

II.5.1.2 Geologia e Geomorfologia

II.5.1.2.1 Localização

A Bacia de Barreirinhas (**Figura II.5.1.2.1**) localiza-se na Margem Equatorial Brasileira, se estendendo nas porções continental e marítima a nordeste do Estado do Maranhão (FEIJÓ, 1994; TROSDTORF JR *et al*, 2007). A área total coberta pela Bacia de Barreirinhas é de mais de 46.000 km², com aproximadamente 8.500 km² na parte emersa. Na parte marítima da bacia a batimetria chega até a cota de 3.000m (FERREIRA, 2011 e TROSDTORF JR *et al*, 2007).

A Bacia de Barreirinhas tem limites a leste com a Bacia do Ceará (Alto de Tutóia), a sul com a Bacia de São Luís e de Parnaíba (Arco Ferrer-Urbano Santos), e a oeste com a Bacia de São-Luís (FERREIRA, 2011). Seu limite noroeste é considerado arbitrário por conta da inexistência de feições geológicas marcantes que justifiquem a separação das bacias de Barreirinhas e Pará-Maranhão (TROSDTORF JR *et al*, 2007).

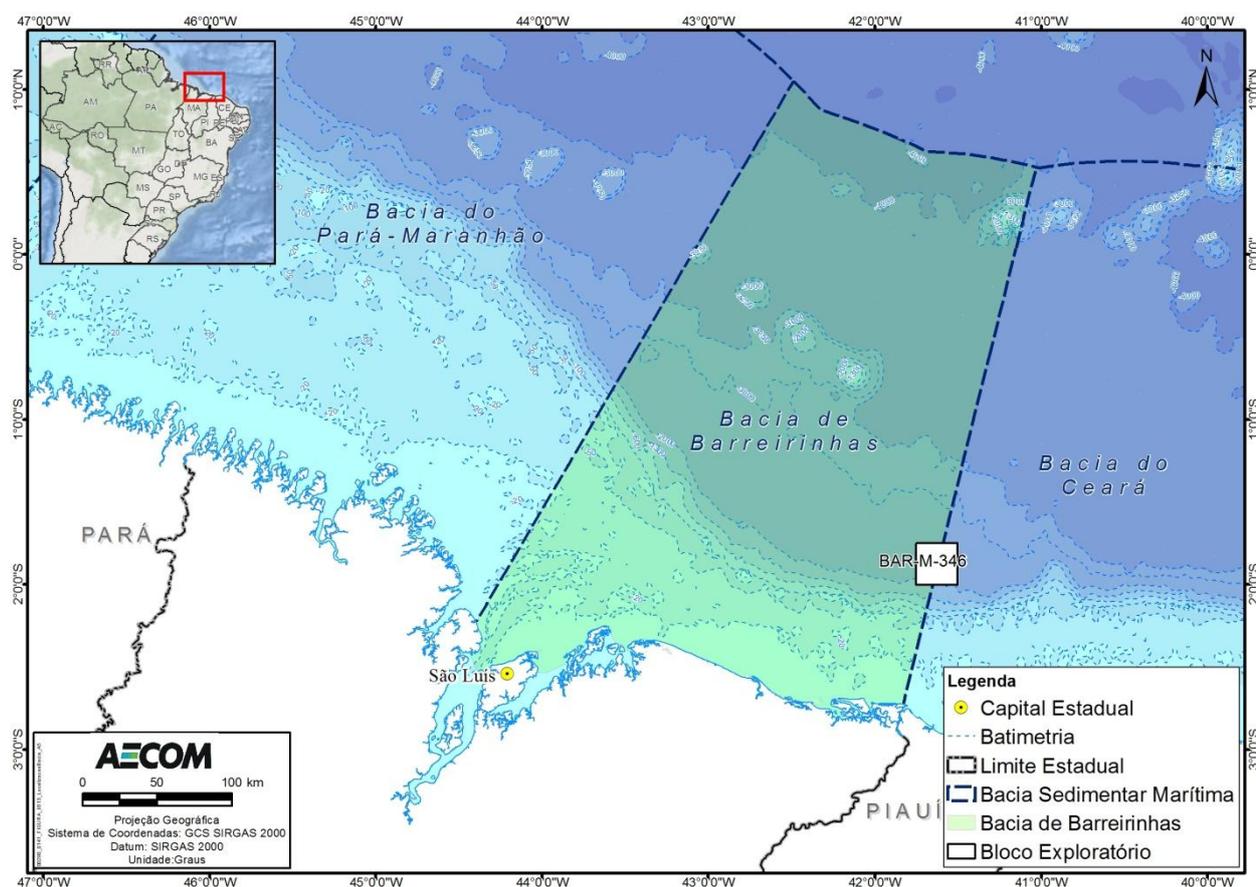


FIGURA II.5.1.2.1 – Mapa de localização e batimétrico da Bacia de Barreirinhas e bacias marginais adjacentes.

Fonte: AECOM (2014)

II.5.1.2.2. Geologia Regional

II.5.1.2.2.1. Evolução Geotectônica da Margem Atlântica Equatorial

A evolução da Margem Atlântica Equatorial foi especificamente estudada por SOARES JR *et al* (2008) considerando três fases distensivas durante o Mesozóico. Segundo estes autores, o primeiro evento distensivo na região ocorreu durante o início do Mesotriássico, com o surgimento de um sistema rifte de mais de 5.000 km de extensão localizado na região central do Pangea. Um vasto evento vulcânico no Triássico-Jurássico ocorreu na região do rifteamento, dando origem à separação dos megacontinentes Laurásia e Gondwana, além do surgimento do espalhamento oceânico entre esses continentes, que culminou na formação do Oceano Atlântico Central. A **Figura II.5.1.2.2** é uma representação esquemática da configuração dos continentes durante o processo de separação do megacontinente Pangea, evidenciando a abertura do Oceano Atlântico Central.

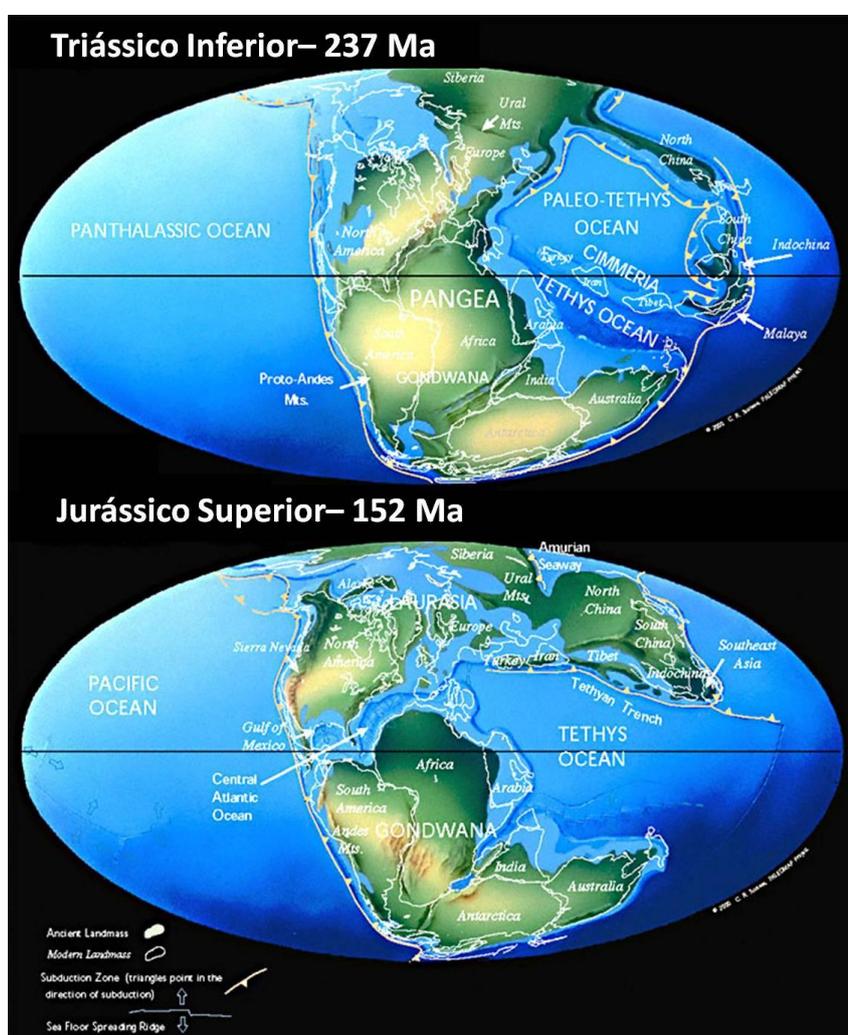


FIGURA II.5.1.2.2 - Processo de separação do megacontinente Pangea, evidenciando a abertura do Oceano Atlântico Central.

Fonte: SCOTese (2014). Disponível em: <http://www.scotese.com>.



Na porção norte da Placa Sul-Americana o início do evento de separação do Pangea ocorreu a aproximadamente 200 Ma (Triássico-Jurássico) em razão do evento magmático *Central Atlantic Magmatic Province* (CAMP). O evento magmático estaria provavelmente relacionado a um *hotspot* localizado entre a Flórida e a África (SOARES JR *et al*, 2008). A região limítrofe com a Guiana Francesa, Suriname e Guiana, sofreu soerguimento ligado às anomalias do manto seguido de magmatismo e subsequente rifteamento (SOARES JR *et al*, 2011). O magma oriundo deste evento atingiu a superfície através de dutos e hoje é reconhecido no complexo de diques do Estado do Amapá e no Graben de Calçoene, o qual abriga rochas vulcânicas datadas do Neotriássico e Jurássico (SOARES JR *et al*, 2011). O Graben de Calçoene representa o primeiro evento distensivo na região, responsável pela formação da Bacia da Foz do Amazonas, e apresenta falhas normais de direção NNW-SSE, com mergulho para ENE (SOARES JR *et al*, 2008).

Após a Formação do Graben de Calçoene a região permaneceu estável até o início do Eocretáceo (140 Ma). Novos esforços distensivos atingiram a região até o Barremiano e o processo de rifteamento foi novamente retomado, reativando as estruturas do Graben de Calçoene e formando novas falhas normais com direção N-S. Este segundo evento distensivo foi responsável pela formação do Graben de Cassiporé da Bacia do Foz do Amazonas, além da formação da Bacia de Marajó localizada a sul do Graben de Cassiporé e a oeste da Bacia do Parnaíba.

No Barremiano a região norte da Bacia do Parnaíba foi soerguida e toda sequência paleozoica foi exposta. A partir do Aptiano a Bacia do Parnaíba sofreu subsidência gerando uma bacia do tipo *sag* com deposição de pacote sedimentar delgado. Em seguida à subsidência houve um novo rifteamento que gerou o Sistema de Grabens do Gurupi (AZEVEDO, 1991) que compreende as bacias de Bragança-Viseu, São Luís e Ilha Nova (SOARES Jr *et al*, 2008). Ainda segundo Soares *et al*, no final do Aptiano, a Bacia de Marajó e o Sistema de Grabens do Gurupi alcançaram a sua ampliação máxima, com o completo desenvolvimento de sistemas de falhas antitéticas.

De acordo com SOARES JR *et al* (2008), o terceiro evento distensivo está relacionado à evolução do processo de abertura do Oceano Atlântico Equatorial a partir do extremo leste da Placa Sul-Americana, com sentido de movimentação de SE para NW e foi responsável pela formação das bacias Potiguar, Ceará, Barreirinhas e Pará-Maranhão, culminando com a ruptura continental. As bacias do Sistema de Grabens do Gurupi conectaram-se com a Bacia do Ceará através do desenvolvimento dos sistemas de falhas normais da Bacia de Ilha Nova, permitindo a ingressão do mar no interior da América do Sul nas bacias de São Luís, Ilha Nova e Grajaú. A Bacia de Barreirinhas ocupa a porção costeira e de plataforma continental do Estado do Maranhão e se desenvolveu sobre a Bacia do Parnaíba, com toda a coluna estratigráfica desta bacia presente como embasamento.

O término da fase rifte é diácrona ao longo da margem continental, terminando no Aptiano Inferior a Aptiano Médio na margem sudeste e atingindo o Albiano na margem equatorial. Os autores CONCEIÇÃO *et al*. (1988) realizaram uma extensa revisão bibliográfica sobre os mecanismos, a evolução e a cronologia do sistema rifte que resultou na abertura do Oceano Atlântico Sul. Estes autores sugerem que o sistema rifte do Atlântico Sul teve duas fases, a primeira predominantemente dúctil, ocorrendo na litosfera subcrustal, e a segunda, com comportamento rúptil, com intenso processo de falhamentos da crosta.

De acordo com CONCEIÇÃO *et al.* (1988), os movimentos tectônicos que deram origem ao deslocamento das placas e posterior ruptura do Gondwana não ocorreram de forma linear, mas a partir de movimento rotacional diferencial entre as partes oriental e ocidental, além de movimentos transtensionais dextrais, na América do Sul, e sinistral, na África. Um esquema da parte sul americana-africana do megacontinente Gondwana, evidenciando os movimentos diferenciais que originaram a ruptura, é apresentado na **Figura II.5.1.2.3**, a seguir. MOHRIAK (2003) exemplifica a configuração atual das bacias marginais brasileiras e do oeste da África a partir da reconstituição palinspástica, técnica utilizada para remoção progressiva das deformações em tentativa para validar a interpretação, da fase de abertura do Atlântico Sul (**Figura II.5.1.2.4**). Segundo este autor, as bacias sedimentares das costas brasileira e ocidental africana foram originadas no Mesozóico, durante o processo de separação da América do Sul e África.

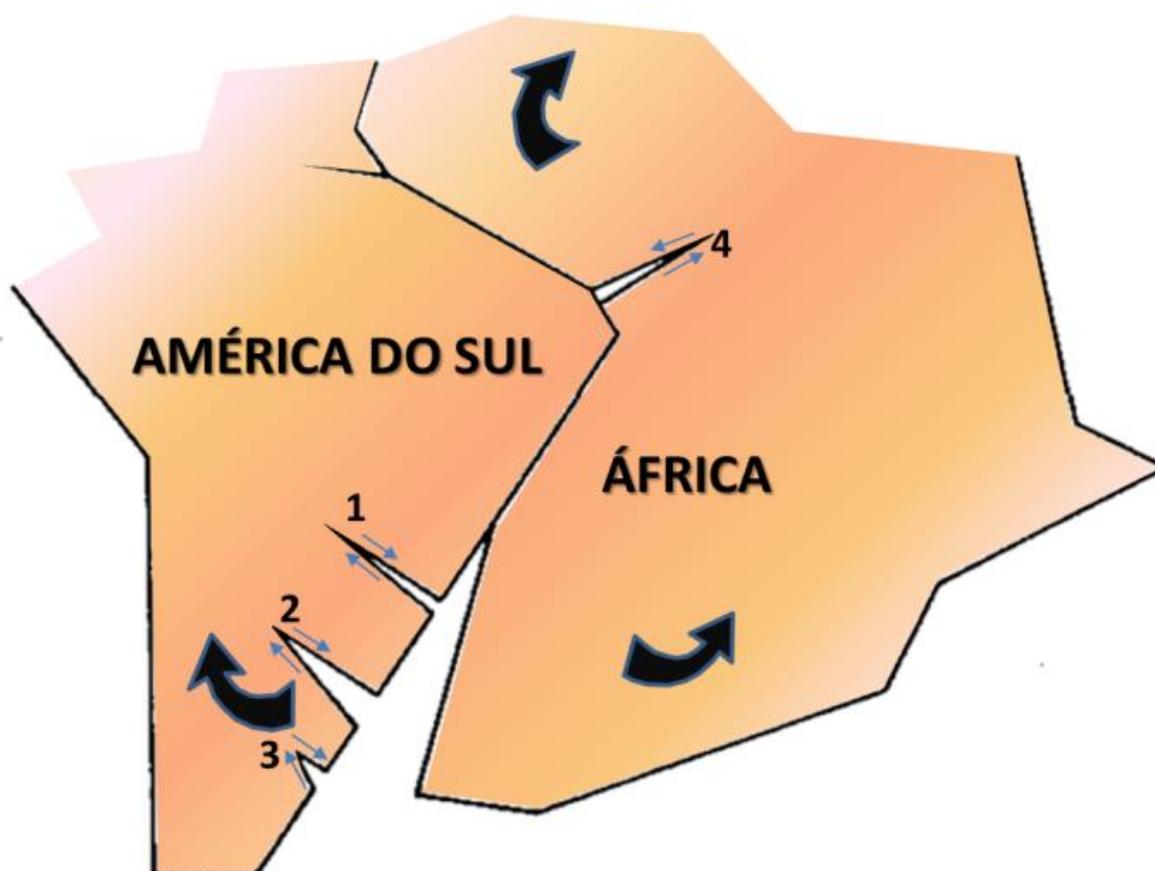


FIGURA II.5.1.2.3 – Esquema de parte do megacontinente Gondwana, evidenciando os principais movimentos diferenciais que originaram a ruptura da América do Sul e África. Os movimentos transtensionais da América do Sul (1: Zona de falha Curitiba-Maringá; 2: Rifte de Salado; 3: Rifte de Colorado e 4: Rifte de Benue).

Fonte: CONCEIÇÃO (1988).

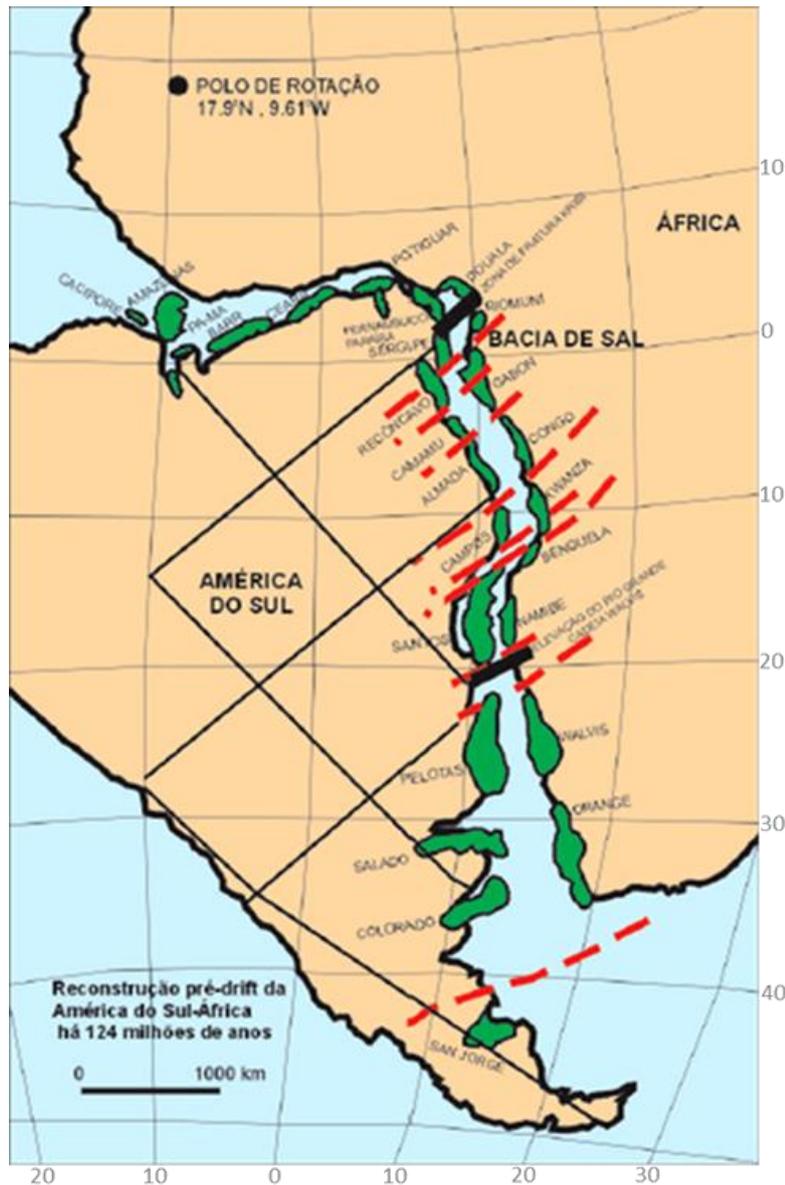


FIGURA II.5.1.2.4 - Configuração das bacias sedimentares marginais brasileiras e do oeste da África na fase pré-drift, a partir da reconstituição palinspástica da abertura do Atlântico Sul.

Fonte: MOHRIAK (2003).

II.5.1.2.2.2. Estágios Evolutivos das Bacias da Margem Equatorial na Região da Baía de Barreirinhas

Os riftes ao longo da margem continental, que evoluíram até formar as bacias sedimentares da margem passiva, formam um conjunto de bacias sedimentares que se estende desde o limite com a Guiana até o limite com as águas territoriais do Uruguai (MILANI E THOMAZ FILHO, 2000 *apud* MOHRIAK, 2003). As principais bacias da Margem Equatorial Brasileira e suas principais feições tectônicas estão mostradas na **Figura II.5.1.2.5**. A ruptura da América do Sul com a África foi caracterizada por riftes

abortados na região emersa intracontinental, sendo que, no norte do Brasil, se destacam os riftes de Tacutu e Marajó, além da ocorrência de pequenos riftes na plataforma continental do Ceará (e.g., Jacaúna).

Baseando-se principalmente em dados do Plano de Levantamento da Plataforma Continental Brasileira (LEPLAC) (RUSSO, 1999), observa-se que os depocentros das bacias sedimentares da margem continental equatorial apresentam uma espessura total de sedimentos (entre o fundo do mar e o embasamento pré-cambriano ou vulcânico) bastante variável, sendo as maiores espessuras observadas nos depocentros do Cone do Rio Amazonas e na Baía de Barreirinhas.

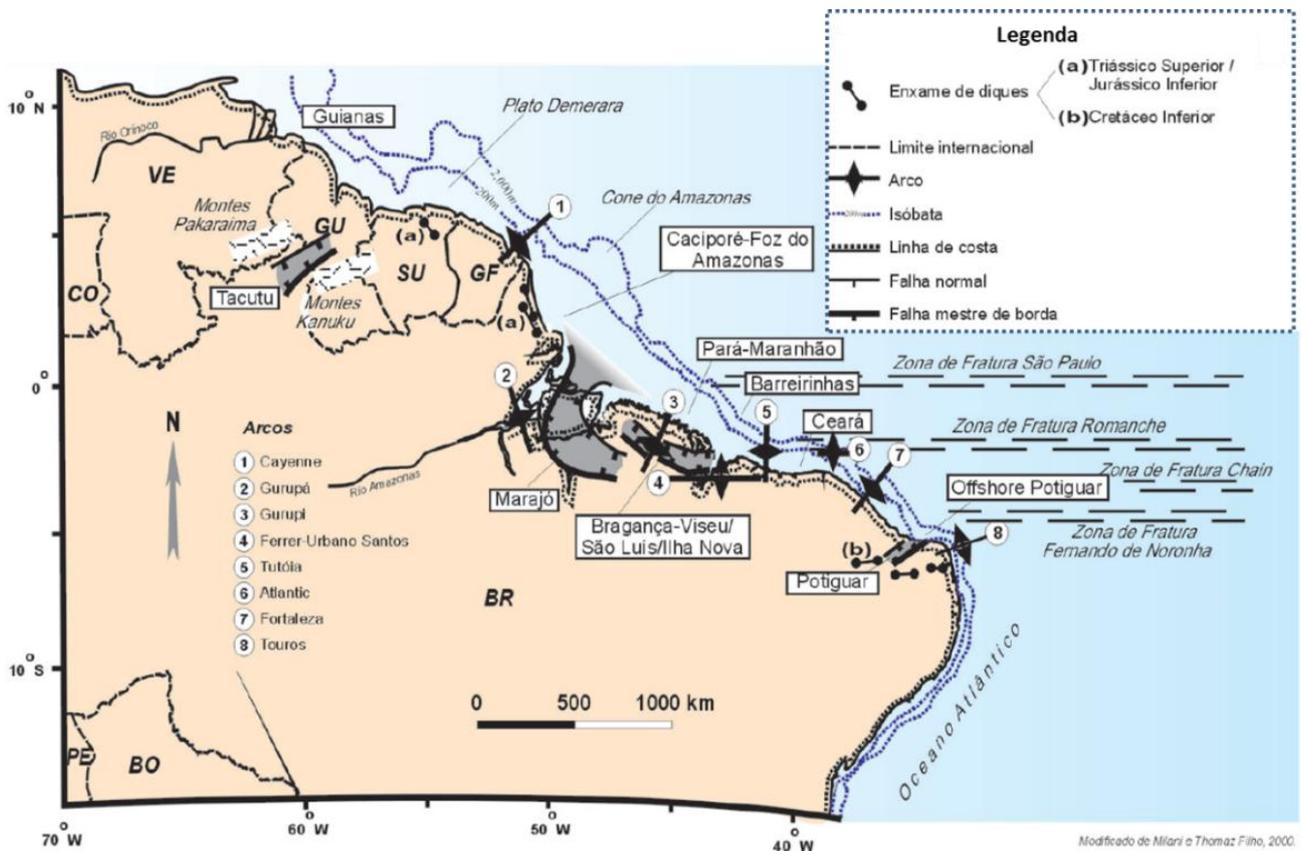


FIGURA II.5.1.2.5 – Mapa geológico esquemático da região norte brasileira, mostrando as bacias sedimentares da margem equatorial transformante.

Fonte: MOHRIAK (2003).

Na origem das bacias marginais da Margem Equatorial Brasileira, especificamente com relação à Baía de Barreirinhas, consideram-se três estágios evolutivos no processo de sua formação: pré-transformante, sin-transformante e pós-transformante (MOHRIAK, 2003). O primeiro estágio correspondeu à fase de sedimentação pré-transtensão (pré-Barremiano) e a fase sin-transtensão do Barremiano e Aptiano, quando esforços transtensionais criaram uma série de depocentros com direção NW–SE, dispostos *en-echelon* (MATOS, 1999 *apud* MOHRIAK, 2003). Segundo FEIJÓ (1994), a formação da Baía de Barreirinhas teve início e finalização tardiamente em relação as demais bacias da margem continental, sendo o rifte preenchido por um ambiente marinho no Albiano.

