na bacia. A instalação do arco de Tocantins a NW da bacia e do arco São Francisco ao sul (Figura 2) acarretou na alteração dos principais eixos deposicionais, antes controlados por importantes zonas de fraquezas de direção NE e NW e que sofreram deslocamento para o centro da bacia. Esta configuração criou um ambiente de mar restrito e clima quente. Possui semelhanças às sequências anteriores por continuar pertencendo a um sistema transgressivo-regressivo, porém em condições marinhas rasas e restrita (CAPUTO, 1984; GÓES, 1995).

Os processos de sedimentação foram interrompidos por um soerguimento generalizado resultado da orogenia *Gondwana* (ZALÁN, 1991).

A sequência jurássica foi marcada por eventos tectônicos precursores a desagregação do *Gondwana*. Tal tectônica distensiva (NE-SW) propiciou o surgimento da Bacia de Alpercatas, que se instalou num sistema de riftes de direções ENE-WSW e NNE-SSW (GÓES, 1995). Tanto as sequências jurássica quanto a cretácea sofreram deposição sedimentar de origem continental e marcam o registro de episódios marinho-transgressivo. Dois grandes eventos de magmatismo toleítico ocorreram, dando origem a Formação Mosquito (200 Ma) e a Formação Sardinha (130 Ma) (VAZ *et al.*, 2007).

A sequência cretácea, representada pelos depósitos sedimentares das Formações Grajaú, Codó e Itapecuru é marcada pelo deslocamento dos depocentros da bacia da região central para a região do extremo Norte e Noroeste, tal mudança ocorre como reflexo da abertura do Oceano Atlântico (VAZ *et al.*, 2007). O cenário tectônico estabelecido resulta em soerguimento de toda área central da Província do Meio-Norte dando origem a Bacia do Grajaú e do Espigão-Mestre. A primeira localiza-se ao Norte e é limitada pelo arco Ferrer-Urbano Santos. Já a segunda localiza-se ao Sul e faz fronteira com os limites da Província Parnaíba. Este novo ciclo sedimentar é caracterizado por uma rápida transgressão seguida da retirada definitiva do mar. Os sedimentos foram exclusivamente de origem continental. Assim, finalmente, esta sequência encerra o ciclo sedimentar da bacia (GÓES; FEIJÓ, 1994). Importante salientar que nem todas as sequências sedimentares descritas acima foram identificadas ao longo do poço 1FL1-001-PI. Sendo as sequências jurássica (Formação Pastos Bons) e cretácea (Formações Corda, Grajaú, Codó e Itapecuru)

Figura 8 - Mapa geológico simplificado da Bacia do Parnaíba.



Legenda: localização da Bacia do Parnaíba, bordada por blocos cratônicos e faixas Orográficas Brasileiras, adaptado de Cordani *et al.* (2016). As principais unidades geológicas foram compiladas a partir do projeto "Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo" da CPRM (SCHOBENHAUS, 2003).

Fonte: O autor, 2019.

## 2.4 Magmatismo

O magmatismo ao longo da Bacia do Parnaíba é dividido em três fases. A primeira se inicia antes da instalação da Bacia do Parnaíba, datada entre 511 e 505 Ma (HEILBRON *et al.*, 2016) e identificada nos grabens Cambro-Ordovicianos, que se originaram ao longo do Lineamento Transbrasiliano, presentes nas sequências da Bacia do Jaibaras (OLIVEIRA; MOHR-RIAK, 2003). Tal derrame, atualmente encontra-se sotoposto a cobertura sedimentar da Bacia do Parnaíba (NETO *et al.*, 2016). Os demais eventos magmáticos se instalaram durante o desenvolvimento da bacia. Ambos representam extensos derrames basálticos e intrusões ígneas (diques e soleiras) de composição básica, relacionados à ruptura do megacontinente *Pangea*, e foram divididos em duas unidades na bacia do Parnaíba, sendo elas :

- a) Formação Mosquito (Eocretáceo);
- b) Formação Sardinha (Eojurássico).