O estágio sin-transformante (Albiano a Cenomaniano) inclui segmentos dominados por transtensão com cisalhamento puro (falhamentos extensionais normais), limitados por zonas cisalhantes discretas, como na Bacia de Barreirinhas, e regiões dominadas por cisalhamento do tipo *wrench*, com transtensão e transpressão. No segmento entre Piauí e Ceará–Acará observam-se grandes feições de compressão, como falhas reversas, resultados do encurtamento crustal e do soerguimento dos sedimentos dos depocentros anteriormente formados. A fase sin-transformante apresenta também um período de margem transformante passiva, quando ocorre contato entre as crostas continental e oceânica por meio de falha transformante ativa (MOHRIAK, 2003).

Já o estágio pós-transformante é caracterizado pela fase de margem passiva transformante, na qual ocorre um contato contínuo das porções de crosta oceânica ao longo de falha transformante ativa. Segundo MATOS (1999) *apud* MOHRIAK (2003) essa fase é marcada por uma contínua subsidência e sedimentação na margem continental, como resultado do resfriamento e contração térmica da litosfera. A **Figura II.5.1.2.6**, a seguir, apresenta o modelo geodinâmico esquemático descrito no trabalho de MOHRIAK (2003) para a margem continental transformante.

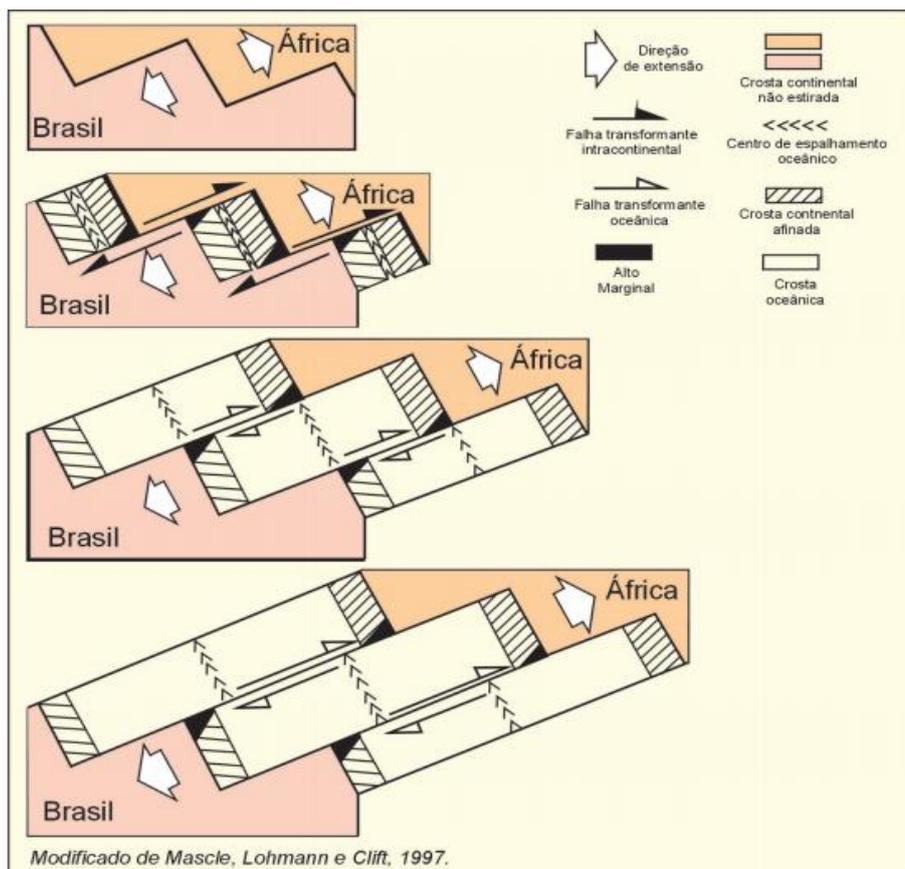


FIGURA II.5.1.2.6 – Modelo geodinâmico esquemático mostrando a separação da placa sul-americana da placa africana por meio de falhas transformantes, condicionando diferentes estágios evolutivos das bacias sedimentares da margem continental transformante.

Fonte: MOHRIAK (2003).



II.5.1.2.2.3. Evolução das Bacias da Margem Equatorial na Região da Bacia de Barreirinhas e Áreas Adjacentes

Após a formação do Graben de Calçoene, a região permaneceu estável por 60 Ma até a ocorrência de um segundo evento distensivo durante o Eocretáceo (antes do período Barremiano). Este evento, por sua vez, deu origem a novas falhas normais na região, que estão direcionadas no sentido N-S. Além disso, este novo evento de fraco vulcanismo e rifteamento deu origem ao Graben Cassiporé, na Bacia da Foz do Amazonas. Somado a tais eventos, outro rifte, hoje a Bacia de Marajó, evoluiu entre as bacias do Amazonas e da Parnaíba, na região Sul do Graben Cassiporé (SOARES JR *et al*, 2008).

A partir do Barremiano ocorreu a conexão dos falhamentos normais da Bacia da Foz do Amazonas e de Marajó. Conforme a estruturação dessas novas falhas foi possível o surgimento das sub-bacias de Mocajuba e Limoeiro. No Aptiano, enquanto as bacias da Foz do Amazonas e de Marajó se expandiam com a formação de novas falhas normais, a região entrava na fase pré-rifte. A região norte da Bacia do Parnaíba, anteriormente soerguida no Barremiano, sofreu subsidência dando origem a uma extensa bacia do tipo *sag*, dando oportunidade a deposição de um pacote sedimentar espesso sobre uma porção desta bacia e do embasamento Pré-Cambriano (SOARES JR *et al*, 2008).

Após a subsidência, um novo processo de rifteamento ocorreu na região com regime distensivo, dando origem aos sistemas de Grabens do Gurupi e que, por sua vez, originou as bacias de Bragança-Viseu e Ilha Nova. Em seguida, os sistemas de falhas foram ampliados, formando a Bacia de São Luiz e a ombreira do sistema com a formação da bacia do Sistema de Grabens do Gurupi, os sedimentos da bacia do tipo *sag* e o seu deslocamento até ficarem expostos na região do Arco Ferrer Urbano-Santos, sendo soterrados a norte, na região dos depocentros das bacias de Bragança, Viseu, Ilha Nova e São Luiz.

Posteriormente, no Albiano, a Bacia de Barreirinhas teve a sua formação iniciada por conta da instalação de sistemas de falhas normais de direção E-W e NW-SE e mergulho para N. A propagação para NE individualizou a Bacia do Pará-Maranhão por conta de falhas de direção NW-SE com mergulho para NE e de direção E-W e mergulho para N. Falhas sintéticas surgiram no piso a partir da falha principal, formando uma bacia assimétrica e com deposição inicial de sistemas flúvio-lacustres (SOARES JR *et al*, 2008). Ao final do Albiano, o evento distensivo estava concentrado nas bacias da Foz do Amazonas, Pará- Maranhão e Barreirinhas, no qual se desenvolveram sistemas marinhos. A conexão com a porção norte da América do Sul ocorria a partir de falhas que controlavam a formação do Oceano Atlântico Central. Posteriormente, no Neocretáceo, a ruptura continental e o início da deriva dos continentes sul-americano e africano fizeram com que a atuação das falhas transcorrentes de NE-SW fosse acentuada em todos os riftes da região meio-norte do Brasil, compartimentando os depocentros das bacias (SOARES JR *et al*, 2008).

Com a finalidade de ilustrar a evolução paleogeográfica da Margem Atlântica Equatorial, SOARES JR. *et al*. (2011) estudaram a sua paleogeografia em um período que consistiu do Triássico ao Holoceno, com base em informações de dados sedimentares, paleontológicos e estruturais das bacias. Eles também levaram em consideração os eventos magmáticos e a evolução do rifteamento da margem. A **Figura II.5.1.2.7**, a seguir, representa um resumo dos ambientes sedimentares e vulcanismo no decorrer da sua evolução.

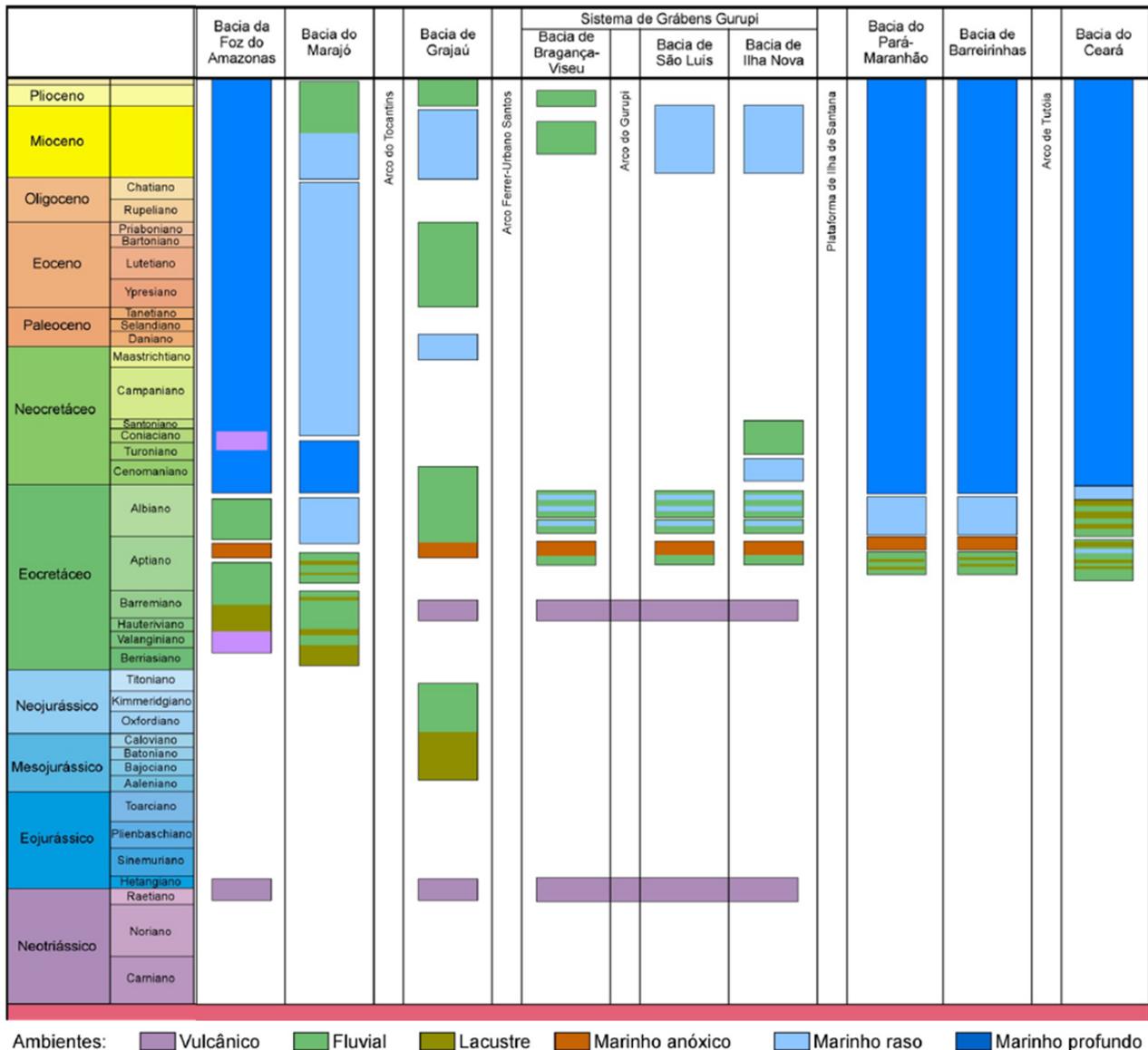


FIGURA II.5.1.2.7 – Ambientes sedimentares e marinhos nas bacias da margem equatorial atlântica conforme a sua evolução.

Fonte: SOARES JR. *et al.* (2011).

SOARES JR. *et al.* (2011) concluíram que a Margem Equatorial brasileira é formada por bacias que evoluíram continuamente do Neotriássico ao Albiano, embora uma parte tenha se desenvolvido para a fragmentação do continente e formação da margem passiva e a outra parte tenha sido interrompida. A direção principal na paleotensão durante o rifteamento no Eocretáceo foi de NE-SW, tendo como evidência as direções das falhas compartimentais, bem como as direções predominantes de NW-SE das falhas normais. Tais falhas compartimentais e normais indicam que a direção de estiramento máximo foi de NE-SW para a fase rifte. Após o rifteamento e a sua consequente separação entre a América do Sul e a África, as direções das paleotensões foram predominantemente no sentido E-W por conta das zonas transformantes que surgiram na crosta oceânica.



O texto abaixo se refere integralmente ao trabalho realizado por SOARES JR. *et al.* (2011), que estudou a evolução do rifteamento e a paleogeografia da margem equatorial brasileira do Triássico ao Holoceno.

Simplificando o esquema de SOARES JR. *et al.* (2011), a evolução do rifteamento e da paleogeografia das bacias da Margem Equatorial, especialmente na região da Bacia de Barreirinhas e adjacências, pode ser explicada da seguinte forma:

➤ **Triássico e Jurássico**

Importantes mudanças na tectônica global com fortes impactos na paisagem se iniciaram no Triássico. O panorama neste período foi marcado pela existência de um único e enorme continente (Pangea), que ocupava quase um hemisfério, e pelo Megaoceano Pantalassa. A estabilidade na paisagem foi interrompida no final do Triássico, em torno de 200 Ma, pelo evento magmático CAMP (*Central Atlantic Magmatic Province*) (MARZOLI *et al.*, 2000; HAMES *et al.*, 2003; MC HONE, 2000; 2002; 2006, dentre outros *apud* SOARES JR. *et al.*, 2011). No interior dos continentes, inclusive na região Meio-Norte do Brasil, dominavam paisagens desérticas (BRANDÃO & FEIJÓ, 1994; FIGUEIREDO *et al.*, 2007), com pouca ou nenhuma drenagem desenvolvida, gerando raros registros sedimentares.

As regiões sudeste do Pará e sudoeste do Maranhão experimentaram soerguimentos ligados a anomalias térmicas do manto astenosférico, seguido de magmatismo e rifteamento. Na Bacia de Parnaíba este evento de magmatismo está materializado pelos derrames e intrusões magmáticas da Formação Mosquito (AGUIAR, 1971).

No Jurássico, segundo SOARES JR. *et al.* (2011), o magmatismo e o soerguimento foram sucedidos pela formação de riftes, seguindo direções impostas por junções tríplexes associadas aos *hotspots* que originaram o Oceano Atlântico Central (MORGAN, 1981 *apud* SOARES JR. *et al.*, 2011). As áreas adjacentes à Bacia do Parnaíba e foram soerguidas e começaram a experimentar forte erosão, causada pelo soerguimento gerado pelo intumescimento devido ao magmatismo com forte controle tectônico, sendo que em algumas áreas tiveram a sequência paleozoica totalmente erodida e outras, como no embasamento da Bacia de Barreirinhas (que se formou 60 Ma de anos depois), totalmente preservado (**Figura II.5.1.2.8**). Nas áreas não soerguidas, ocorreu a deposição de sequências flúvio-lacustres das formações Corda e Pastos Bons, representando o primeiro evento de formação da Bacia de Grajaú em baixos estruturais de forma geométrica pouco conhecida durante o Meso e Neojurássico.

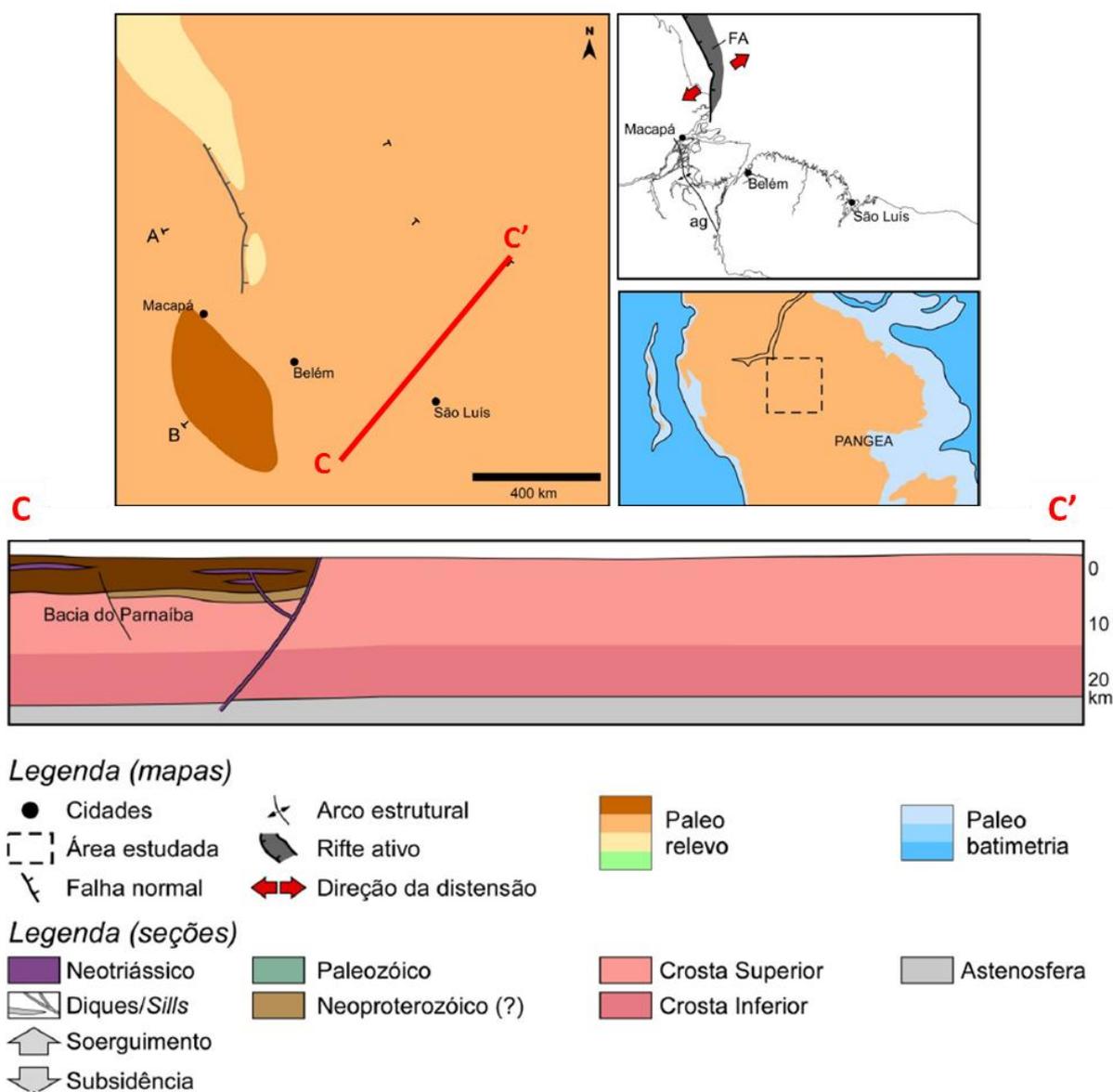


FIGURA II.5.1.2.8 – Seção geológica esquemática da região adjacente à Bacia de Barreirinhas durante o Neotriássico - FA: Bacia da Foz do Amazonas; ag: Arco de Gurupá.

Fonte: SOARES JR. *et al.* (2011).

CRETÁCEO

O Cretáceo foi o período em que ocorreu o maior número de modificações na paisagem da região, com a formação de várias bacias, e culminando com a separação da América do Sul e África. No Eocretáceo, antes do Barremiano, passou a dominar na região da Ilha de Marajó um regime distensivo de baixa intensidade (COSTA *et al.*, 2002 *apud* SOARES JR. *et al.*, 2011), resultando na formação da Bacia de Marajó, com falhas normais sintéticas que controlaram a formação das sub-bacias de Cameté e Mexiana, e o desenvolvimento do Arco de Gurupá; este funcionou como a ombreira principal e provavelmente forneceu grande parte dos sedimentos que preencheram os depocentros da bacia (Figura II.5.1.2.9).

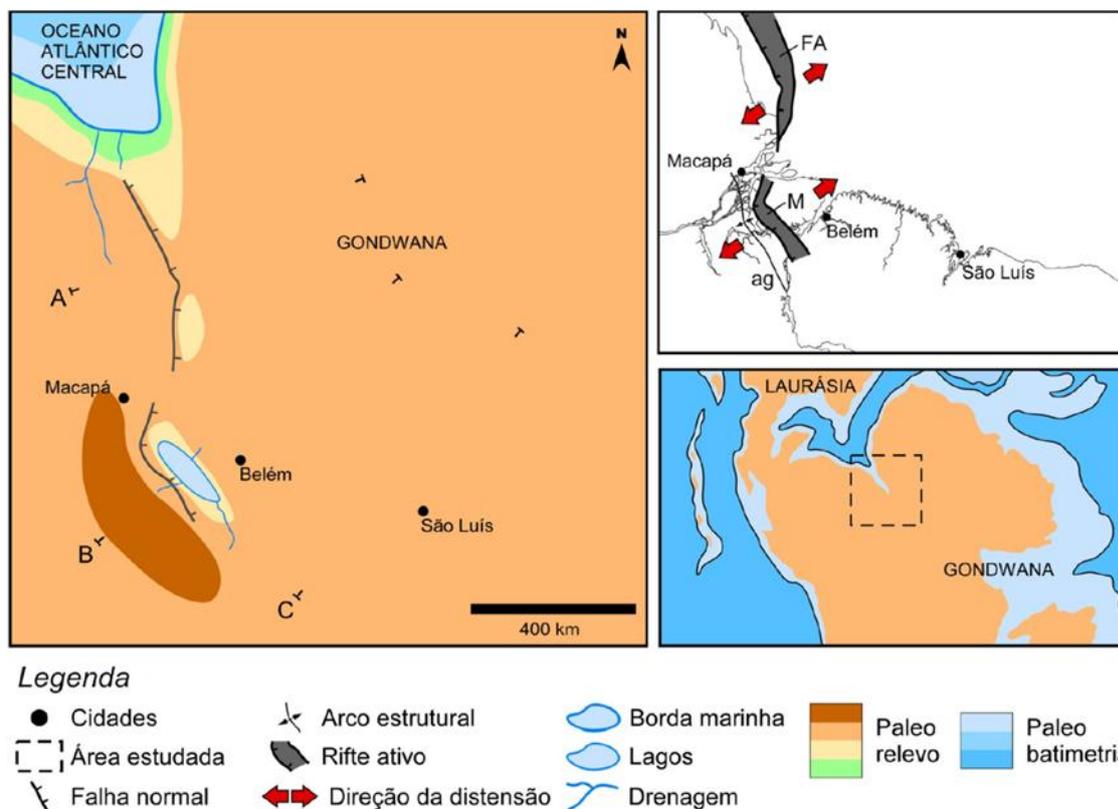


FIGURA II.5.1.2.9 – Mapa paleogeográfico do Eocretáceo (Pré-Barremiano) mostrando a formação ainda incipiente da Bacia de Marajó – FA: Bacia da Foz do Amazonas; M: Bacia de Marajó; ag: Arco de Gurupá.

Fonte: SOARES JR. et al. (2011).

➤ Eocretáceo - Barremiano

Durante o Barremiano um novo evento de rifteamento com vulcanismo associado incidiu na região, resultando na reativação das estruturas da Bacia da Foz do Amazonas e na deposição da Formação Cassiporé, correspondendo à segunda fase rife nesta bacia (BRANDÃO & FEIJÓ, 1994; FIGUEIREDO *et al.*, 2007). Houve a conexão das falhas normais das bacias da Foz do Amazonas e Marajó, a partir da região da Sub-Bacia de Mexiana (SOARES JR. *et al.*, 2008) e os dois sistemas de rife passaram a atuar de forma conjunta (**Figura II.5.1.2.10**). A estruturação marcada no Graben Cassiporé são falhas de direções NW-SE e N-S que se conectam à Bacia de Marajó através de falhas que compõem a Sub-bacia de Mexiana, que controlou um grande sistema flúvio-lacustre, com drenagens fluindo do Arco de Gurupá para a Bacia de Marajó (**Figura II.5.1.2.10**). A região norte da Bacia do Parnaíba sofreu soerguimento, expondo sedimentos de toda sua coluna estratigráfica e de rochas do embasamento, antigas bacias proterozóicas (**Figura II.5.1.2.10**).

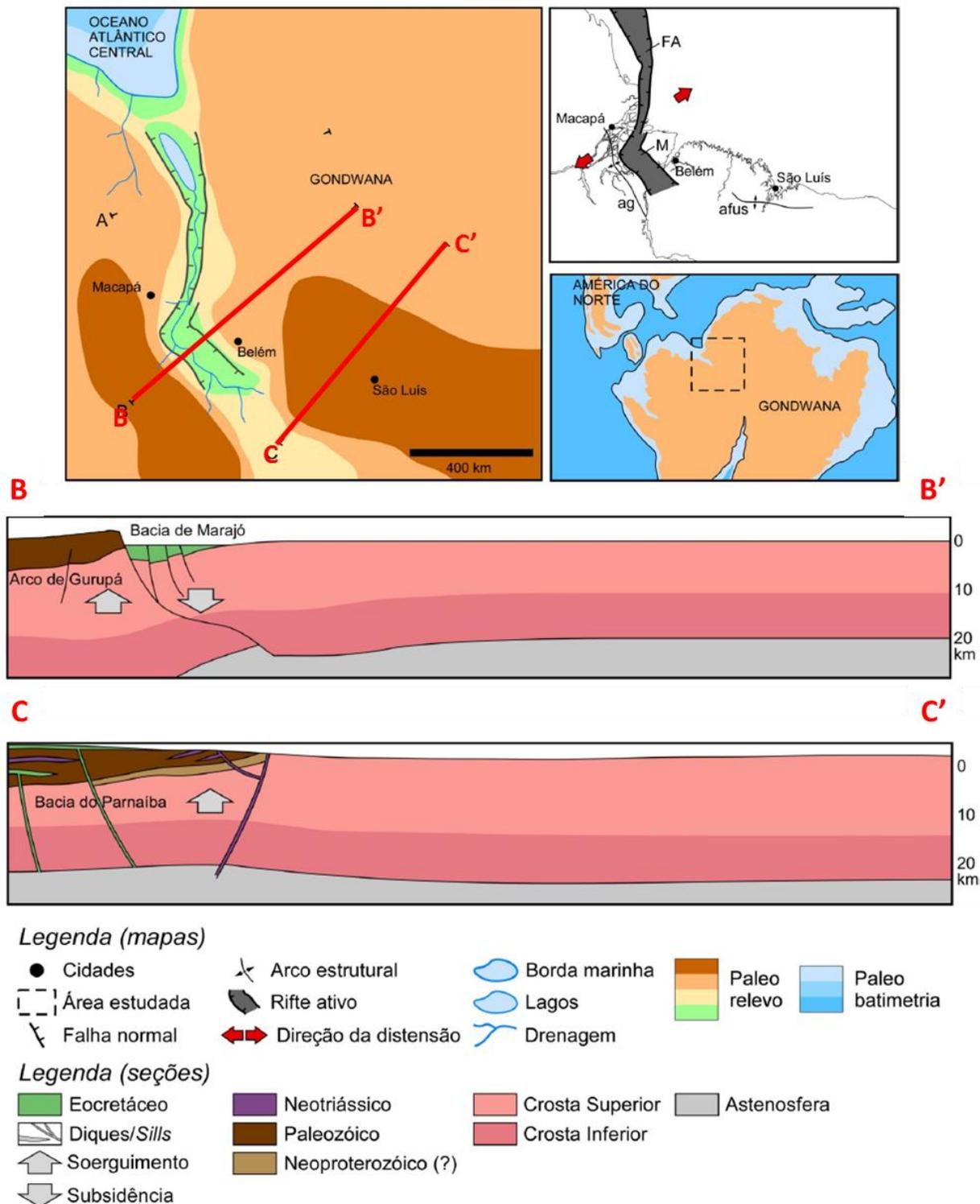


FIGURA II.5.1.2.10 – Mapa paleogeográfico e seções geológicas do Eocretáceo (Barremiano) mostrando o desenvolvimento da Bacia de Marajó e sua conexão com a Bacia da Foz do Amazonas – FA: Bacia da Foz do Amazonas; M: Bacia de Marajó; ag: Arco de Gurupá; afus: Arco Ferrer – Urbano Santos.

Fonte: SOARES JR. *et al.* (2011).



➤ **Eocretáceo - Aptiano**

Ainda segundo SOARES JR. *et al.* (2011), o Aptiano na região teria se caracterizado por um paleoambiente de paisagem montanhosa, adjacentes aos depocentros, com grande espessura dos sedimentos que foram depositados na Bacia de Marajó e presença de rejeitos de vários quilômetros que estão associadas às falhas normais, a borda flexural começou a individualizar-se a partir da instalação de falhas antitéticas, estabelecidas pela contínua ampliação da bacia, sistemas lístricos e planares, inclinados para oeste na Sub-Bacia de Limoeiro (**Figura II.5.1.2.11**). Com a propagação dos sistemas de falhas antitéticas para nordeste, aumentou a taxa de soerguimento da área do Marajó Setentrional e a Bacia de Marajó alcançou o estágio de ampliação máximo, havendo aporte expressivo de sedimentos do Marajó Setentrional a leste, do Arco de Tocantins a sudeste, e do Arco de Gurupá a oeste.

A leste da Bacia de Marajó iniciaram-se no Aptiano as individualizações do Arco Ferrer-Urbano Santos e do Arco de Tocantins, associadas à nova atividade magmática na região, representada pelos derrames e soleiras da Formação Mosquito na Bacia de Grajaú. O soerguimento proporcionou a exposição de sequências das formações Corda e Pastos Bons, unidades paleozoicas da Bacia do Parnaíba (**Figura II.5.1.2.11**), rochas pré-silurianas e rochas do embasamento cristalino, que foram intensamente erodidas e serviram como área fonte de sedimentos para os depocentros adjacentes. O Arco de Tocantins provavelmente funcionou como anteparo à expansão do rifteamento da Bacia de Marajó para leste e para sul, promovendo a propagação de novos esforços extensionais para outras áreas (SOARES JR. *et al.*, 2011).

Ainda no Aptiano, o Arco de Tocantins foi parcialmente abatido, a partir do segundo evento extensional que gerou a Bacia de Grajaú. No final do Aptiano, houve subsidência regional na região do Arco Ferrer-Urbano Santos, e a formação da Bacia de São Luís e deposição da Formação Codó nas bacias de Bragança-Viseu, São Luís e Grajaú, acompanhada de transgressão que responde pela formação do “Lago Codó” na Bacia de Bragança-Viseu, do “Mar Codó” na Bacia de São Luís e do “Mar Epicontinental Codó” na Bacia de Grajaú (SOARES JR. *et al.* 2008) (**Figura II.5.1.2.11**).

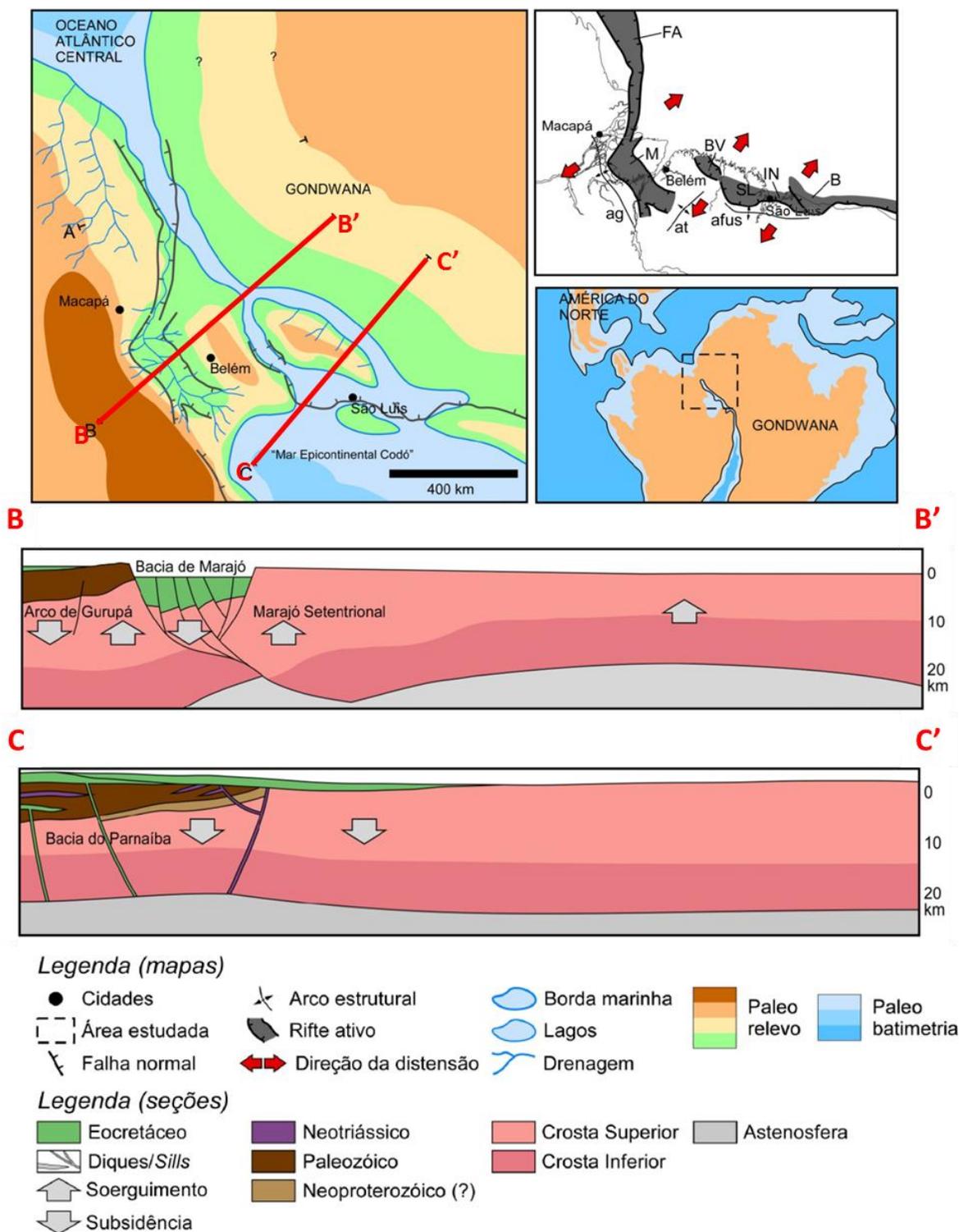


FIGURA II.5.1.2.11 – Mapa paleogeográfico e seções geológicas do final do Aptiano mostrando o desenvolvimento da Bacia de São Luís, o ‘Mar Epicontinental Codó’ e o início da Bacia de Barreirinhas – FA: Bacia da Foz do Amazonas; M: Bacia de Marajó; B: Bacia de Barreirinhas; BV: Bacia de Bragança-Viseu; SL: Bacia de São Luís; IN: Bacia de Ilha Nova; ag: Arco de Gurupá; afus: Arco Ferrer – Urbano Santos; at: Arco de Tocantins.

Fonte: SOARES JR. *et al.* (2011).



➤ **Eocretáceo - Albiano**

Segundo SOARES JR. *et al.* (2011), a partir do final do Aptiano iniciou-se o soerguimento do Arco do Gurupi com o aumento do rifteamento na região, o qual sofreu erosão e funcionou como divisor de águas, com drenagens instaladas no sentido da Bacia de Bragança-Viseu e interagindo com as ocasionais ingressões marinhas nas bacias de São Luís e Ilha Nova. Ao mesmo tempo em que o Arco do Gurupi se formava, ocorria a deposição da Sequência Itapecuru Inferior, na Bacia de Bragança-Viseu, com sistemas de drenagens fluindo destas regiões para ESE, interagindo com o “Mar Itapecuru I”, que iniciava sua transgressão sobre a Bacia de São Luís.

O Albiano é o estágio mais importante da evolução do Gondwana na região, pois foi marcado pela formação da frente extensional que originou as bacias do Pará-Maranhão e Barreirinhas e pela última expressão de fragmentação e separação dos continentes Sul-Americano e Africano. No Albiano, diminuiu a intensidade das movimentações na Bacia de Marajó e no Sistema de Grabens de Gurupi, e ambos experimentaram principalmente subsidência, a julgar pelo pequeno aporte de sedimentos, seguido de assoreamento. A região Marajó Setentrional estava experimentando forte soerguimento, a partir da contínua expansão da Bacia de Marajó e formação das falhas antitéticas, funcionando ainda como fonte de sedimentos para a Bacia de Marajó e para os sistemas flúvio-lacustres da Bacia do Pará-Maranhão (**Figura II.5.1.2.12**) (SOARES JR. *et al.*, 2011).

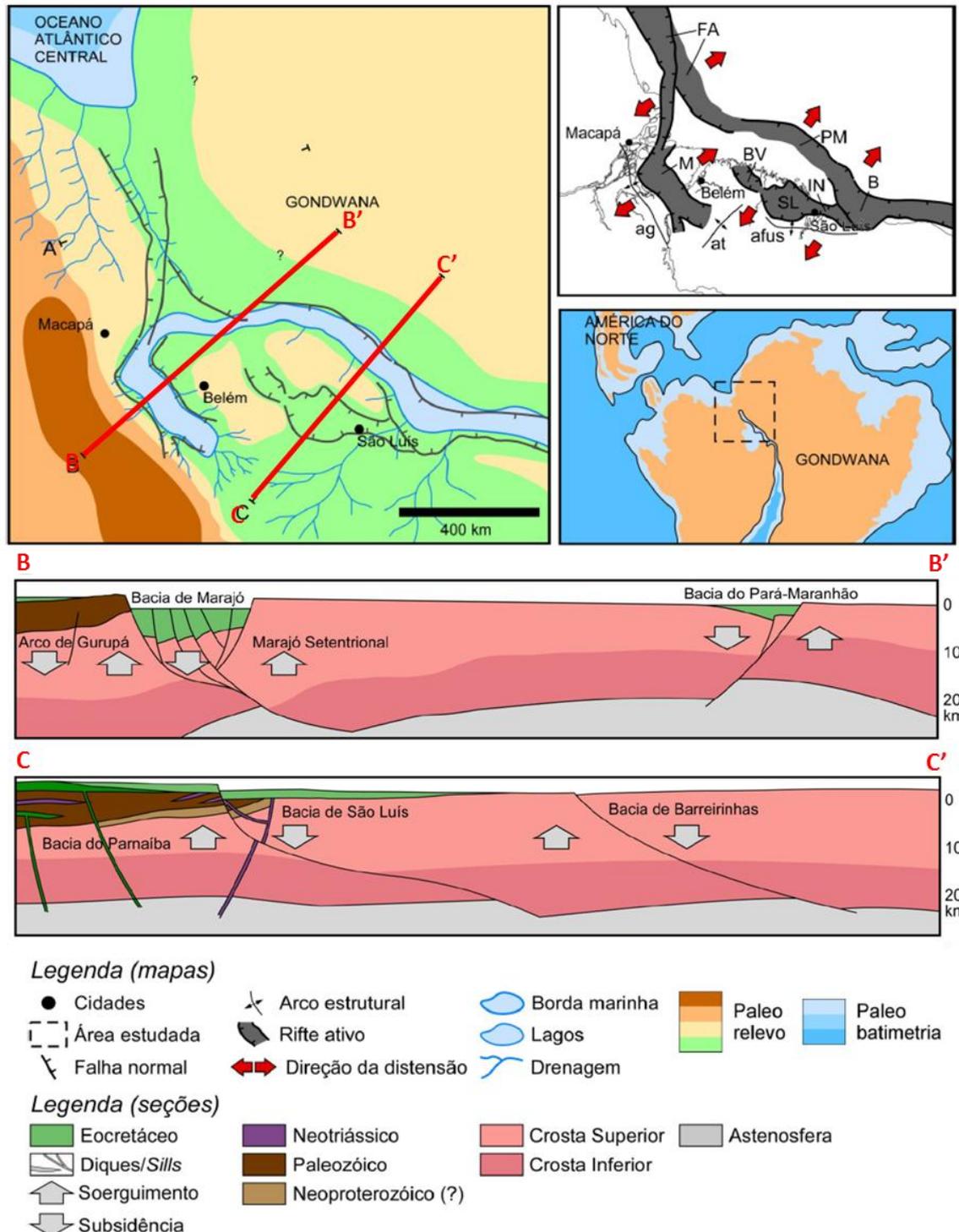


FIGURA II.5.1.2.12 – Seções geológicas esquemáticas da região adjacente à Baía de Barreirinhas no final do Aptiano e início do Albiano mostrando o desenvolvimento da Baía de São Luís e as fases iniciais da formação das bacias de Pará-Maranhão e Barreirinhas. FA: Bacia da Foz do Amazonas; M: Bacia de Marajó; B: Bacia de Barreirinhas; BV: Bacia de Bragança-Viseu; SL: Bacia de São Luís; IN: Bacia de Ilha Nova; PM: Bacia Pará-Maranhão; ag: Arco de Gurupá; afus: Arco Ferrer – Urbano Santos; at: Arco de Tocantins.

Fonte: SOARES JR. *et al.* (2011).



A partir da primeira metade do Albiano foi retomada a regressão do “Mar Itapecuru I” na Bacia de São Luís, com predomínio de deposição de sedimentos continentais e leques aluviais próximos as falhas principais, interagindo com um mar raso, decorrente de rápida transgressão na Bacia de Ilha Nova. O Oceano Atlântico Equatorial teve início do seu desenvolvimento no Valanginiano, a partir da formação da Bacia de Potiguar (SOARES JR *et al.*, 2008). O rifteamento que formou o Oceano Atlântico Equatorial estava se propagando da Bacia do Ceará em direção ao noroeste, desenvolvendo as Bacias de Barreirinhas e Pará-Maranhão e suas ombreiras, a Plataforma de Ilha de Santana. Na Bacia de Barreirinhas, houve a invasão marinha, enquanto que na Bacia do Pará-Maranhão dominavam sistemas lacustres associados a incipientes sistemas fluviais (SOARES JR. *et al.*, 2011).

No final do Albiano, ocorreu o último ciclo deposicional nas bacias de Bragança-Viseu e São Luís e nova ingressão marinha nesta última, denominada de “Mar Itapecuru II”. Nesse período, houve deposição de sedimentos continentais no Arco Ferrer-Urbano Santos, dominando sistemas fluviais que desaguavam no Proto-Oceano Atlântico Equatorial o qual teve a ligação com Atlântico Central, através do contínuo desenvolvimento do rifteamento da Bacia do Pará-Maranhão para a direção noroeste, através de movimentação rotacional no sentido anti-horário da África em relação à América do Sul, gerando nova fase de rifteamento e a entrada do mar na Bacia da Foz do Amazonas (**Figura II.5.1.2.13**) (SOARES JR. *et al.*, 2011).

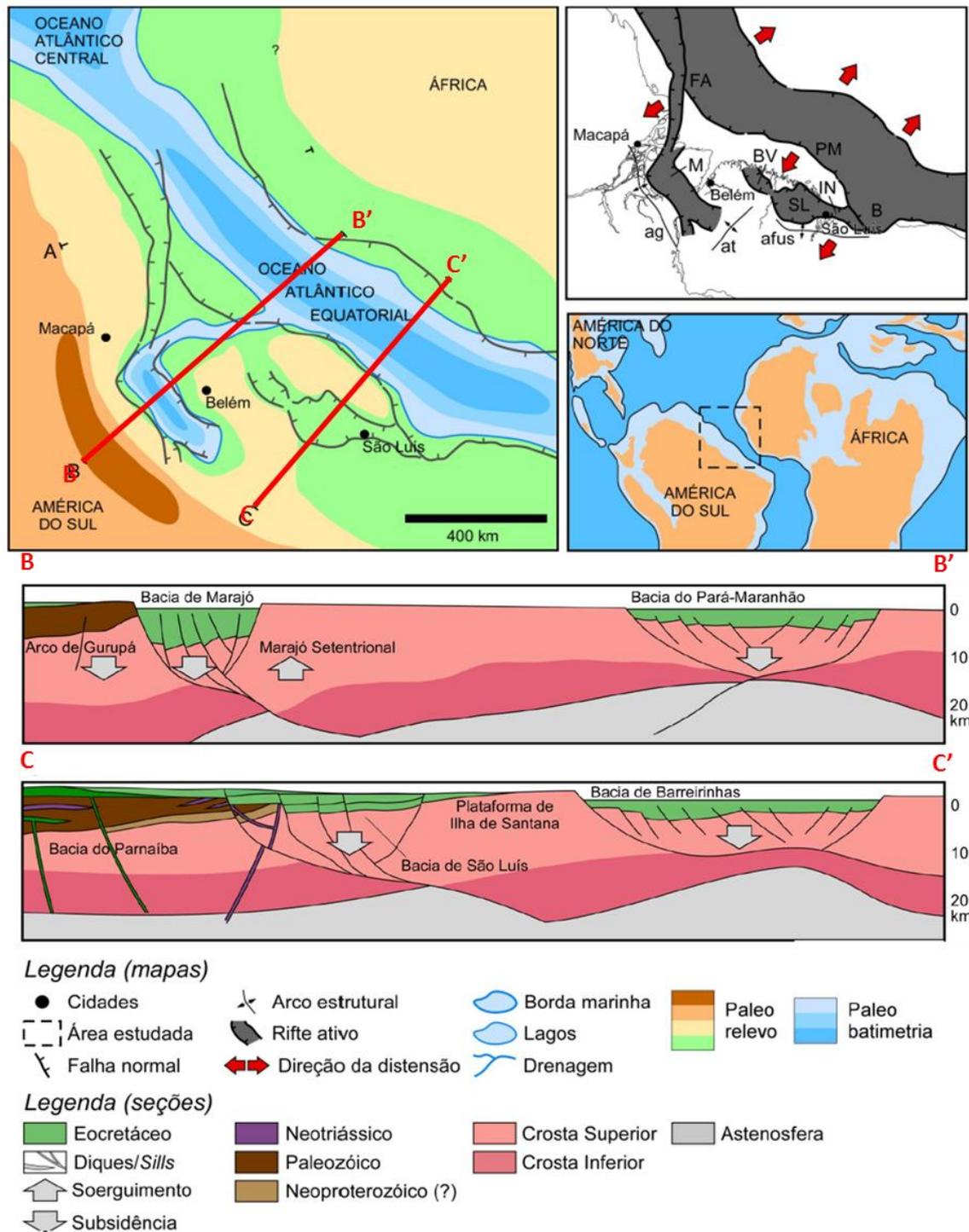


FIGURA II.5.1.2.13 – Seções geológicas esquemáticas da região adjacente à Baía de Barreirinhas no final do Albiano mostrando o desenvolvimento bacias de Pará-Maranhão e Barreirinhas. FA: Baía da Foz do Amazonas; M: Baía de Marajó; B: Baía de Barreirinhas; BV: Baía de Bragança-Viseu; SL: Baía de São Luís; IN: Baía de Ilha Nova; PM: Baía Pará-Maranhão; ag: Arco de Gurupá; afus: Arco Ferrer – Urbano Santos; at: Arco de Tocantins.

Fonte: SOARES JR. *et al.* (2011).



O breve estágio rifte que formou as bacias de Pará-Maranhão e Barreirinhas deixou pacotes de 1.800 e 3.500 metros, respectivamente, em um intervalo de aproximadamente 6 Ma. Estes espessos depósitos, em um curto intervalo de tempo, demonstram a magnitude dos eventos de rifteamento, com grabens estreitos, porém profundos. Ainda não havia um sistema de drenagem de grande porte neste período e dominava clima semiárido, com pouca influência de massas úmidas do recém formado Atlântico Equatorial; portanto, a fonte de sedimentos para as bacias eram as regiões próximas soerguidas no próprio evento de rifteamento, ou seja, as ombreiras das bacias. A ombreira da Bacia do Pará-Maranhão é a região da plataforma de Ilha de Santana, que na época era uma área emersa com importante relevo. A ombreira da Bacia de Barreirinhas era o Arco Ferrer-Urbano Santos (SOARES JR. *et al.*, 2011).

Dessa forma, o continente foi separado conforme o surgimento das bacias do Pará-Maranhão e de Barreirinhas, estando estas conectadas com a Bacia da Foz do Amazonas. Elas compunham apenas um único sistema de grabens de ambiente marinho e ligados ao Atlântico Central (SOARES JR. *et al.*, 2011).

➤ **Neocretáceo (Turoniano a Maastrichtiano)**

Conforme SOARES JR. *et al.* (2011), no Cretáceo Superior diminuiu a intensidade dos movimentos extensionais na Bacia de Marajó, os ambientes deposicionais eram caracterizados por grandes lagos rasos ou por curtas transgressões marinhas e sistemas fluviais do Arco de Gurupá e Arco de Tocantins, e interagiam com um mar raso, resultando em sistemas estuarinos e na deposição dos sedimentos das formações Itapecuru e Ipixuna na Bacia de Grajaú. O rearranjo estrutural da Sub-Bacia de Mexiana proporcionou a invasão marinha em toda a Bacia de Marajó (**Figura II.5.1.2.14**).

O período foi marcado pela parada da movimentação extensional no interior do continente Sul-Americano, cessando as fases rifte nas bacias de Marajó, Grajaú e Sistema de Grabens Gurupi. Todo o esforço extensional se concentrou no Atlântico Equatorial, nas bacias da Foz do Amazonas, Pará-Maranhão e Barreirinhas, que evoluíram para Margem Passiva (**Figura II.5.1.2.14**). Apenas os efeitos de deriva foram registrados na região Meio-Norte do Brasil. Com o início da deriva continental, começou a atuação de falhas transcorrentes de direção NE-SW em todo o conjunto de riftes na região Meio-Norte do Brasil, impondo compartimentação dos depocentros (SOARES JR. *et al.*, 2011).