Segundo Neto *et al.* (2013), o magmatismo toleítico que pertence a Formação Mosquito é correlato ao evento CAMP - *Central Atlantic Magmatic Province* e se faz mais presente na porção Oeste da bacia. Já o evento magmático toleítico que culminou na Formação Sardinha é relacionado ao evento EQA-*Equatorial Circum-Atlantic Province*, e está mais concentrado na porção leste da bacia, marcando os primeiros estágios de rifteamento entre as margens Africana e Sul-Americana. É possível analisar os derrames magmáticos das formações em superfície, conforme mostra a Figura 8.

As três fases magmáticas estão localizadas em diferentes pontos da bacia. A primeira fase teve ocorrência apenas pontual ao longo das calhas do Lineamento Transbrasiliano, as demais fases ocorreram ao longo de toda a bacia e estão presentes em maior quantidade na Sequência Mesodevoniana-Eocarbonífera, conforme mencionado por GOES (1990). É possível observar as sequências magmáticas das fases 2 e 3 (Formação Mosquito e Formação Sardinha) em superfície, como mostra na Figura 8.

### 3 INTERPRETAÇÃO SÍSMICA

Todas as dez seções sísmicas 2D utilizadas neste trabalho (linhas 0295-001 a 0295-009 e 0240) foram processadas e migradas no domínio do tempo. Elas revelam a sequência tectono-sedimentar e a arquitetura da bacia da zona em estudo.

#### 3.1 Metodologia

##### 3.1.1 Identificação de Sequências Sísmicas

Primeiramente, realizou-se uma análise qualitativa nas dez seções sísmicas com o objetivo de identificar padrões de refletores sísmicos chaves para a interpretação. Tal análise permitiu a definição de quatro critérios para a identificação de tais padrões sísmicos, sendo eles:

- a) Frequência do sinal sísmico;
- b) Amplitude do sinal sísmico;
- c) Continuidade dos refletores;
- d) Geometria dos refletores.

Classifica-se amplitude como a magnitude do sinal e frequência como o número de ciclos por unidade de tempo numa determinada posição, já a continuidade e geometria dizem respeito à morfologia interna e externa dos refletores. No presente trabalho utilizou-se a classificação do sinal sísmico de amplitude positiva com a cor vermelha e amplitude negativa com a cor em azul.

O padrão sísmico dos principais horizontes interpretados neste trabalho pode ser observado na Figura de fáceis sísmicas (Figura 9). Podemos observar na primeira coluna exemplos do padrão sísmico dispostos em imagens com a mesma escala. Na coluna 2, observa-se a descrição dos quatro critérios utilizados para classificar cada padrão e, na última coluna, uma possível interpretação geológica, associando cada um a unidades estratigráficas conhecidas da literatura. Devido à baixa resolução das linhas sísmicas e à influência da elevada resposta de amplitude das diversas soleiras de diabásio, o grau de dificuldade em interpretar feições onde os refletores não são contínuos, apresentando padrões caóticos, foi bem elevado, como no caso do mapeamento dos refletores das formações Jaicós, Ipu e embasamento cristalino.

No caso de estruturas contínuas, com alta amplitude, como no caso das próprias soleiras ou de unidades que contenham essas intrusões, os padrões foram de fácil visualização. Segundo Planke *et al.* (2005), intrusões magmáticas em bacias sedimentares, quando em contato com folhelho, costumam se propagar ao longo do plano de acamamento da formação. Isto foi amplamente observado na sísmica ao longo das Formações Pimenteiras e Tianguá, consideradas folhelhos ricos em matéria orgânica. Nos topos de ambas formações apresentam alta amplitude do sinal sísmico. Sendo assim as intrusões funcionaram como guias para a interpretação. No total oito horizontes sísmicos foram interpretados, definindo oito sequências sismo-estratigráficas são eles; na Bacia do Parnaíba; topo da Formação Pimenteiras, topo da Formação Jaicós, topo da Formação Tianguá, topo da Formação Ipu, e, na bacia pré-siluriana, topo da Sequência I, topo da Sequência II, topo da Sequência III e topo do embasamento cristalino.