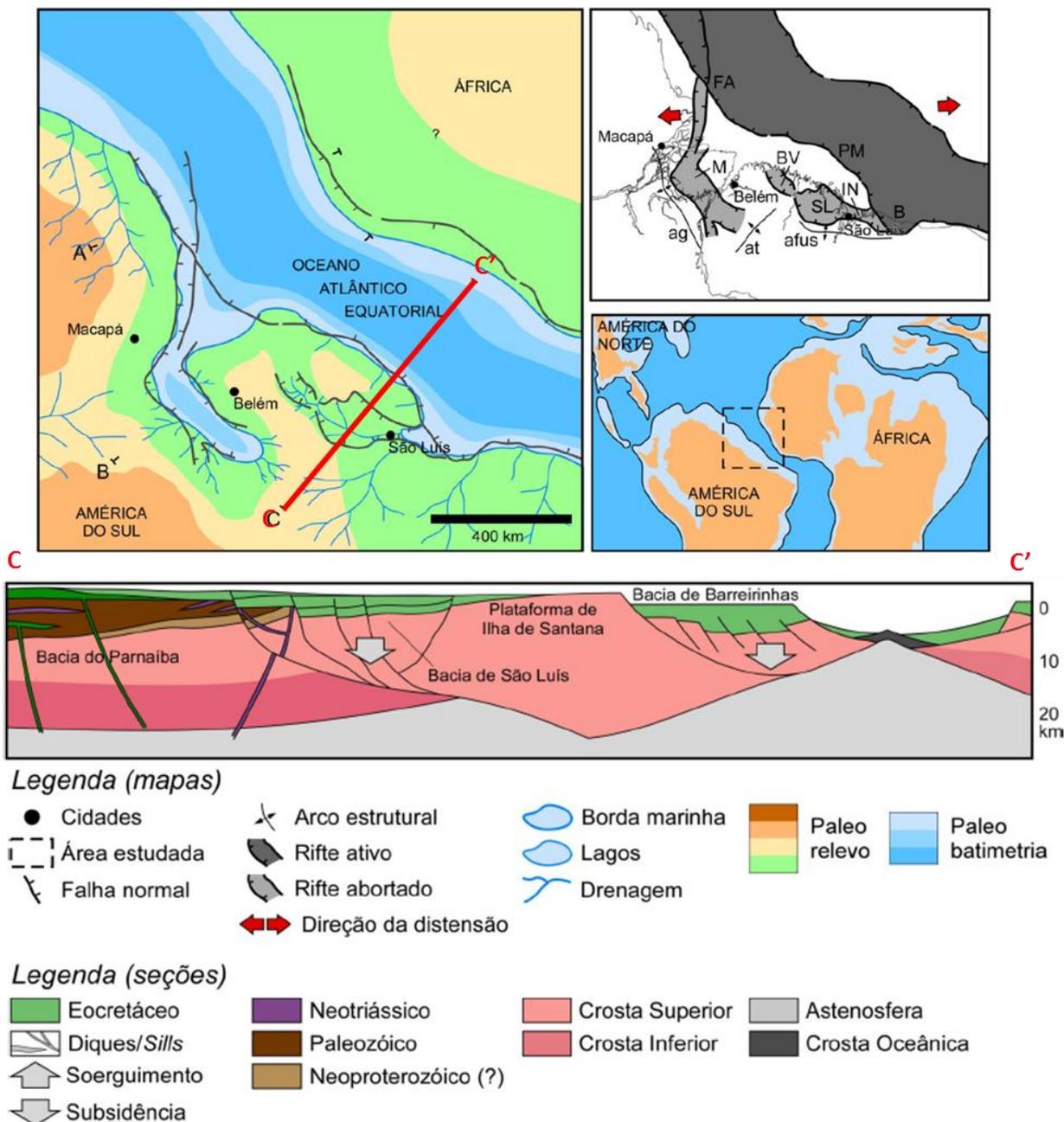


FIGURA II.5.1.2.14 – Mapa paleogeográfico do Turoniano mostrando o desenvolvimento das bacias de Pará-Maranhão e Barreirinhas como bacias de Margem Passiva – FA: Bacia da Foz do Amazonas; M: Bacia de Marajó; B: Bacia de Barreirinhas; BV: Bacia de Bragança-Viseu; SL: Bacia de São Luís; IN: Bacia de Ilha Nova; PM: Bacia Pará-Maranhão; ag: Arco de Gurupá; afus: Arco Ferrer – Urbano Santos; at: Arco de Tocantins.

Fonte: SOARES JR. *et al.* (2011).

➤ **Limite entre o Mesozóico e o Cenozoico**

No limite entre o Mesozóico e o Cenozoico, as regiões dos arcos de Gurupá e Tocantins foram submetidas a movimentos subsidentes (SOARES JR. *et al.*, 2011). No Arco de Tocantins, a subsidência foi responsável pela ligação entre os mares interiores presentes nas bacias de Marajó e Grajaú, com a deposição da Formação Ipixuna, definida por FRANCISCO *et al.* (1971) *apud* SOARES JR. *et al.* (2011), considerada de idade entre o Neocretáceo e o Paleógeno, por JUPIASSU (1970), FRANCISCO *et al.* (1971) e BORGES *et al.* (1997) *apud* SOARES JR. *et al.* (2011), em relações estratigráficas discordantes da Formação Itapecuru, sotoposta e formações Pirabas e Barreiras, sobrepostas. A paisagem era marcada por um mar interior, o “Mar Ipixuna”, para onde fluíam drenagens do Marajó Setentrional, Plataforma de Ilha de Santana e do Arco de Gurupá. A entrada deste mar ocorreu pela Bacia de Marajó e pela região onde atualmente está a Cidade de São Luís, por falhas transcorrentes de direção NESW, e alcançou a Bacia de Grajaú pelos arcos de Tocantins e Ferrer-Urbano Santos, já sem expressão no relevo da região. As regiões Marajó Setentrional e Plataforma de Ilha de Santana ficaram isoladas entre o “Mar Ipixuna” e o Oceano Atlântico Equatorial (**Figura II.5.1.2.15**).

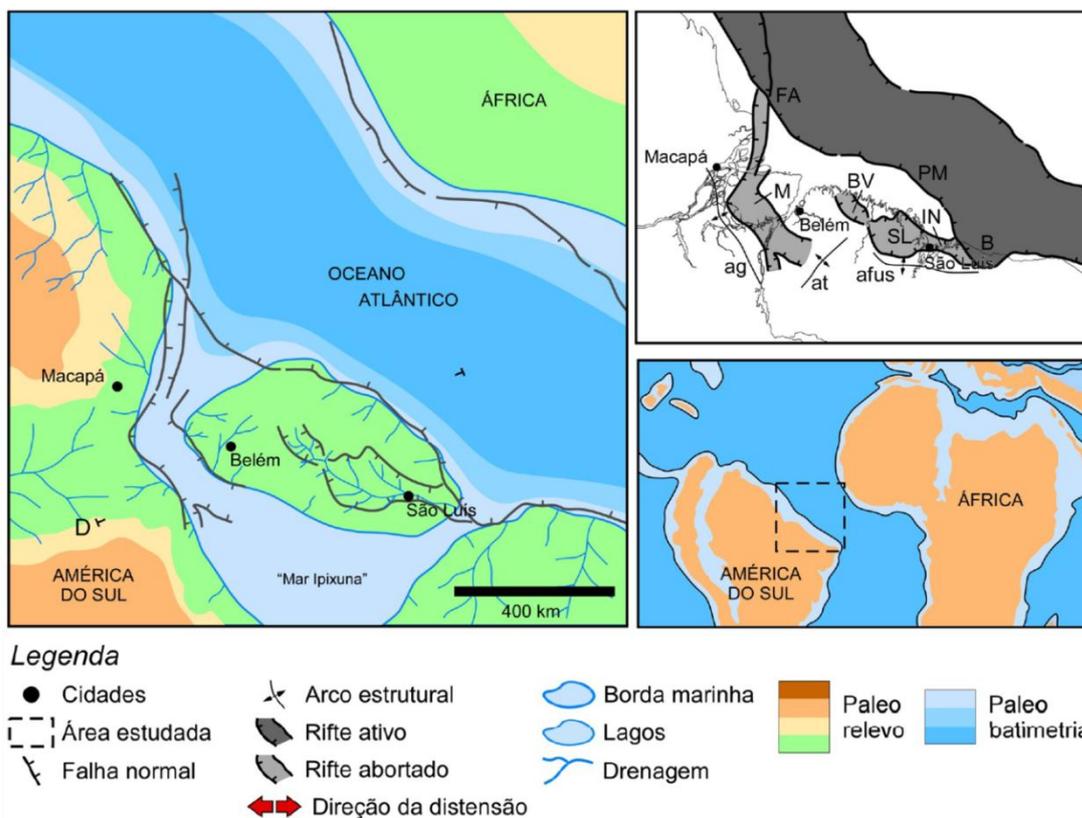


FIGURA II.5.1.2.15 – Mapa paleogeográfico da passagem do Cretáceo para o Paleoceno na região das bacias de Pará-Maranhão e Barreirinhas – FA: Bacia da Foz do Amazonas; M: Bacia de Marajó; B: Bacia de Barreirinhas; BV: Bacia de Bragança-Viseu; SL: Bacia de São Luís; IN: Bacia de Ilha Nova; PM: Bacia Pará-Maranhão; ag: Arco de Gurupá; afus: Arco Ferrer – Urbano Santos; at: Arco de Tocantins.

Fonte: SOARES JR. *et al.* (2011).



➤ **Cenozoico – Eoceno**

Durante o Eoceno ocorreu outro evento de transgressão marinha na Bacia de Marajó, que alcançou a porção noroeste da Sub-Bacia de Cametá. Nesse período sedimentos cobriram parcialmente os arcos de Gurupá e Tocantins e o Marajó Setentrional, ultrapassando os limites da bacia, já praticamente assoreada. Esta era a única área desta região onde ainda ocorria deposição de sedimentos, no início do Cenozoico. As outras regiões experimentavam erosão, vinculada a sistemas de drenagens. Na região do Sistema de Grabens Gurupi e na Bacia de Grajaú, estes sistemas tinham direção NE-SW e N-S e desaguavam diretamente no Oceano Atlântico, que se expandia expressivamente (SOARES JR. *et al.*, 2011).

➤ **Cenozoico – Oligoceno**

O intervalo Eoceno-Oligoceno marcou a fase mais intensa de colisão entre as placas Sul-Americana e Nazca, resultando na ascensão gradual da Cordilheira dos Andes, podendo ter promovido distintas etapas na reorganização dos cursos fluviais, uniformizando os sistemas de drenagem do Paleo-Amazonas e Paleo-Solimões, que passaram a se dirigir para ENE, no sentido do Oceano Atlântico, modelando o relevo e servindo como fonte de sedimentos para a Bacia de Marajó. O Oceano Atlântico já apresentava uma configuração muito próxima da atual (SOARES JR. *et al.*, 2011).

➤ **Cenozoico – Mioceno**

A partir do Mioceno, com o final da interação das placas da América do Sul e África, incidiu, na região, o regime de tectônica intraplaca, marcado por sistemas transcorrentes dextrais E-W. Estes sistemas respondem pelos dois pulsos de inversão (transpressão e transtensão) da Bacia de Grajaú. No pulso transpressivo formaram-se dobras e cavalgamentos, que resultaram na inversão do relevo com o soerguimento da região e a formação da Serra do Tiracambu e; falhas normais planares que limitam Grabens e semi-Grabens orientados na direção NW-SE e preenchidos por depósitos de fluxo de detritos cronocorrelatos à Sequência Pirabas-Barreiras, do Mioceno-Plioceno. Ao mesmo tempo em que a Serra do Tiracambu estava sendo ampliada, a noroeste, estavam se formando falhas normais, de direção NWSE, na região do Arco de Gurupá, Bacia de Marajó e Marajó Setentrional, o que promoveu a ingressão do “Mar de Pirabas” na região. Estas falhas articularam-se através de falhas transcorrentes NE-SW, da Bacia de Marajó e que compartimentaram o Marajó Setentrional. A Serra do Tiracambu e o Arco de Gurupá, nesse período, funcionaram como anteparos à transgressão do “Mar de Pirabas” e como áreas-fonte de sedimentos (**Figura II.5.1.2.16**) (SOARES JR. *et al.*, 2011).

O Marajó Setentrional deixou de ser área fonte de sedimentos a partir do Mioceno, quando toda esta região, entre as zonas transcorrentes Arari e o Arco de Tocantins e a Plataforma do Pará/Ilha de Santana foi abatida, ficando submersa pelo “Mar de Pirabas” e Oceano Atlântico. Nessa época, sistemas fluviais importantes, como o Paleo-Amazonas e Paleo-Tocantins interagem com o “Mar de Pirabas”, desaguando diretamente em um mar raso e aberto, com conexão com o Oceano Atlântico. Este evento é caracterizado pelo avanço do mar, com extensão de 150 km, a partir da atual linha de costa, dentro do continente, na região nordeste do Pará, resultando em consideráveis mudanças na paisagem litorânea. Ainda a partir da tectônica atuante no Mioceno, ocorreu a captura do baixo curso dos rios Tocantins e Araguaia, vinculados

ao feixe transcorrente E-W. Nessa época, o litoral já era caracterizado por rias e apresentava-se mais a sul da linha de Costa atual, dominada por elementos orientados na direção NE-SW (SOARES JR. *et al.*, 2011).

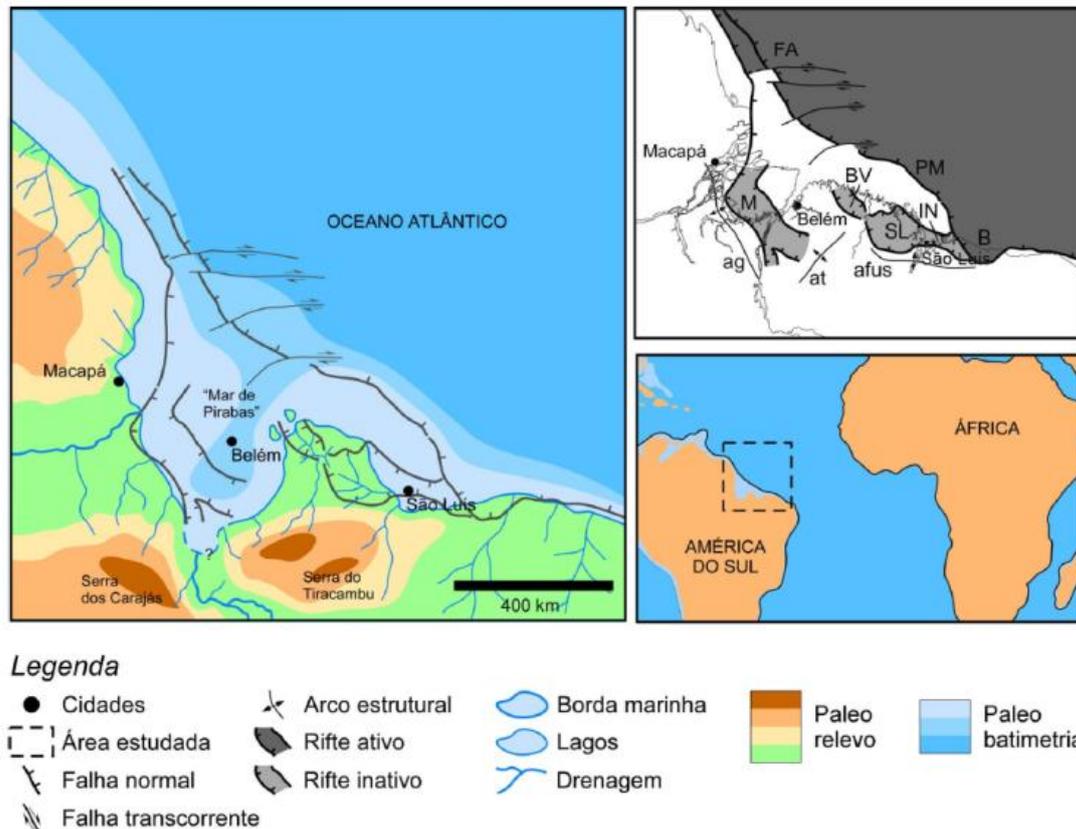
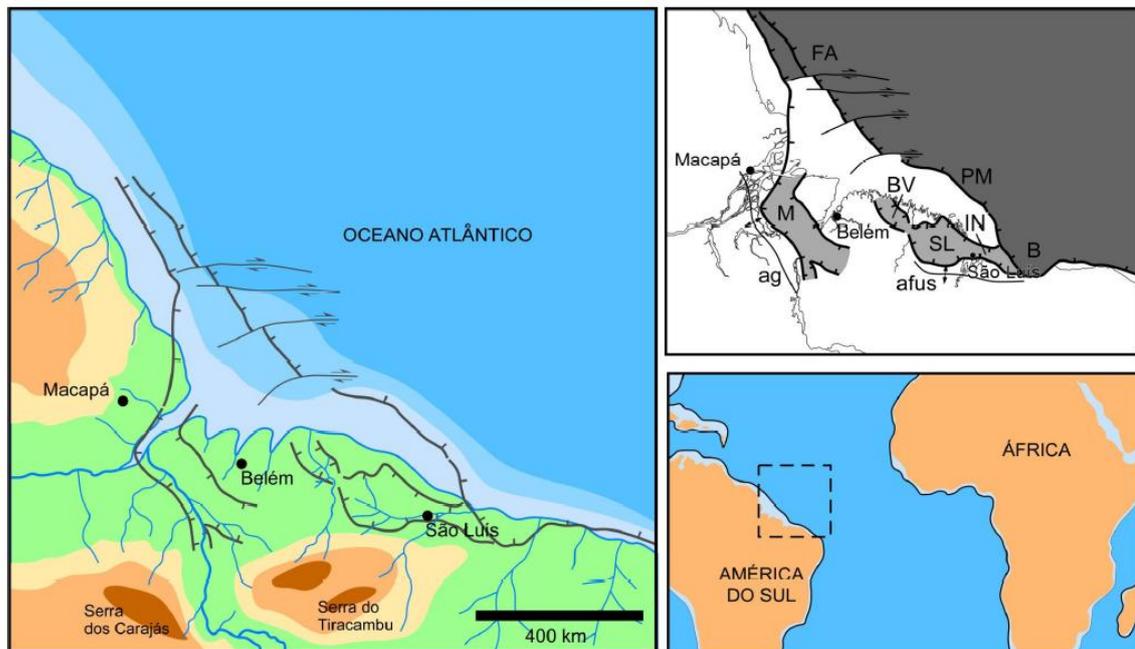


FIGURA II.5.1.2.16 – Mapa paleogeográfico do Mioceno na região das bacias do Marajó, de Pará-Maranhão e Barreirinhas – FA: Bacia da Foz do Amazonas; M: Bacia de Marajó; B: Bacia de Barreirinhas; BV: Bacia de Bragança-Viseu; SL: Bacia de São Luís; IN: Bacia de Ilha Nova; PM: Bacia do Pará-Maranhão; ag: Arco de Gurupá; afus: Arco Ferrer – Urbano Santos; at: Arco de Tocantins.

Fonte: SOARES JR. *et al.* (2011).

➤ Cenozoico – Plioceno

Com o soergimento dos Andes e o rearranjo das drenagens do Paleo-Amazonas este rio passa a correr juntos para leste. Os rios Tocantins e Araguaia, encaixados nas falhas normais da Bacia de Marajó, corriam na direção NE-SE, e desaguavam no Rio Amazonas. Este conjunto de rios de grande porte desaguava diretamente no “Mar de Pirabas” e foi responsável pela deposição dos clásticos transicionais do Grupo Barreiras, e resultou no gradual regressão deste mar e posterior assoreamento. No extremo NW do Estado do Maranhão, houve a geração de falhas normais de direção NW-SE e inclinadas para NE, que limitam um depocentro preenchido por sedimentos do Grupo Barreiras e falhas transcorrentes de direção NE-SW que controlam as rias da região. Nessa época, o litoral já era caracterizado por rias e apresentava-se mais a sul da linha de Costa atual, dominada por elementos orientados na direção NE-SW (**Figura II.5.1.2.17**) (SOARES JR. *et al.*, 2011).



Legenda

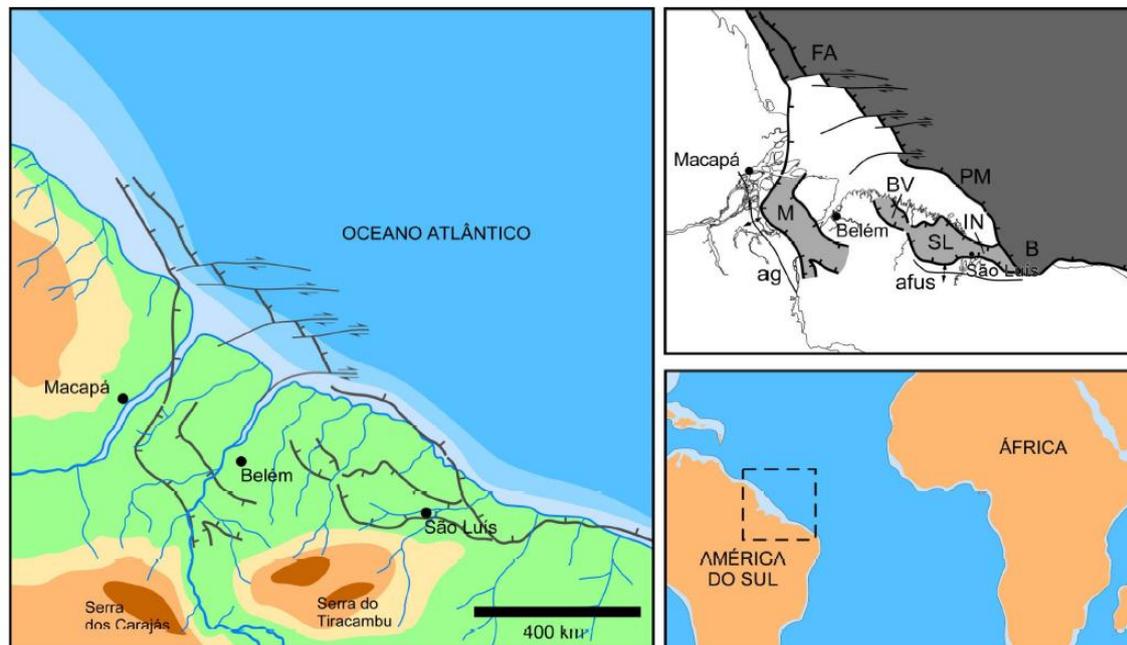
● Cidades	↘ Arco estrutural	○ Borda marinha	■ Paleorelevo	■ Paleobatimetria
□ Área estudada	▬ Rifte ativo	○ Lagos		
↘ Falha normal	▬ Rifte inativo	→ Drenagem		
↘ Falha transcorrente				

FIGURA II.5.1.2.17 – Mapa paleogeográfico do Plioceno na região das bacias do Marajó, de Pará-Maranhão e Barreirinhas – FA: Bacia da Foz do Amazonas; M: Bacia de Marajó; B: Bacia de Barreirinhas; BV: Bacia de Bragança-Viseu; SL: Bacia de São Luís; IN: Bacia de Ilha Nova; PM: Bacia do Pará-Maranhão; ag: Arco de Gurupá; afus: Arco Ferrer – Urbano Santos; at: Arco de Tocantins.

Fonte: SOARES JR. *et al.* (2011).

➤ **Pleistoceno/Holoceno**

No Pleistoceno/Holoceno, o pulso transtensivo formou uma segunda geração de falhas normais N-S impondo desnivelamentos nos depósitos do Paleógeno, sendo responsável pelo modelamento da paisagem atual na região. Este evento tectônico foi responsável pelo basculamento de blocos, na região Marajó Setentrional, resultando na migração de canais em direção à região sudoeste da Ilha de Marajó, onde dominava um sistema de drenagem anastomosado. Nas áreas da Bacia de Marajó houve movimentação nas falhas transcorrentes gerando a captura do baixo curso do Rio Tocantins, que desaguava no Rio Amazonas e passou a desaguar diretamente no Oceano Atlântico. A captura promoveu a formação da baía de Marajó e o início da individualização da Ilha de Marajó. Estes são exemplos da última manifestação tectônica na região e estão intimamente ligados à reativação de falhas transcorrentes que operaram no Neógeno (**Figura II.5.1.2.18**) (SOARES JR. *et al.*, 2011).



Legenda

- | | | | | |
|-----------------------|-------------------|-----------------|----------------|--------------------|
| ● Cidades | ↘ Arco estrutural | ○ Borda marinha | ■ Paleo relevo | ■ Paleo batimetria |
| □ Área estudada | ▬ Rifte ativo | ○ Lagos | | |
| ↘ Falha normal | ▬ Rifte inativo | ~ Drenagem | | |
| ↘ Falha transcorrente | | | | |

FIGURA II.5.1.2.18 – Mapa paleogeográfico do Pleistoceno na região das bacias do Marajó, de Pará-Maranhão e Barreirinhas – FA: Bacia da Foz do Amazonas; M: Bacia de Marajó; B: Bacia de Barreirinhas; BV: Bacia de Bragança-Viseu; SL: Bacia de São Luís; IN: Bacia de Ilha Nova; PM: Bacia do Pará-Maranhão; ag: Arco de Gurupá; afus: Arco Ferrer – Urbano Santos; at: Arco de Tocantins.

Fonte: SOARES JR. *et al.* (2011).

A formação do quadro ambiental atual do litoral das regiões nordeste do Estado do Pará e noroeste do Estado do Maranhão vincula-se ao final do Pleistoceno. Nesse período, houve quiescência dos movimentos tectônicos e o desenvolvimento do perfil laterítico imaturo na região, principalmente sobre as rochas sedimentares do Grupo Barreiras. Os principais rios da região, como Amazonas e Tocantins formaram extensos vales na plataforma continental, depositando sedimentos diretamente no talude, erodindo os sedimentos depositados no Terciário Superior na Plataforma continental. A subida contínua do nível do mar durante o Holoceno provocou o afogamento de parte das planícies costeiras e a modelagem de falésias em depósitos do Grupo Barreiras, que sustenta o planalto costeiro. Esta subida do nível do mar afogou a rede de drenagem, que foi progressivamente colmatada, evoluindo para uma sucessão de preenchimentos de paleoestuários, além de esculpir as falésias de um metro de altura, fossilizadas no contato do planalto com a planície costeira, representativas da linha de Costa deste período. A partir deste afogamento de drenagens, ocorreu a individualização da Ilha de Marajó, com a formação do Rio Pará e definição dos limites sul e sudoeste dessa ilha. Este representou a última modificação importante da paisagem na região (**Figura II.5.1.2.19**) (SOARES JR. *et al.*, 2011).

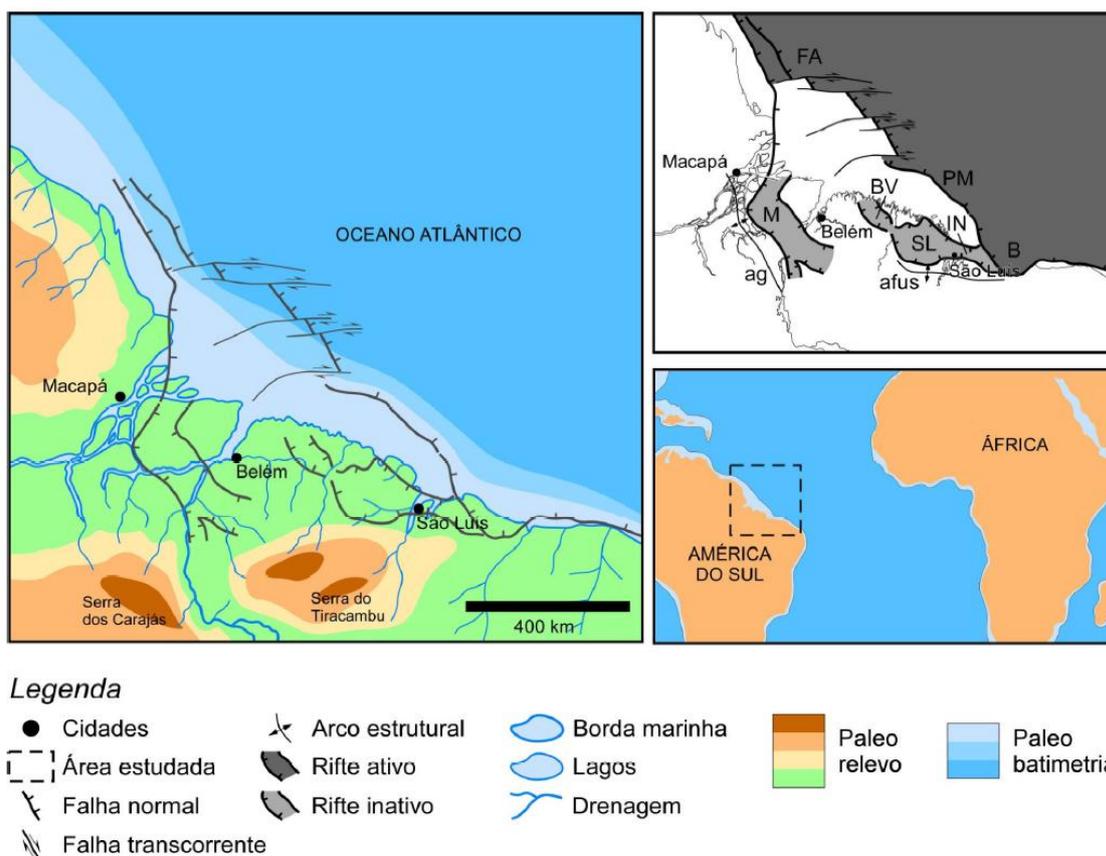


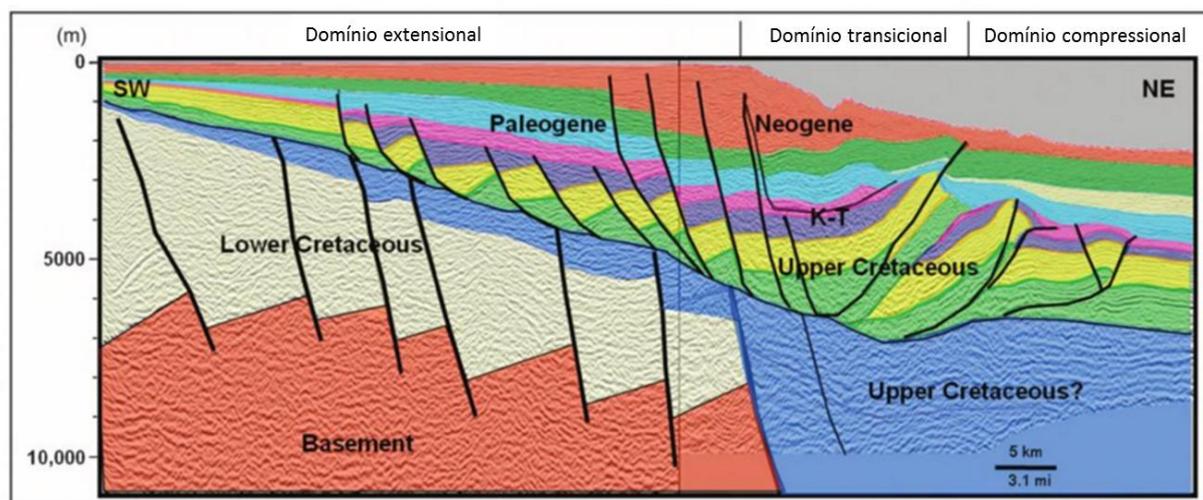
FIGURA II.5.1.2.19 – Mapa paleogeográfico do Holoceno na região das bacias do Marajó, de Pará-Maranhão e Barreirinhas – FA: Bacia da Foz do Amazonas; M: Bacia de Marajó; B: Bacia de Barreirinhas; BV: Bacia de Bragança-Viseu; SL: Bacia de São Luís; IN: Bacia de Ilha Nova; PM: Bacia do Pará-Maranhão; ag: Arco de Gurupá; afus: Arco Ferrer – Urbano Santos; at: Arco de Tocantins.

Fonte: SOARES JR. *et al.* (2011).

II.5.1.2.2.4. Estratigrafia de Sequências

Na Bacia de Barreirinhas, são reconhecidas três megassequências sedimentares, a pré-rifte, sin-rifte e pós-rifte (MOHRIAK, 2003). A primeira fase - pré-rifte - abrange rochas sedimentares e ígneas da bacia de Parnaíba (subjacente) de idade Paleozoica e sedimentos neojurássicos e eocretáceos, além de rochas ígneas da formação Sardinha (Neocomiano). A megassequência seguinte – sin-rifte - ocorreu no cretáceo e se configura como iniciada a uma tectônica extensional com o auge durante o Aptiano, representado por sedimentos clásticos referentes a um ambiente flúvio-deltaico (Grupo Canárias).

A Megassequência Pós-Rifte (marinha) pode ser subdividida em dois intervalos, sendo o Grupo Caju (clásticos e carbonatos de alta e baixa energia), além do Grupo Humberto de Campos, representado por sedimentos depositados e um ambiente progradante nerítico e batial sendo coberto por carbonatos de alta energia da Formação Pirabas (Mioceno-Recente) (MOHRIAK, 2003). Esses sedimentos, por sua vez, são recobertos por clásticos da Formação Barreiras durante o Plio-Pleistoceno (MOHRIAK, 2003). Uma seção esquemática da Bacia de Barreirinhas é apresentada na **Figura II.5.1.2.20**, evidenciando um cinturão de dobramentos na região além do talude, associado a tectônica gravitacional.



LEGENDA

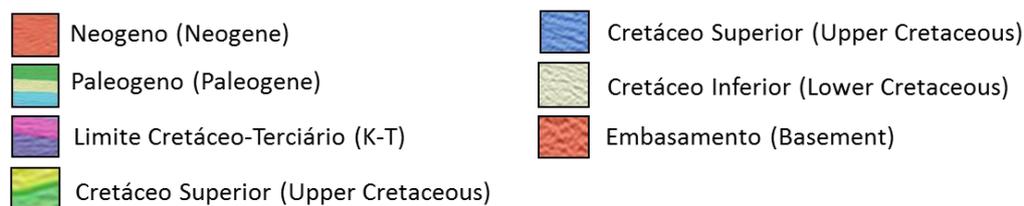


FIGURA II.5.1.2.20 – Seção sísmica geológica da Bacia de Barreirinhas em águas profundas, indicando as principais idades de sedimentação e domínios.

Fonte: OLIVEIRA *et al.* (2012).

O mapa estrutural II.5.1.2.1 é apresentado no ANEXO A ao final deste item.

De acordo com FEIJÓ (1994), que realizou a análise de informações provenientes de 121 poços (sendo 97 em terra) e a interpretação de 46.000 km de seções sísmicas, a Bacia de Barreirinhas é composta pelos seguintes grupos e formações geológicas:

- Grupo Canárias: é composto por arenito lítico cinza-claro, fino a grosso, imaturo, siltito cinza a castanho avermelhado e folhelho cinza-médio a esverdeado. Este grupo é composto por folhelhos escuros da Formação Arpoador, arenitos grossos cinzentos da Formação Bom Gosto, folhelhos escuros da Formação Tutóia e arenitos médios cinzentos da Formação Barro Duro. Essas características foram originadas em um ambiente de leque deltaico marinho, com idade mesoalbiana.
- Grupo Caju: Esse grupo foi depositado em um ambiente nerítico de alta e baixa energia de idade neoalbiana. É composto por calcarenitos bioclásticos e oncolíticos da Formação Bonfim; calcilitos creme da Formação Preguiças; e folhelhos cinzentos com calcarenito creme subordinado da Formação Peria. Estes últimos estão sotopostos e associados aos carbonatos das Formações Bonfim e Preguiças.



- Grupo Humberto de Campos: destacado do Grupo Caju, este grupo é composto por clásticos grossos da Formação Areinhas, carbonatos de alta energia da Formação Ilha de Santana e folhelhos escuros e arenitos finos intercalados da Formação Travossas. Estes por sua vez estão sotopostos e lateralmente situados aos carbonatos da Formação Ilha de Santana. Esta unidade foi depositada em um ambiente marinho profundo, batial e abissal. As idades variam do Turoniano ao Oligoceno (REGALI *et al.*, 1985).

Ainda segundo Feijó (1994), dentro da Bacia de Barreirinhas é possível identificar dois grandes conjuntos de sequências, sendo um pré-aptiano que abriga rochas sedimentares e ígneas da subjacente Bacia do Parnaíba, e um mesocenosóico. O primeiro conjunto está localizado na borda norte, sendo que este foi ativo descontinuamente entre os períodos Ordoviciano e Neocomiano. O segundo abriga rochas das fases rifte e de margem passiva. Entretanto, a tafrogenia cretácea teve início e finalização tardiamente em relação as demais bacias da margem continental, sendo o rifte preenchido por um ambiente marinho no Albiano.

FEIJÓ (1994) definiu a estratigrafia de sequências da Bacia de Barreirinhas como sendo divididas em Sequência pré-Aptiana, Sequência Rifte e Sequência da Margem Passiva. Entretanto, TROSDTORF JR *et al.* (2007) realizaram uma atualização dos conhecimentos a respeito da estratigrafia da bacia, estudando suas sequências deposicionais com base em diversos trabalhos contratados pela PETROBRAS e em bibliografia disponível. Além disso, também foram reinterpretadas informações de poços existentes e linhas sísmicas disponíveis para a bacia, aplicando-se novos conceitos sobre estratigrafia de sequências.

Embora a tentativa de atualização dos conhecimentos referentes à sedimentação na Bacia de Barreirinhas, estes autores mantiveram a nomenclatura proposta pelo trabalho de FEIJÓ (1994). As sequências e descrições apresentadas a seguir estão relacionadas à carta Estratigráfica Formal da Bacia de Barreirinhas, apresentada na **Figura II.5.1.2.22** e no **ANEXO B**.

Desta forma, estes autores descrevem a estratigrafia de sequências da Bacia de Barreirinhas (**Figura II.5.1.2.22**) como sendo divididos em: Embasamento, Supersequência Intracratônica, Supersequência Rifte e Supersequência Drifte, descritas a seguir:

- Embasamento: é composto por três grandes elementos, sendo eles o Cráton de São Luís (parte arqueana), a Faixa Gurupi (do Neoproterozóico) e a Província Borborema. A gênese da bacia está ligada a Zona de Fratura de Romanche, que por sua vez nucleou-se entre a porção arqueana do Cráton de São Luiz e a Faixa Gurupi. Já o Alto de Tutóia se desenvolveu acima do contato entre a Faixa Gurupi e a Província Borborema. Ao sul da zona de fratura, ocorrem deformações e fraturas transpressionais ocorridas no Cenomaniano, diminuindo gradativamente conforme se aproxima da borda falhada sul, nas proximidades da plataforma de Sobradinho. Ao norte da Zona de Fratura de Romanche, a bacia de Barreirinhas assume uma forma típica de bacia de margem passiva, com transição quase imperceptível para a Bacia do Pará-Maranhão.



- Supersequência Intracratônica: é composta por uma camada espessa de refletores plano-paralelos que pode ser interpretada nas seções sísmicas que cortam a bacia nas áreas emersas ou imersas. Estas camadas são classificadas como de idade devoniana, obtidos a partir de poços perfurados e de dados obtidos em sua bacia conjugada na margem continental africana (Gana). Nesta bacia conjugada, os arenitos devonianos são produtores no campo de Takoradi, na África.
- Supersequência Rifte: A Supersequência Rifte foi subdividida em três sequências, apresentadas a seguir.
 - A sequência K40: agrega os arenitos e folhelhos de idade aptiana, ocorrendo apenas na parte marítima da Bacia de Barreirinhas. Estudos sísmicos evidenciaram alguns depocentros pouco desenvolvidos controlados por falhas de bordas com sentido NW-SE e W-E e blocos baixos a NE e N. Esta sequência, entretanto, ainda aparece sem uma denominação formal por conta de poucas informações de poços na porção marítima.
 - Sequência K50: ou Formação Codó, agrega calcilitos e folhelhos lagunares, com espessura relativamente constante, de acordo com a assinatura sísmica. Evidências sismoestratigráficas e a localização desta sequência indicam que a mesma se formou em um ambiente de bacia tipo *sag* inter-riftes. Desta forma, os autores entenderam que deveriam classificar este depósito como sendo do tipo *sag* pré-rifte.
 - Sequência K60: é composta por sedimentos siliciclásticos continentais a parálicos (Sul da Bacia de Barreirinhas) alternando para carbonatos, folhelhos e arenitos marinhos nas regiões centrais e distais desta bacia. Em termos litoestratigráficos, esta sequência corresponde aos grupos Caju e Canárias. Dessa forma, o grupo Caju é composto por calcarenitos bioclásticos e oncolíticos pertencentes à Formação Bomfim e calcilito creme da Formação Preguiças. O Grupo Canárias é composto por folhelhos cinza-escuros da Formação Tutóia e arenitos médios cinzentos da Formação Barro Duro. O grupo Caju foi depositado em um ambiente nerítico de alta e baixa energia, e o Grupo Canárias em um ambiente deltaico marinho, como previamente descritos por FEIJÓ (1994).

Entretanto, para esta sequência, TROSDTORF JR *et al* (2007) apresenta novas informações a respeito da ocorrência de carbonatos pertencentes ao Grupo Caju, nas seções sinrifte III e na seção drifte, anteriormente os carbonatos estavam associados apenas a seção drifte.
- Supersequência Drifte: esta fase é composta por três principais estágios de evolução, ocorrendo a partir do Neo-Albiano. A primeira com sedimentação predominantemente carbonática, o segundo com sedimentação siliciclástica em bacia de margem passiva e o terceiro com uma nova sedimentação carbonática associada à transgressão do mar de Pirabas durante o Mioceno. TROSDTORF JR *et al* (2007) realizaram uma identificação de segunda ordem com base em interpretações bioestratigráficas utilizando a técnica de correlação gráfica, cruzando com dados sísmicos. Como resultado, identificaram 12 sequências, descritas a seguir:



- Sequência K70: é o início da seção drifte, tendo seu limite inferior na discordância do *break-up*, ocorrido a aproximadamente 102 Ma, e o superior pela discordância que ocorre no topo do Albiano (~99,5 Ma). Esta sequência é composta por calcarenitos bioclásticos e oncolíticos (Formação Bomfim), calcilutitos, margas e folhelhos da Formação preguiças, além dos clásticos depositados em ambiente marinho raso da Formação Peria.
- Sequência K82: é composta por calcarenitos bioclásticos e oncolíticos da plataforma carbonática da Formação Bomfim.
- Sequência K84-K86: esta sequência é limitada por uma discordância na porção intermediária do Turoniano, com correlação a uma importante variação eustática do nível do mar. Foi possível identificar o afogamento da plataforma carbonática da Formação Bomfim e o estabelecimento de uma plataforma siliciclástica ao final desta sequência. A partir desse momento estabelece-se uma subsidência predominantemente termal para a plataforma.
- Sequência K88-K90: é limitada ao topo pela discordância que ocorre na porção intermediária do Campaniano, a aproximadamente 79,5 Ma. Existem indícios de correlação desta discordância com a curva eustática global, no qual neste período encontrava-se em um evento regressivo. É caracterizado pelo desenvolvimento deltaico da Formação Areinhas, na área de plataforma, além de uma sedimentação carbonática incipiente. A margem equatorial possui duas discordâncias principais, uma no *break-up* e outra no Campaniano Médio. A discordância do Campaniano Médio marca a mudança de um ambiente retrogradacional para um progradacional.
- Sequência K100-K120: possui uma duração de 9,5 Ma, tendo o seu topo marcado pela discordância a 70 Ma, que não possui correlação com rebaixamento do nível do mar. Todavia, evidências indicam que nesse período ocorreu um soerguimento da Margem Equatorial nas áreas continentais, podendo este evento tectônico estar relacionado com a discordância. Dessa forma, por conta desta discordância do Maastrichtiano, ocorre um expressivo hiato deposicional, o que restringe esta sequência as regiões mais distais da Bacia de Barreirinhas.
- Sequência K130-E20: possui uma duração de cerca de 11,5 Ma, sendo o limite superior marcado por uma nova discordância com uma boa correlação com a curva de eustasia global, sendo relacionada a um período regressivo. Evidências indicam que neste período ocorreu uma plataforma carbonática incipiente, sendo colmatada pelo avanço das frentes deltaicas da Formação Areinhas. Adicionalmente, as porções profundas da bacia já se encontravam sobre a área de crosta oceânica, tendo início a um processo de tectônica gravitacional responsável por amplas frentes de empurrão. A alteração da fisiografia do fundo marinho resultou na formação de altos e baixos estruturais a montante das frentes de empurrão, se tornando em regiões preferenciais para a captação de sedimentos durante esta sequência.

- Sequência E30-E50: teve duração aproximada de 17 Ma, se desenvolvendo entre as discordâncias do Paleoceno e do Eoceno Médio. Neste período ocorreu a deposição de uma plataforma mista (carbonática e siliciclástica) sendo representado pelos arenitos deltaicos da Formação Areinhas e carbonatos da Formação Ilha de Santana. Além disso, a ação gravitacional prossegue atuando, formando grandes falhas lítricas na área do talude e plataforma, além de falhas reversas na porção distal. Esta sequência também não ocorre na porção emersa da bacia, devido a diversos eventos erosivos do Eoceno Médio, ocorridos durante o Lutênio. Ocorre a presença dos carbonatos da Formação Ilha de Santana. Existem evidências sísmicas da ocorrência de um magmatismo básico no Eoceno Médio, mas estes não podem ser comprovados com certeza por conta da ausência de amostras com datação radiométrica.
- Sequência E60-E70: ocorreu entre as discordâncias do Eoceno Médio e do Oligoceno Inferior. Esta sequência mantém o caráter regressivo, em um ambiente de plataforma mista (carbonatos e siliciclásticos). Existem evidências de reativação de lineamentos que provocaram movimentos verticais de blocos falhados na Bacia de Barreirinhas, colocando rochas em estágio diagenético avançado, próximas a superfície. A discordância do Oligoceno foi importante para a sedimentação da bacia, que passou de um contexto marinho regressivo para um período marinho transgressivo que se fez presente em toda a Margem Equatorial.

Sequência E80-N10: encontra-se entre as discordâncias do Oligoceno e do Mioceno Inferior, com idade de ~12 Ma. Durante a sua deposição ocorreu um grande evento transgressivo em toda a margem equatorial, associado ao mar de Pirabas, com a formação de uma extensa plataforma carbonática da Formação Pirabas, que recobre de forma discordante rochas do Grupo Humberto Campos.

- Sequência N20-N30: no topo esta sequência é marcada pela discordância do Mioceno Superior, sendo bem demarcada na Margem Equatorial. Durante esta sequência ocorreu um novo afogamento e avanço da plataforma carbonática da Formação Pirabas.
- Sequência N40-N50: é marcada pelo rápido avanço da plataforma carbonática referente a Formação Pirabas, que se estende para fora dos limites da bacia. Além disso, também é marcada pela progradação dos sistemas deposicionais costeiros representando pela Formação Barreiras.
- Sequência N60: é composta por sedimentos arenosos e argilosos que foram depositados em cordões litorâneos e pelo extravasamento do sistema de drenagem. Na parte *offshore*, esta sequência é composta por argilitos e sedimentos argilosos inconsolidados que compõem o fundo oceânico.

Abaixo é apresentada uma seção geológica esquemática evidenciando as principais formações presentes na Bacia de Barreirinhas (**Figura II.5.1.2.21**).

LITOLOGIAS



FIGURA II.5.1.2.23 – Legenda explicativa das litologias apresentadas nas cartas estratigráficas brasileiras.

Fonte: MILANI *et al.* (2007).

II.5.1.2.2.5. Geologia do Petróleo

O sistema petrolífero da Bacia de Barreirinhas possui um complexo mosaico estrutural e estratigráfico que possibilita a formação de diversas prováveis acumulações de hidrocarbonetos. As rochas geradoras estão localizadas na Formação Codó (Aptiano), Formação Preguiças (Cenomaniano) e Formação Travosas (Turoniano). Os valores de Carbono Orgânico total (COT) para as rochas geradoras da Formação Codó atingem entre 3% - 24%. Já a Formação Preguiças possui COT de 4% a 6%. A rocha geradora da Formação Travosas pode apresentar uma porcentagem de 29% (ANP, 2012).

Os reservatórios estão localizados no Mesoalbio, referentes à Formação Tutóia, sendo formado por arenitos, nos arenitos do Eoalbio (Formação Bom Gosto) e nos turbiditos da Formação Travosas (Terciário – Eocretáceo), conforme a **Figura II.5.1.2.24**. As rochas selantes foram identificadas como sendo folhelhos intercalados do Grupo Canárias e da Formação Travosas. A migração do óleo se dá a partir de falhas lístricas e superfícies discordantes, sendo os sistemas trapecoides classificados como estruturais, estratigráficos e mistos (ANP, 2012).

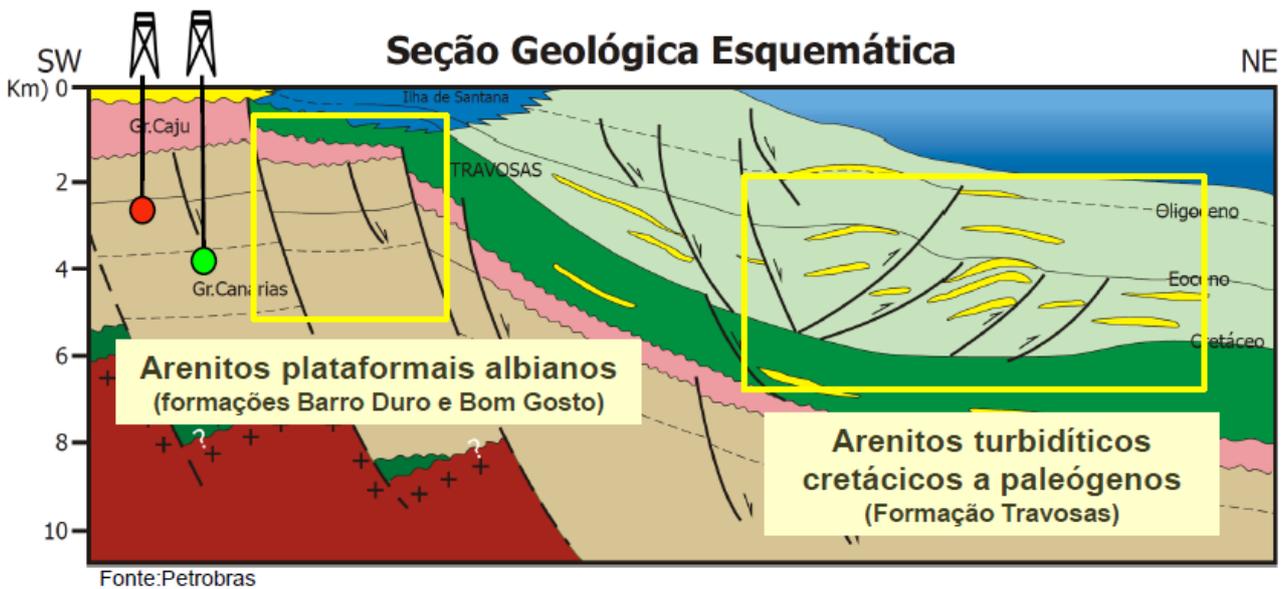


FIGURA II.5.1.2.24 – Seção esquemática da Bacia de Barreirinhas indicando as principais ocorrências constatadas de hidrocarbonetos.

Fonte: ANP (2012).

Nas seções terrestres da Bacia de Barreirinhas, ocorre a acumulação de óleo principalmente nos arenitos platformais albianos da Formação Barro Duro e Bom Gosto, já nas porções marítimas, a acumulação de hidrocarbonetos ocorre principalmente nos arenitos turbidíticos cretáceos e paleógenos da Formação Travosas. Além disso, as acumulações em terra apresentaram gás e óleo do tipo leve, com 38° a 41 °API (São João, Espigão e Oeste de Canoas) (ANP, 2012).

II.5.1.2.2.6. Sismicidade

Segundo VILAR (2008), a região nordeste do Brasil é a principal área de atividade sísmica do país, principalmente na região da borda da Bacia Potiguar, classificada como sendo atividade do tipo interplaca, consideravelmente inferiores às atividades sísmicas que ocorrem em zonas de borda de placas tectônicas. Entretanto, os sismos interplaca possuem grande importância, e embora menos frequentes, podem ser perigosos para as atividades humanas. Os sismos da região nordeste foram classificados como rasos, ocorrendo a profundidades menores do que 12 km (VILAR, 2008).

Este autor apresenta um mapa com a ocorrência de abalos sísmicos com magnitudes superiores a dois (2), para a região nordeste do Brasil (**Figura II.5.1.2.25**). As informações de magnitude e localização dos sismos que são apresentadas no mapa são referentes a uma base histórica de dois séculos, um período que vai desde 1808 até a data de publicação do trabalho (VILAR, 2008).

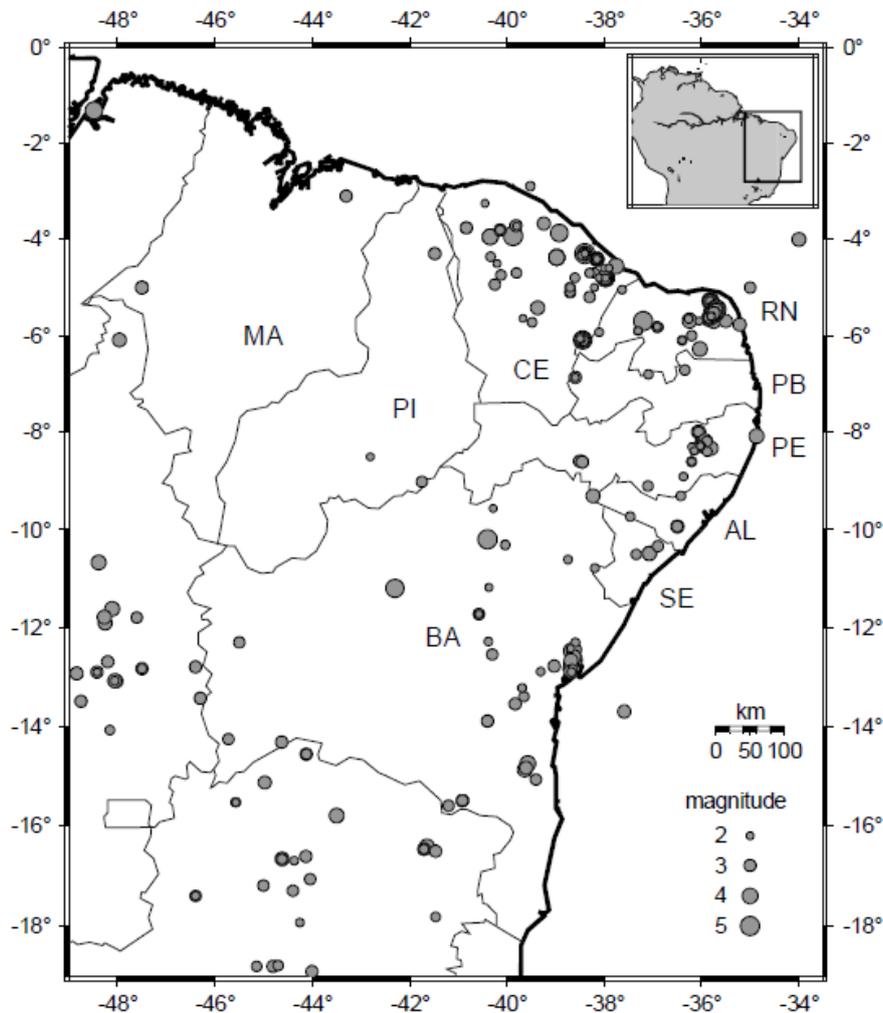


FIGURA II.5.1.2.25 – Sismicidade no nordeste brasileiro.

Fonte: VILAR (2008).

Com base em informações históricas de 280 anos (desde 1720 até 2000) obtidas no sítio eletrônico do IAG-USP (Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas) foi possível identificar as atividades sísmicas ocorridas exclusivamente no estado do Maranhão e áreas oceânicas adjacentes (Bacia de Barreirinhas) durante este período (**Figura II.5.1.2.26**). Com base nas informações disponíveis, pôde-se identificar a ocorrência de nove (9) sismos, sendo que em três (3) deles não foi possível medir a magnitude, apresentados na **Tabela II.5.1.2.1**. O registro mais antigo data de 1864 no município de São Luís (MA), já o mais recente ocorreu no município de João Lisboa (MA) em 1981. O sismo de maior magnitude ocorreu no município de Itapicuru (MA) em 1871, com magnitude de aproximadamente 3,7.

TABELA II.5.1.2.1 – Abalos sísmicos registrados no estado do Maranhão no período de 1720 a 2000.

Ano	Magnitude	Localidade
1864	3,2	São Luís (MA)
1864	-	São Luís (MA)
1871	3,7	Itapicuru (MA)
1871	-	São Luís (MA)
1905	-	São Luís (MA)
1909	3	Alcântara (MA)
1974	3,6	Maranhão (MA)
1980	3,1	Urbano Santos (MA)
1981	3,4	João Lisboa (MA)

Fonte: IAG (2013). Dados disponíveis em: <http://moho.iag.usp.br>.

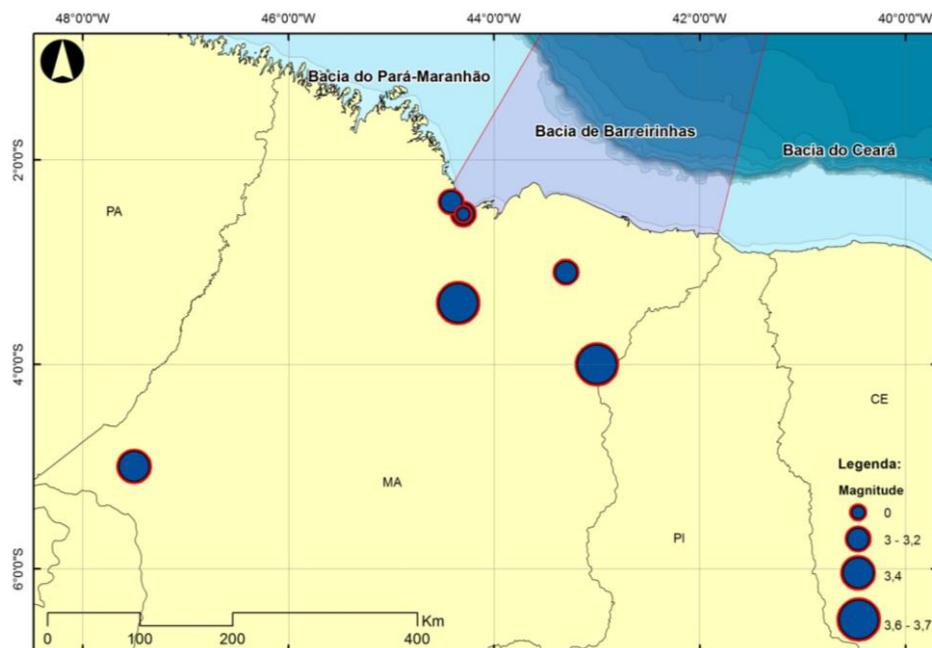


FIGURA II.5.1.2.26 – Mapa de sismicidade para o estado do Maranhão e área oceânica adjacente.

Fonte: AECOM. Dados disponíveis em: <http://moho.iag.usp.br>.



II.5.1.2.2.7. Fisiografia

- **Plataforma Continental**

A plataforma continental constitui uma planície de largura variável, de declividade suave, que se estende da face de praia até o limite com o talude continental, marcado por uma linha de brusco aumento de declividade. Ela pode ser dividida em quatro zonas: interna, média, externa e quebra de plataforma (WRIGHT, 1995). Segundo este autor, a plataforma interna é a zona mais próxima do continente, que abrange da face de praia até 30 m de profundidade. Essa região é marcada por processos hidrodinâmicos rasos, tendo a sua configuração geomorfológica e distribuição sedimentar controlada pelas ondas que incidem sobre a costa. A plataforma média varia de 30 m a 100 m de profundidade e tem o seu relevo e sedimentos regulados por eventos de maior intensidade, como ondas de tempestade.

Já a plataforma externa está situada entre 100 m e aproximadamente 200 m de profundidade e tem sua morfologia e sedimentos regulados por correntes geostróficas ou herança de paleoambientes relativos a períodos de nível do mar mais baixo. A quebra da plataforma é o seu limite externo e atua como zona de transição entre os ambientes com influência continental e oceânica. Essa zona é marcada pelo aumento abrupto no gradiente de declividade (WRIGHT, 1995). As plataformas de margem passiva possuem subsidência térmica ou através de fraturas em direção ao continente (SWIFTÞE,1991). A subsidência térmica ou termal é o rebaixamento do depocentro de uma bacia causado pelo resfriamento da crosta e conseqüente aumento da densidade das rochas que compõe o embasamento. Esse processo aumenta o espaço disponível para a acumulação de sedimentos (ROYDEN, 1986).

A plataforma continental norte brasileira distingue-se das demais presentes na margem continental brasileira por conta da sua variedade de feições. Ela se caracteriza por ser uma faixa de largura variável, com extensão de 2.150 km e uma área de 315.000 km². A configuração da sua linha de costa entre o Amapá e o Ceará é altamente recortada, em contraste com o trecho entre Acaraú (CE) e o Cabo Calcanhar (RN) que descreve uma leve reentrância e pouco recortada. PALMA (1979) utilizou dados batimétricos referentes aos cruzeiros realizados para o projeto REMAC com a finalidade de descrever a geomorfologia da plataforma continental norte brasileira.

De acordo com PALMA (1979) declividades da Plataforma Variam entre 1:3.290 (Foz do Rio Pará/PA) e 1:322 (Macau/RN). A análise realizada por este autor permitiu identificar a presença de dois ambientes de plataforma distintos: O setor norte (entre o Cabo Orange/AP e Acaraú/CE) e o setor nordeste (entre Acaraú/CE e o Cabo Calcanhar/RN).

O setor norte caracteriza-se por abrigar uma depressão estrutural e topográfica ampla, que corresponde a parte mais larga de menor declividade da plataforma. Já o setor nordeste corresponde a uma região costeira com características estruturais e topográficas que favoreceram uma plataforma continental mais estreita, relativamente mais rasa e com maiores declividades. A sedimentação também é diferenciada, sendo no setor norte uma deposição terrígena por parte da drenagem continental, já o setor nordeste é caracterizado pela sedimentação carbonática devido ao clima semiárido e a ausência de drenagem expressiva (PALMA, 1979).



Em termos morfológicos mais específicos, o setor nordeste é dominado por feições de construção carbonática, fundos planos e ondas de areia, resultado de correntes de deriva litorânea. Para o setor norte, a influência do aporte sedimentar da drenagem continental e dos sistemas estuarinos acaba por regular a morfologia da plataforma continental (PALMA, 1979). Este autor também identificou que a morfologia da plataforma para ambos os setores também pode estar relacionada com as variações do nível do mar, principalmente durante o quaternário para plataforma interna.

- **Talude**

O Talude continental é definido por GUERRA & GUERRA (2010) como sendo a região geomorfológica que se estende de 200 m a aproximadamente 1.000 m de profundidade e localiza-se entre a plataforma continental e as regiões mais profundas, como o sopé e a planície abissal. De uma maneira geral, pode-se definir o Talude Continental como sendo de declividades elevadas (maiores do que 1:40) e podendo atingir até 3.000 m de profundidade (FERNÁNDEZ *et al.*, 2009).

O talude continental da Margem Atlântica Equatorial Oeste foi descrito por DAMUTH & PALMA (1979) como sendo declividade média de 1:4 a 1:13, estendendo-se até profundidades de 2.200 m a 4.600 m. Estes autores utilizaram o acervo de informações batimétricas obtidos durante o projeto REMAC. Ao longo do estudo realizado por esses autores, foi possível observar a presença de feições como cânions submarinos e indicativos de movimento de massa nesta região da margem continental.

De acordo com DAMUTH & PALMA (1979), na margem continental norte-nordeste brasileira ocorrem diversos cânions com variação considerável de relevo. Os cânions apresentam morfologia variável, sendo escavados em forma de “V” ou “U”. Todavia, existem cânions com forma de “V” com o fundo aplainado, o que indica preenchimento sedimentar. Alguns cânions estão posicionados até a borda da plataforma continental, a exemplo do Cânion do Pará e do Gurupi. De uma maneira geral, os autores não identificaram uma relação direta entre a ocorrência dos cânions e a drenagem continental atual, embora alguns cânions apresentem uma aparente conexão com os sistemas, a exemplo do Cânion Submarino de Natal e a foz do rio Potengi.

- **Sopé**

O Sopé Continental é definido por FERNÁNDEZ *et al.* (2009) como sendo a unidade fisiográfica que localiza-se entre o talude e a planície abissal, com exceção de regiões com a presença de fossas oceânicas. Tem declividades suaves, da ordem de 1:40 a 1:2.000 com topografia geralmente lisa, embora possam ocorrer cânions submarinos em algumas regiões.

O sopé continental foi caracterizado por DAMUTH & PALMA (1979) como sendo uma espessa cunha sedimentar que se estende por uma largura de 200 a 600 km. As profundidades do Sopé continental para a região podem atingir de 2.200 m até 4.550 m. A média da declividade do Sopé ao sul do Cone do Amazonas é de 1:200 a 1:400, já sobre o cone as declividades diminuem para 1:600 a 1:900. O relevo do sopé nessa região é, em geral, inferior a 100 m, com exceção a algumas colinas na região superior do sopé. A cadeia Norte Brasileira pode estar atuando como uma barreira topográfica no que diz respeito aos sedimentos que se

deslocam ao longo do sopé. A cadeia atua como barragem natural aos sedimentos, com acumulações de 225 m a 750 m de espessura de sedimentos.

- **Montes Submarinos**

Na região da Margem Continental do Norte-Nordeste do Brasil é possível identificar a presença de montes submarinos pertencentes à Cadeia de Fernando de Noronha, localizados entre 2°S e 4° 30'S, erguendo-se da base do Talude Continental até a superfície, como o Arquipélago de Fernando de Noronha e o Atol das Rocas. Os montes submarinos atingem profundidades de até 250 m, sendo alguns *guyots*, provavelmente submetidos a subsidência isostática (DAMUTH & PALMA, 1979). A Cadeia Norte Brasileira foi descrita por esses autores como uma feição que se divide em dois segmentos no sentido Leste-Oeste, conectados por um segmento intermediário no sentido noroeste-sudeste.

Dessa forma, são apresentados um perfil batimétrico A-B elaborado a partir de informações do ETOPO 2, com precisão vertical de ~90 m e a localização de feições fisiográficas da costa brasileira elaborado segundo a descrição fisiográfica estabelecida pela CPRM. A localização das feições é apresentada na **Figura II.5.1.2.27**, a seguir, e o perfil é apresentado na **Figura II.5.1.2.28**

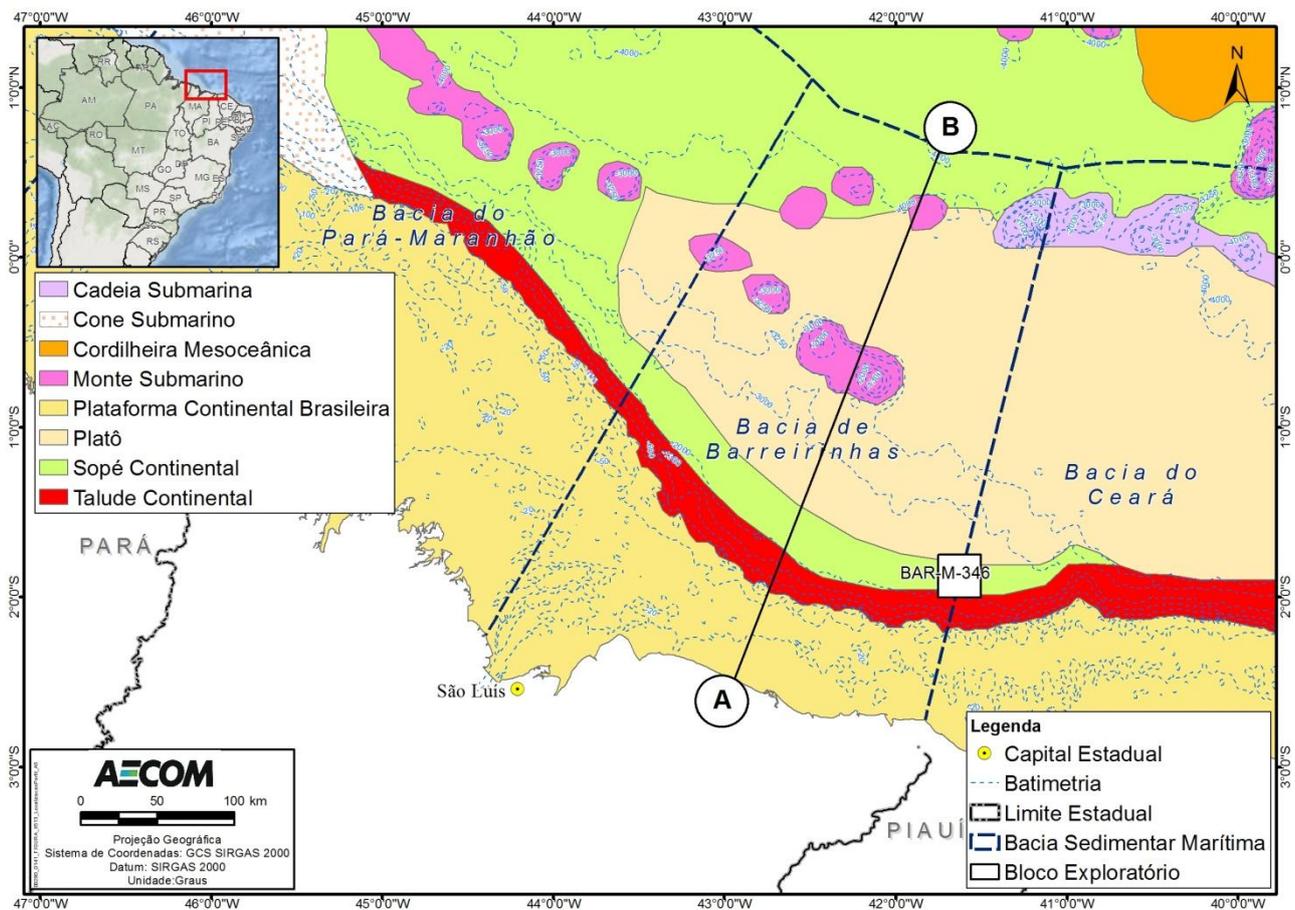


FIGURA II.5.1.2.27 – Mapa físico da Bacia de Barreirinhas indicando as principais feições adjacentes, bem como a localização do perfil batimétrico AB.

Fonte: AECOM.

O perfil batimétrico (**Figura II.6.1.28**) permitiu visualizar um trecho da margem continental ao longo da Bacia de Barreirinhas, com a finalidade de explicitar a forma e localização das suas feições mais visíveis. Cabe ressaltar que, por motivos de melhor visualização das feições, um exagero vertical foi utilizado. Este exagero varia de acordo com as escalas dos eixos (ordenadas e abscissas), sendo utilizadas a cada 50 km de distância (eixo horizontal) e a cada 1000 m de profundidade (eixo vertical).

O perfil se estendeu em linha reta por ~220 km da isóbata de 0 m até a profundidade de ~4000 m. Ao longo do perfil, é possível visualizar as seguintes feições, previamente descritas: a plataforma continental (1), a quebra da plataforma (2), o talude continental (3), o sopé continental (4), o Monte Submarino do Maranhão (5) e o Platô Norte Brasileiro (6).



FIGURA II.5.1.2.28 – Perfil batimétrico em uma seção da Bacia de Barreirinhas, indocando as seguintes feições: 1- Plataforma Continental, 2- Quebra da Plataforma Continental, 3- Talude Continental, 4- Sopé Continental, 5- Monte Submarino do Maranhão e 6- Platô Norte Brasileiro.

Fonte: AECOM. Dados disponíveis em: <http://www.ngdc.noaa.gov>.

O mapa fisiográfico **II.5.1.2.2** é apresentado no **ANEXO C** ao final deste item.

II.5.1.2.2.8. Faciologia

Os sedimentos da plataforma continental da região norte-nordeste do Brasil foi descrita por FRANCISCONI *et al.* (1974), para área da Foz do Amazonas, como sendo terrígenos, predominando lamias e areias lamias subarcosianas. Na porção externa ocorrem biodetrítos e areias subarcosianas. Na porção que se estende do Vigia ao rio Parnaíba ocorrem uma extensa faixa de areias arredondadas, ortoquartzíticas, limitadas por construções carbonáticas da plataforma externa. Nesta porção, a faixa de detritos calcários se distribui uniformemente ao longo da plataforma.

Já a porção do Rio Parnaíba até o Cabo de São Roque é caracterizada pela faixa contínua de areias subarcosianas, que ocorrem entre a faixa de praia até construções calcárias mais externas. Nas faixas mais ao largo desse trecho, ocorrem uma faixa de sedimentos ortoquartzíticos-biodetríticos, que estão interpostos entre as areias subarcosianas e os calcários externos (FRANCISCONI *et al.*, 1974).

O projeto PIATAM OCEANO realizou a caracterização geológica da Margem Equatorial Brasileira, nas bacias da Foz do Amazonas, Pará-Maranhão e Barreirinhas (FIGUEIREDO JR. *et al*, 2008). Esses autores utilizaram uma compilação de informações sedimentares, totalizando 4.509 pontos de amostras ao longo dessas três bacias sedimentares, conforme apresentados na **Figura II.5.1.2.29**. Os pontos amostrados foram classificados segundo a classificação sedimentar de Shepard, sendo divididas em seis (6) fácies sedimentares distintas: Lama, Areia Lamosa, Areia, Lama Areia Cascalho, Areia Cascalhosa e Cascalho.

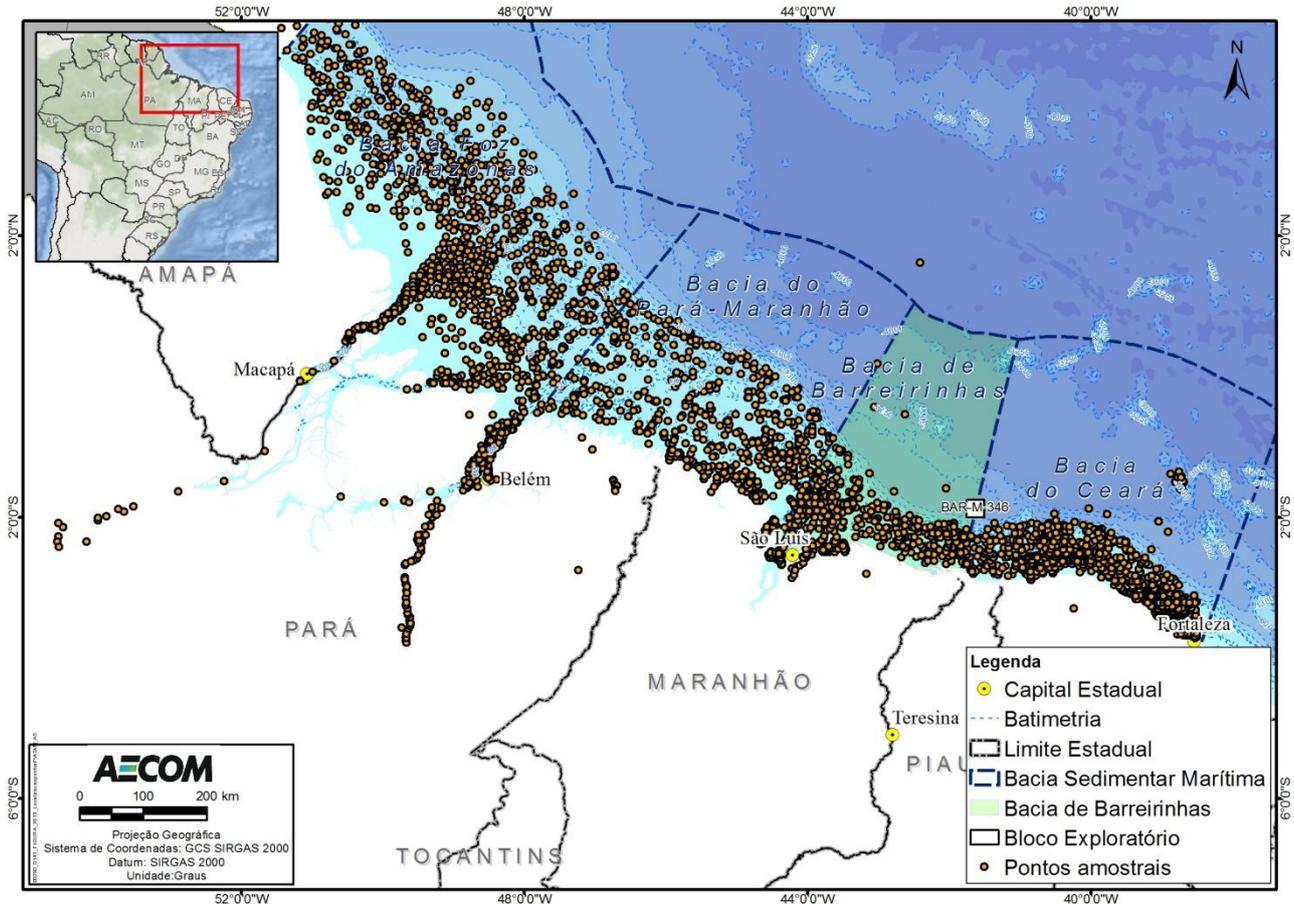


FIGURA II.5.1.2.29 – Localização dos pontos de amostragem de sedimentos superficiais utilizados no projeto PIATAM OCEANO.

Fonte: FIGUEIREDO JR. *et al* (2008).

O principal resultado obtido por esses autores foi a identificação de uma grande complexidade sedimentar para a Margem Equatorial Brasileira (**Figura II.5.1.2.30**). Diversas províncias foram identificadas, sendo as principais as Lamas, decorrentes da carga sedimentar proveniente do Rio Amazonas e as Areias, que ocorrem ao longo da plataforma. Outra característica importante destacada por FIGUEIREDO JR. *et al*. (2008) é a ocorrência de carbonatos que predominam na porção externa da plataforma continental.

Com ênfase na descrição da região da Foz do Rio Amazonas, os autores identificaram uma predominância de areias na plataforma externa, além de lamas provenientes da descarga do rio. Na borda de plataforma foram identificadas a ocorrência de areias cascalhosas e cascalhos, que representam a fácies carbonática da região. Foi identificado também que as fácies cascalhosas tendem a aumentar no sentido SW (FIGUEIREDO JR. *et al.*, 2008).

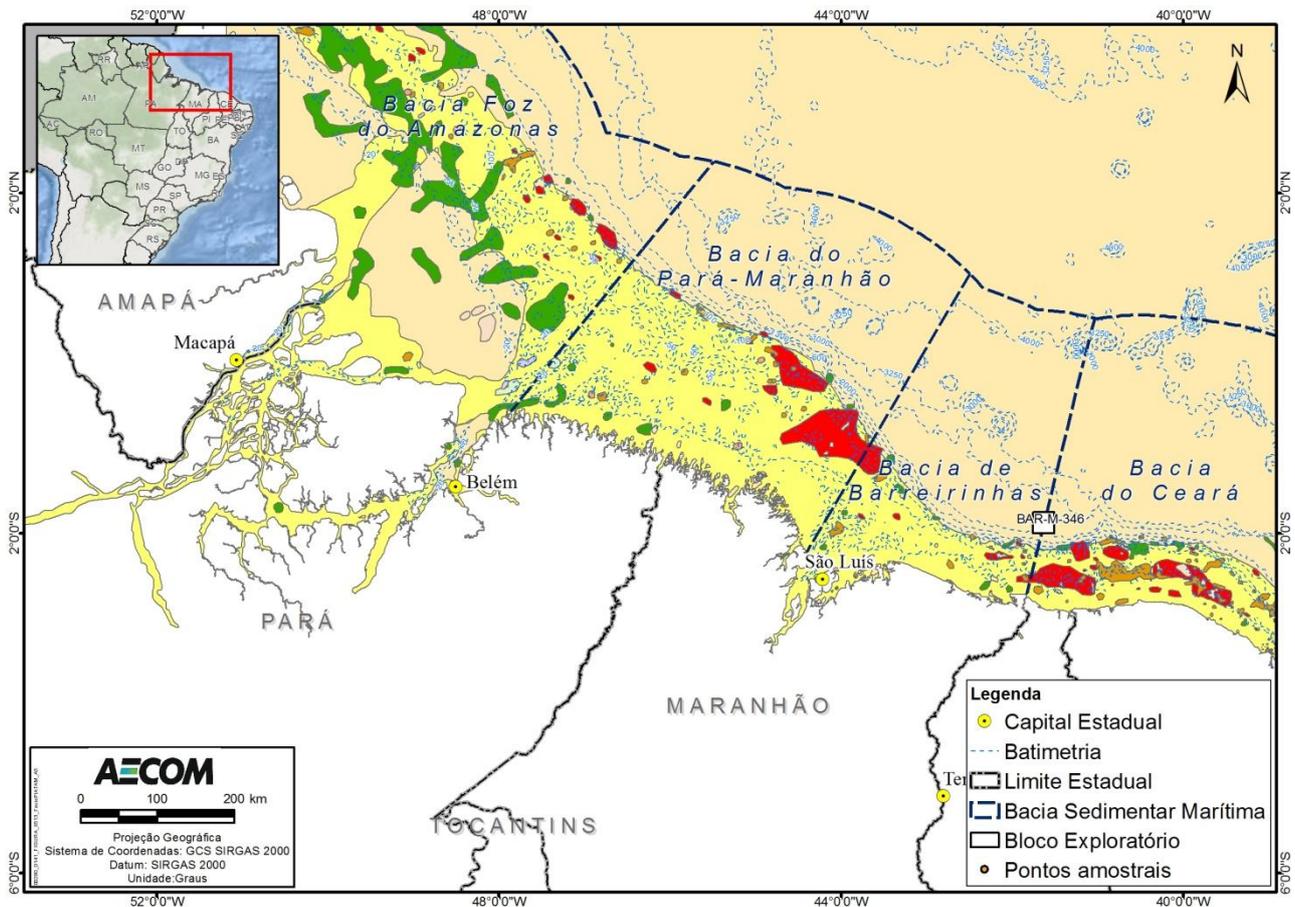


FIGURA II.5.1.2.30 – Mapa de parâmetros granulométricos superficiais resultantes do projeto PIATAM OCEANO.

Fonte: FIGUEIREDO JR. *et al* (2008).

A disponibilização dos dados utilizados no projeto PIATAM OCEANO permitiu a elaboração de um mapa sedimentológico atualizado para a Bacia de Barreirinhas. Este mapa possibilitou visualizar que a plataforma continental da bacia apresenta fácies sedimentares predominantemente compostas por Areia, segundo a classificação de SHEPARD, com a ocorrência de bolsões isolados de Areia Lamosa, Cascalho e Areia Cascalhosa (**Figura II.5.1.2.31**). Nas regiões mais profundas, a partir do talude, os sedimentos foram identificados como sendo predominantemente compostos por lamas (siltes e argilas).

Todavia, com base nos trabalhos desenvolvidos no REMAC, cujos dados também foram disponibilizados pelo projeto PIATAM OCEANO, foi possível identificar os principais domínios sedimentares das regiões profundas como o talude, sopé e montes submarinos. Os dados do REMAC foram coletados no final da década de 70, com a finalidade de caracterizar a morfologia e a faciologia de toda a margem continental brasileira. As informações do REMAC constam na caracterização sedimentológica das bacias da Foz do Amazonas, do Pará-Maranhão e de Barreirinhas descritas por FIGUEIREDO JR. *et al*. (2008).

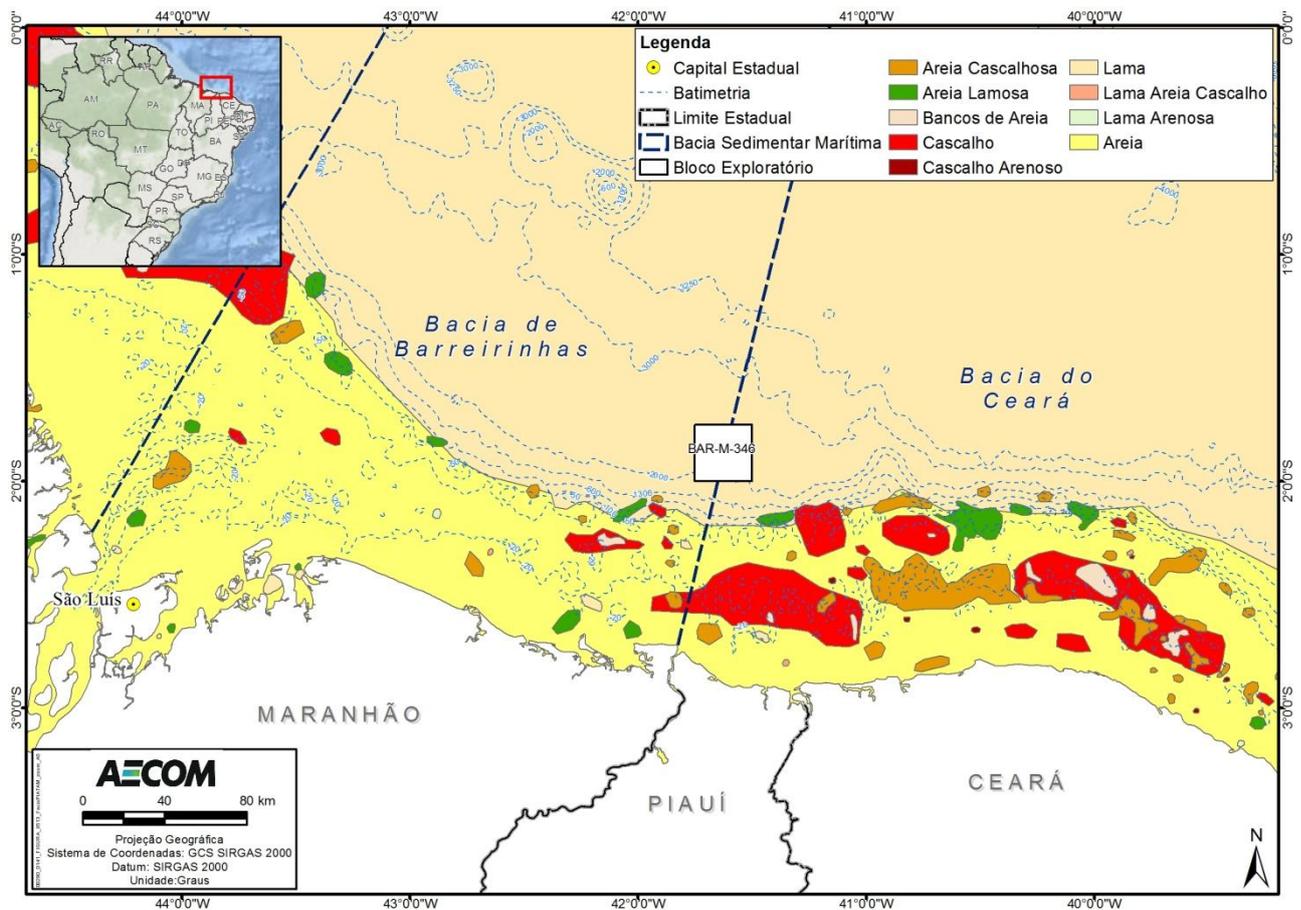


FIGURA II.5.1.2.31 – Mapa de parâmetros granulométricos superficiais resultantes do projeto PIATAM OCEANO, detalhe para a Baía de Barreirinhas.

FONTE: AECOM, adaptado de FIGUEIREDO JR. *et al.* (2008).

A avaliação dos dados do REMAC possibilita identificar quatro (4) principais domínios sedimentares para a Baía de Barreirinhas, sendo eles: mascarado por afloramentos rochosos, desmoronamento e deslizamento, erosão por correntes de fundo e hemipelágicos. Os sedimentos mascarados por afloramentos rochosos ocorrem na porção do talude e sobre o Monte Submarino do Maranhão. Já os sedimentos referentes a desmoronamento e deslizamento ocorrem sobre o sopé continental. Nas áreas mais profundas ocorre a presença de sedimentos hemipelágicos, além de domínios caracterizados por sofrer erosão por correntes de fundo (Figura II.5.1.2.32).

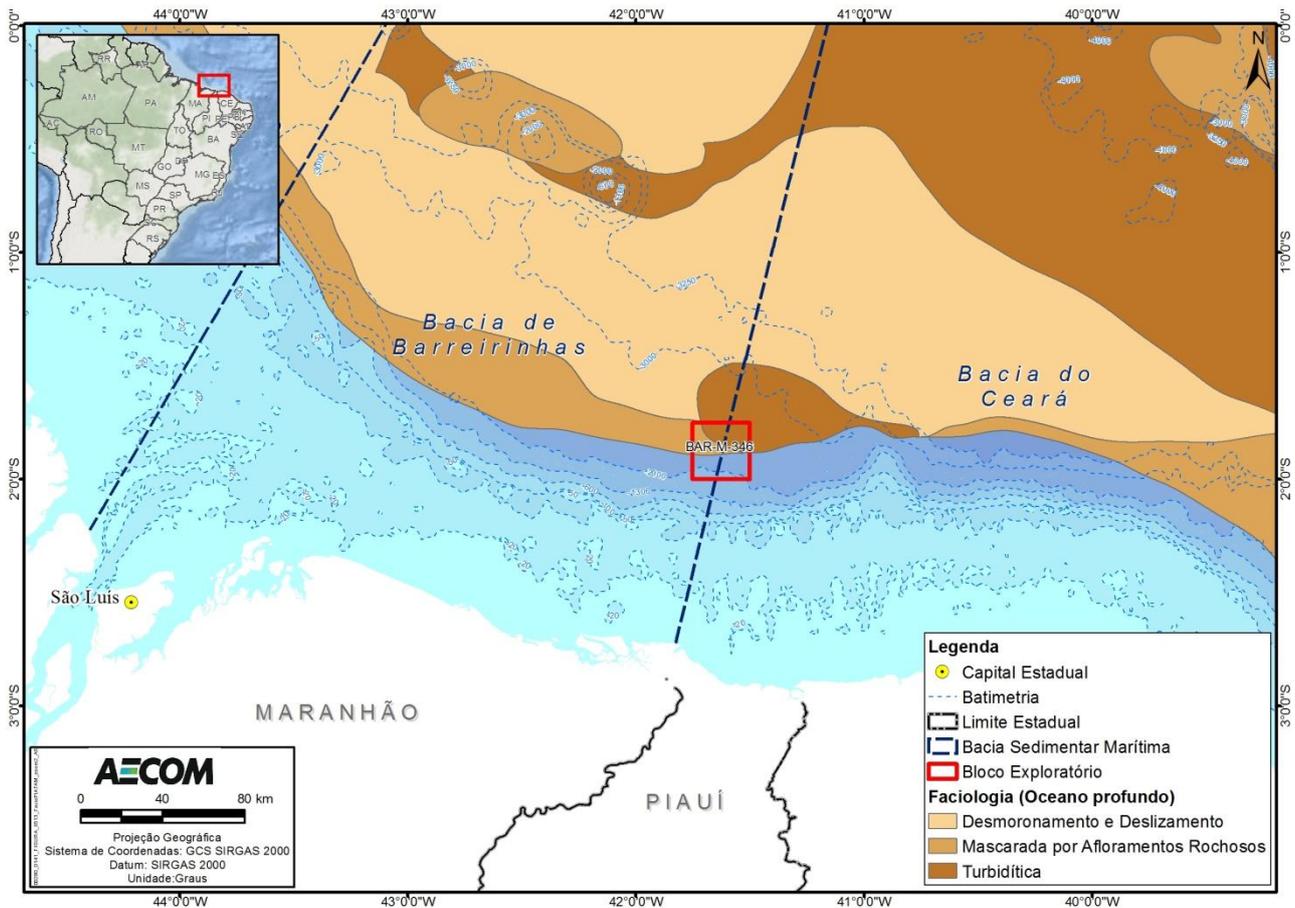


FIGURA II.5.1.2.32 – Mapa de domínios sedimentares superficiais resultantes do projeto PIATAM OCEANO, detalhe para a Baía de Barreirinhas. No que se refere as feições regionalmente mapeadas, os novos dados sísmicos 3D que estão sendo adquiridos na área do Bloco BAR-M-346 proporcionarão uma apropriada avaliação da sua extensão e impacto sobre a atividade de perfuração e estabilidade das instalações.

FONTE: AECOM. Dados disponíveis em: FIGUEIREDO JR. *et al.* (2008).

O mapa faciológico II.5.1.2.3 é apresentado no ANEXO D ao final deste item.

II.5.1.2.3 Geologia Local

A) Localização

O Bloco BAR-M-346 localiza-se na porção marítima sudeste da Bacia de Barreirinhas, distante cerca de 300 km a leste-nordeste da cidade de São Luís, Maranhão, e aproximadamente 90 km a norte-nordeste da foz do Rio Parnaíba, divisa dos estados do Piauí e Maranhão (**Figura II.5.1.2.33**), cobre uma área de 768,9 km², e situa-se em setor de águas ultra profundas, com lâmina d'água variando de cerca de 1.645m, na sua parte sul, a aproximadamente 2.800m a norte.

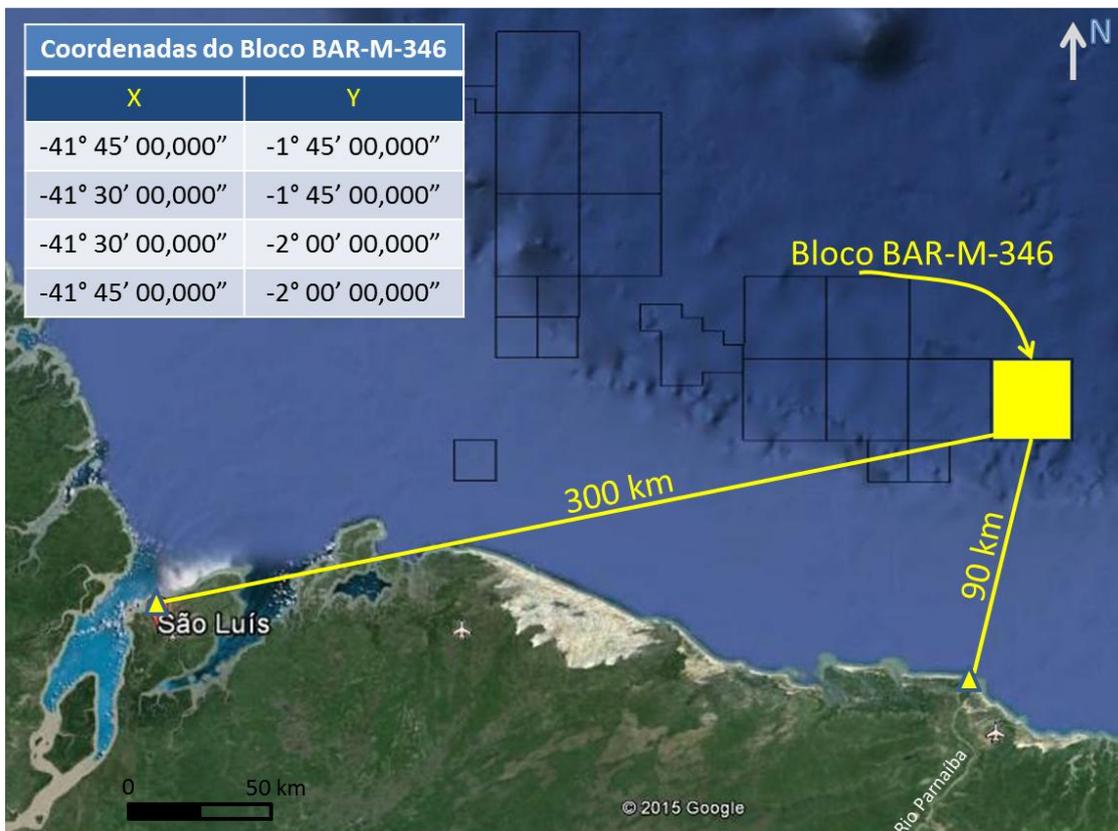


FIGURA II.5.1.2.33 – Localização do Bloco BAR-M-346.

O compromisso do Programa Exploratório Mínimo (PEM) para o Primeiro Período da Fase de Exploração do Bloco BAR-M-346 é de 2.100 Unidades de Trabalho, e prevê a perfuração de até dois poços exploratórios durante o Primeiro Período e, no mínimo, um poço no Segundo Período. Demais poços que possam vir a ser perfurados no Bloco BAR-M-346 são contingentes ao sucesso destes poços exploratórios.

A **Tabela II.5.1.2.2** apresenta as coordenadas dos três prospectos mapeados na área do Bloco BAR-M-346.

TABELA II.5.1.2.2 – Coordenadas dos prospectos do Bloco BAR-M-346.

Poço	X_UTM23S	Y_UTM23S
Babaçu	863774.950949	9780045.74744
Bacuri	875301.029463	9780405.93739
Cacau	883495.350906	9779505.46251

DATUM: SIRGAS 2000.

O mapa de localização dos prospectos é apresentado na **Figura II.5.1.2.34** abaixo.

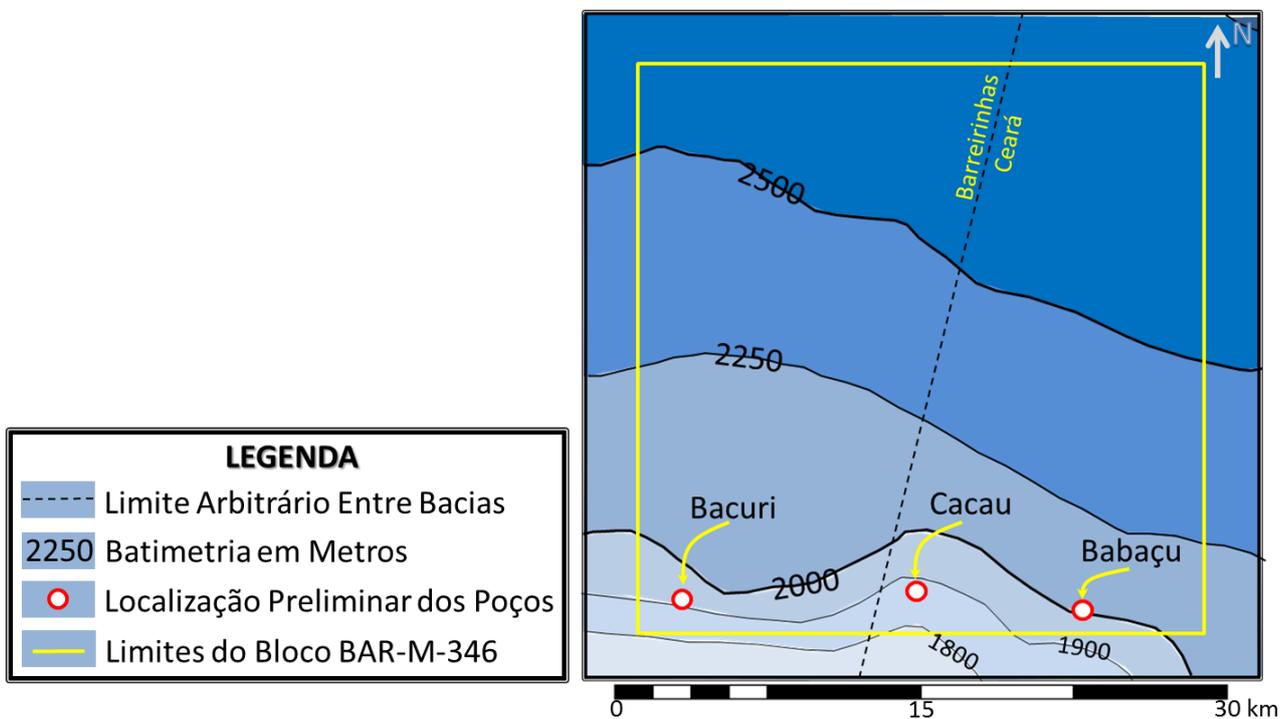


FIGURA II.5.1.2.34 – Localização preliminar dos poços propostos no Bloco BAR-M-346.

Fonte: BP (2015).

B) Geologia estrutural

O Bloco BAR-M-346 situa-se sobre o limite arbitrário entre as bacias de Barreirinhas e do Ceará, na extremidade oeste da área de influência da Zona de Fratura Romanche (**Figura II.5.1.2.35**). Contudo, dentro do Bloco, com os dados sísmicos 2D disponíveis, não se destacam feições estruturais relevantes, conforme observado na **Figura II.5.1.2.36**. Predominam o aspecto monoclinal para nordeste, com dobramentos secundários observados nas linhas ortogonais aos mergulhos das camadas.

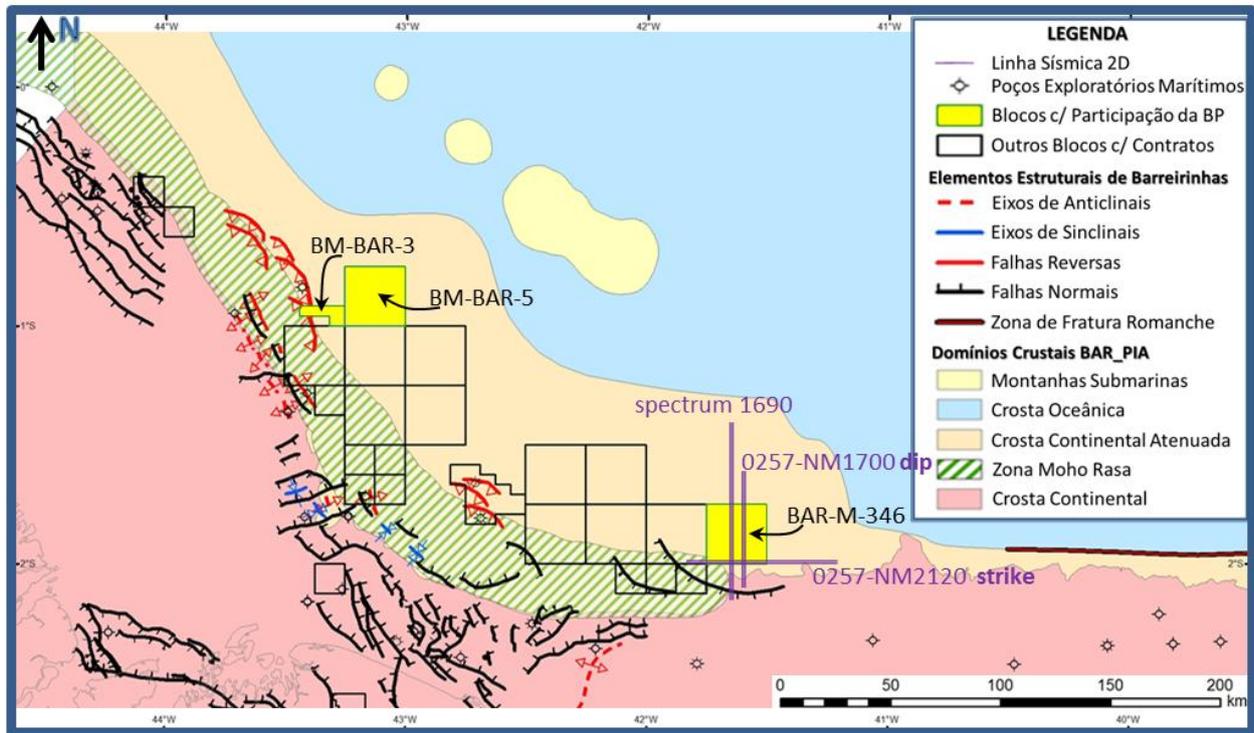


FIGURA II.5.1.2.35 – Mapa com as principais feições estruturais da Baía de Barreirinhas, destacando os blocos com participação da BP, e a área do Bloco BAR-M-346.

Fonte: BP (2015).

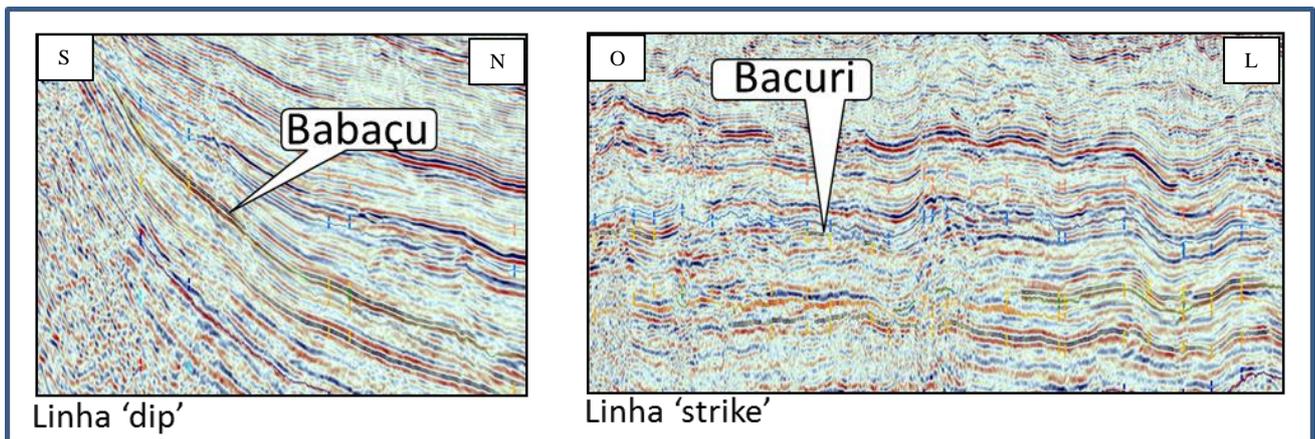


FIGURA II.5.1.2.36 – Na área do Bloco BAR-M-346 não se observam feições estruturais relevantes, predominando aspecto monoclinal para nordeste (“*dip*”), com dobramentos secundários observados nas linhas ortogonais aos mergulhos das camadas (“*strike*”). A localização das linhas 0257-NM1700 (“*dip*”) e 0257-NM2120 (“*strike*”) é apresentada na Figura II.5.1.2.40.

Fonte: BP (2015).

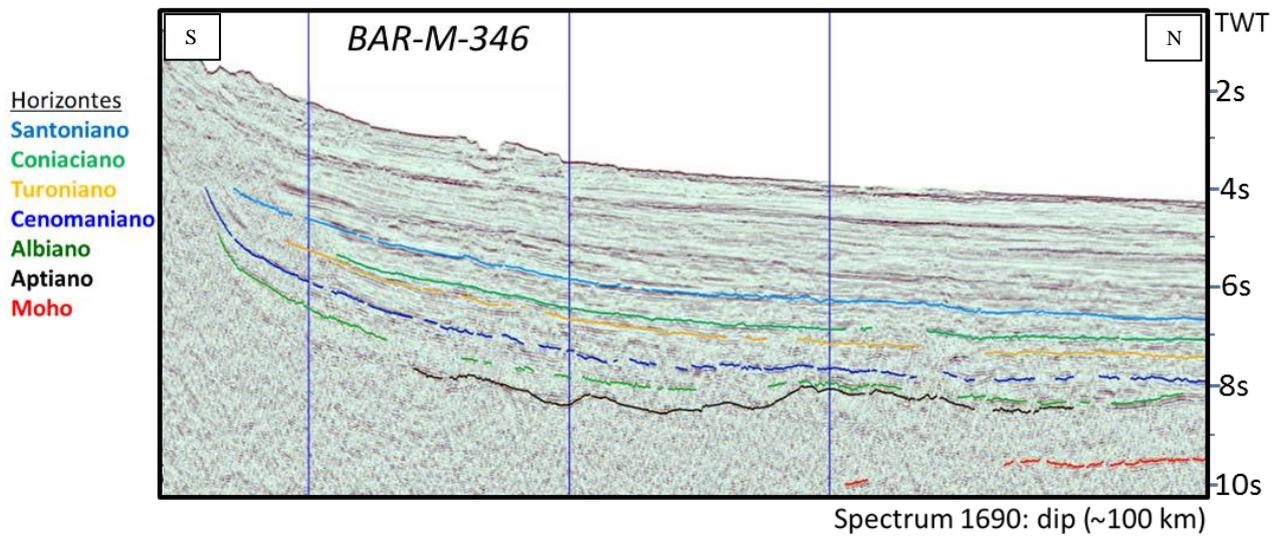


FIGURA II.5.1.2.37 – Seção sísmica interpretada na Bacia de Barreirinhas passando sobre o Bloco BAR-M-346, sua localização é apresentada na Figura II.5.1.2.35.

Fonte: BP (2015).

A espessura da crosta na região do Bloco BAR-M-346 varia de aproximadamente 1 km, na porção norte, e a cerca de 10 km na porção sul. A **Figura II.5.1.2.38** apresenta o mapa de espessura da crosta e a **Figura II.5.1.2.36** apresenta os domínios de crosta contendo as principais estruturas geológicas na Bacia de Barreirinhas.

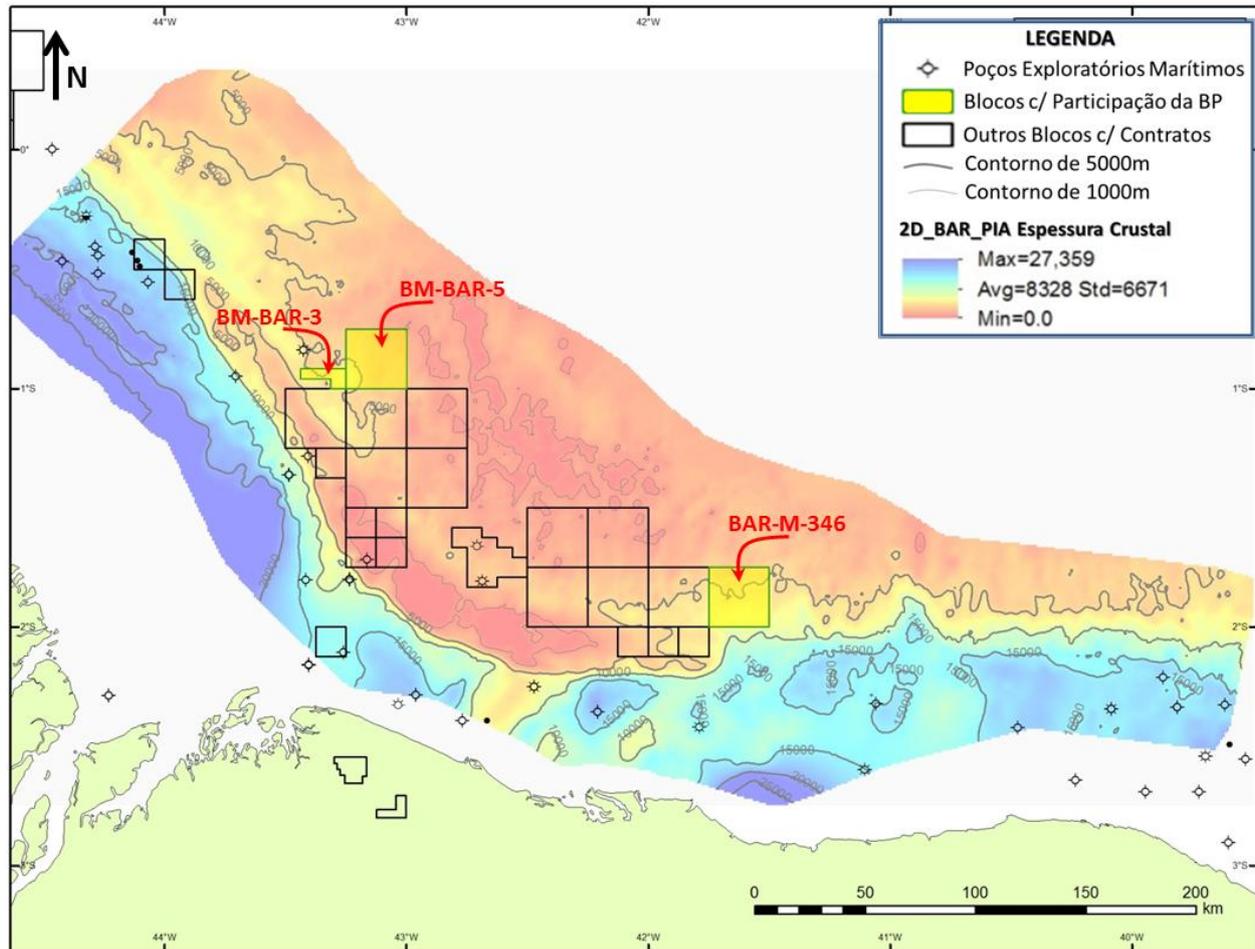


FIGURA II.5.1.2.38 – Mapa de espessura (m) da crosta na Bacia de Barreirinhas, destacando-se a localização do Bloco BAR-M-346.

Fonte: BP (2015).

As **figuras II.5.1.2.39 a II.5.1.2.41** apresentam as seções sísmicas ao longo dos três prospectos mapeados mostrando as principais feições estruturais e estratigrafia esperadas.

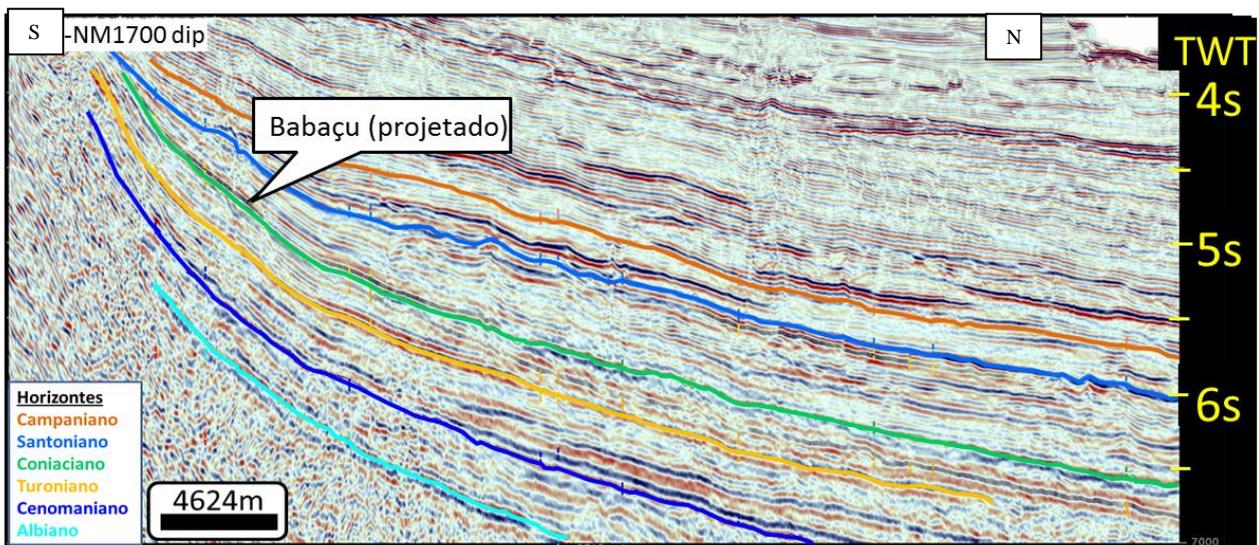
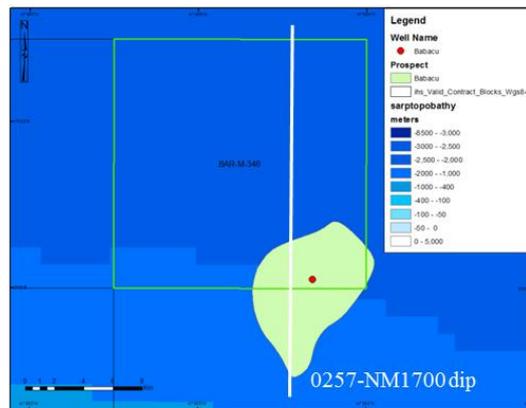


FIGURA II.5.1.2.39 – Seção sísmica 2D interpretada para a localização Babaçu (projetado).

Fonte: BP (2015).

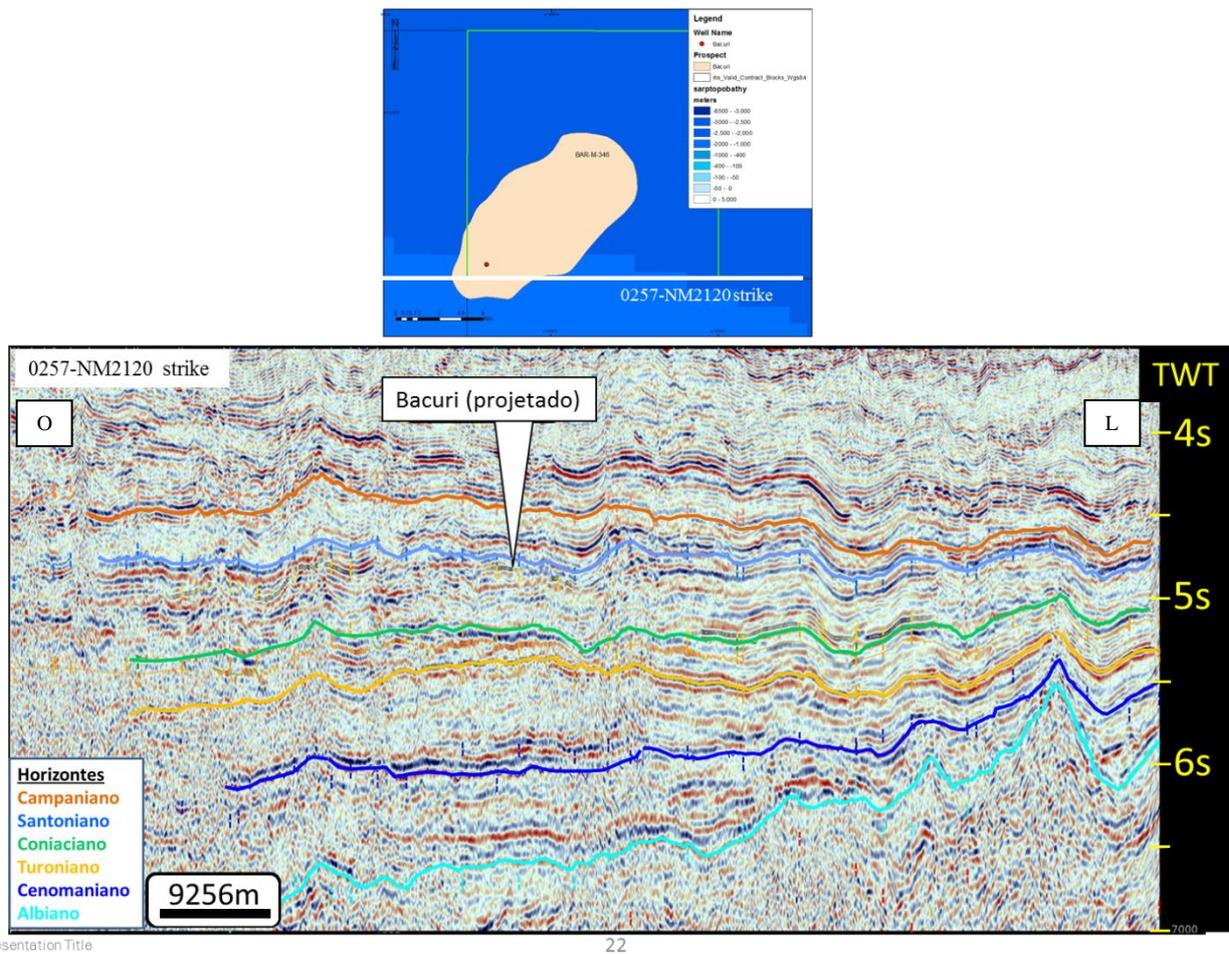


FIGURA II.5.1.2.40 – Seção sísmica 2D interpretada para a localização Bacuri (projetado).
Fonte: BP (2015).

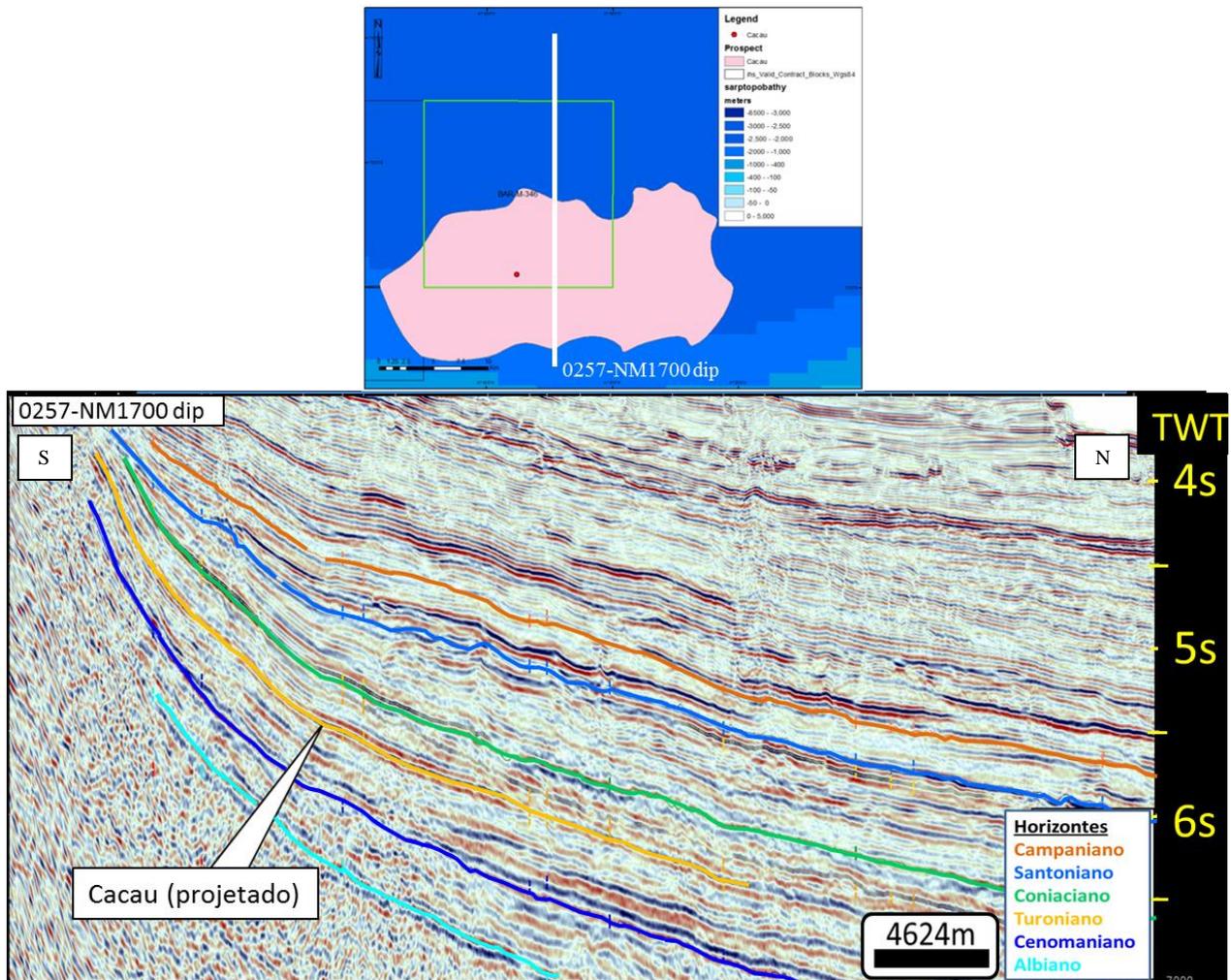


FIGURA II.5.1.2.41 – Seção sísmica 2D interpretada para a locação Cacau (projetado).

Fonte: BP (2015).

Os reservatórios mapeados nos três prospectos do Bloco BAR-M-346 são de idade Santoniano (Bacuri), Coniaciano (Babaçu) e Turoniano (Cacau). Espera-se que os hidrocarbonetos presentes nos reservatórios tenham origem marinha de idade Cenomaniano. A **Figura II.5.1.2.42** mostra o histórico do volume de carga de hidrocarbonetos no reservatório e o RGO estimado, cerca de $70 \text{ m}^3/\text{m}^3$ (400 scf/bbl). Prevê-se que a gravidade do óleo correspondente seja de 29 °API.

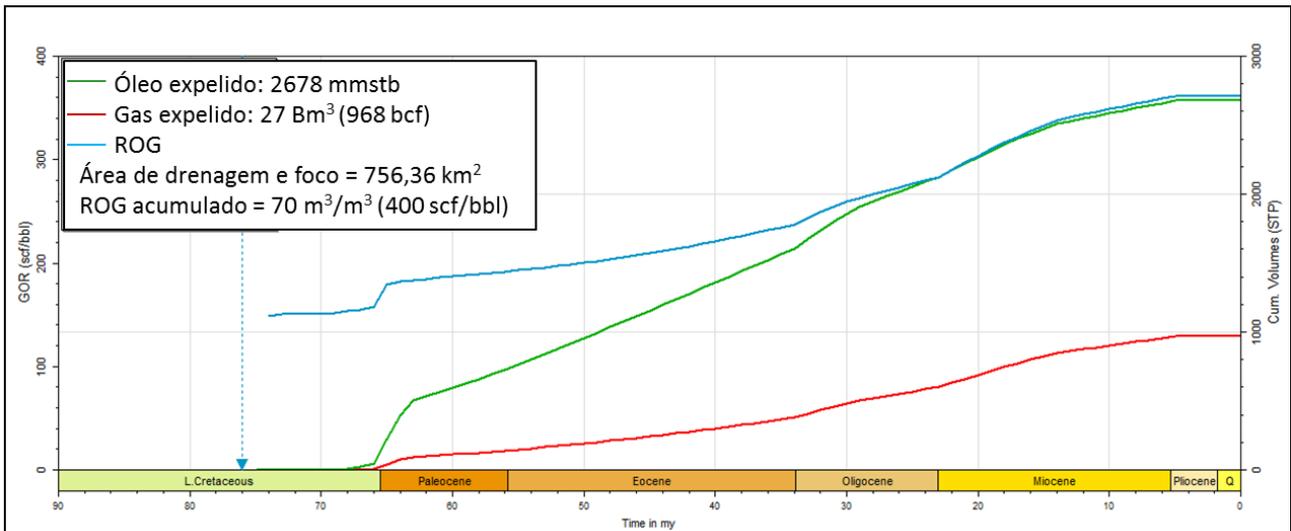


FIGURA II.5.1.2.42 - Histórico do volume de carga de hidrocarboneto estimado para o Bloco BAR-M-346.

Fonte: BP (2015).

A temperatura esperada para o reservatório Santoniano é estimada em 95 °C e está representada no gráfico referente ao prospecto Bacuri (**Figura II.5.1.2.43**). A temperatura esperada para o reservatório Coniaciano é estimada em 105 °C e está representada pelo gráfico do prospecto Babaçu (**Figura II.5.1.2.44**). A temperatura esperada para o reservatório Turoniano é estimada em 114 °C e está representada pelo gráfico do prospecto Cacau (**Figura II.5.1.2.45**).

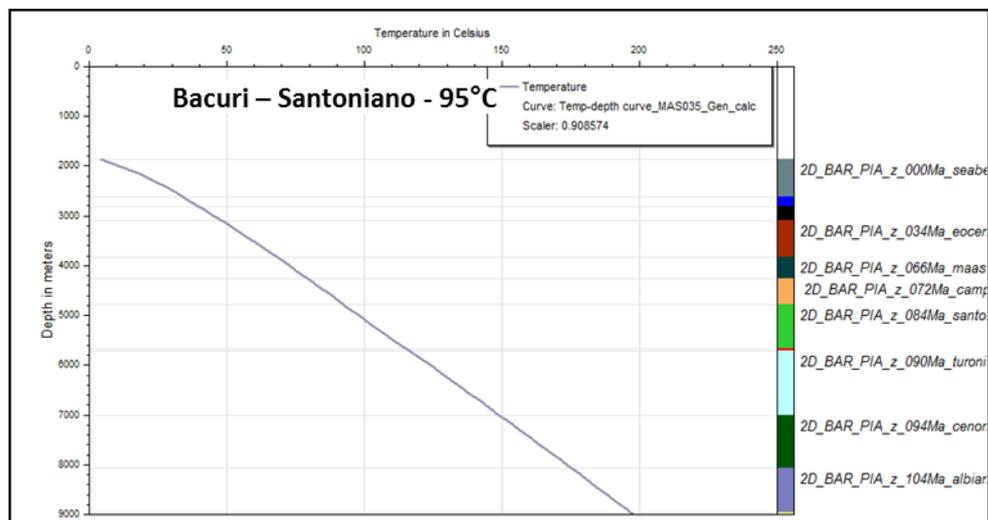


FIGURA II.5.1.2.43 – Gráfico de temperatura no intervalo Santoniano do prospecto Bacuri.

Fonte: BP (2015).

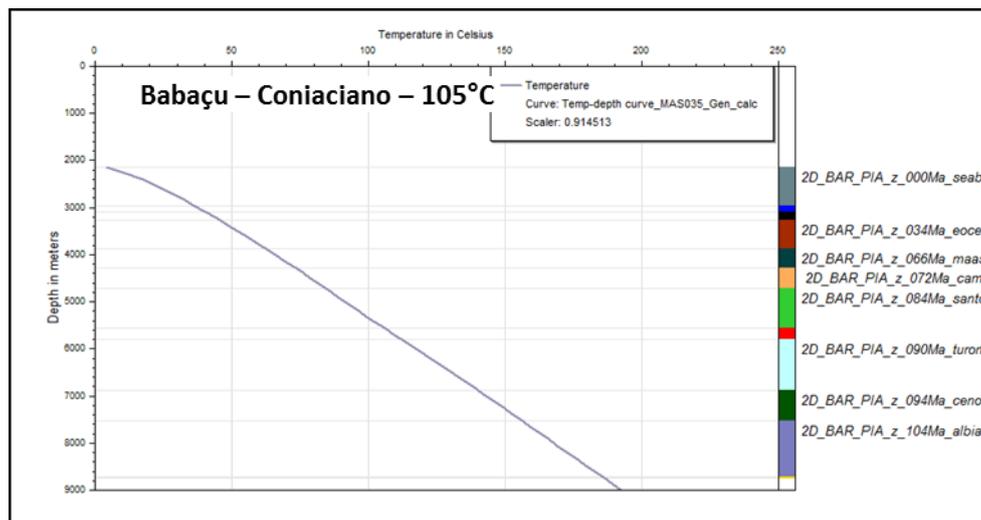


FIGURA II.5.1.2.44 – Gráfico de temperatura no intervalo Coniaciano do prospecto Babaçu.

Fonte: BP (2015).

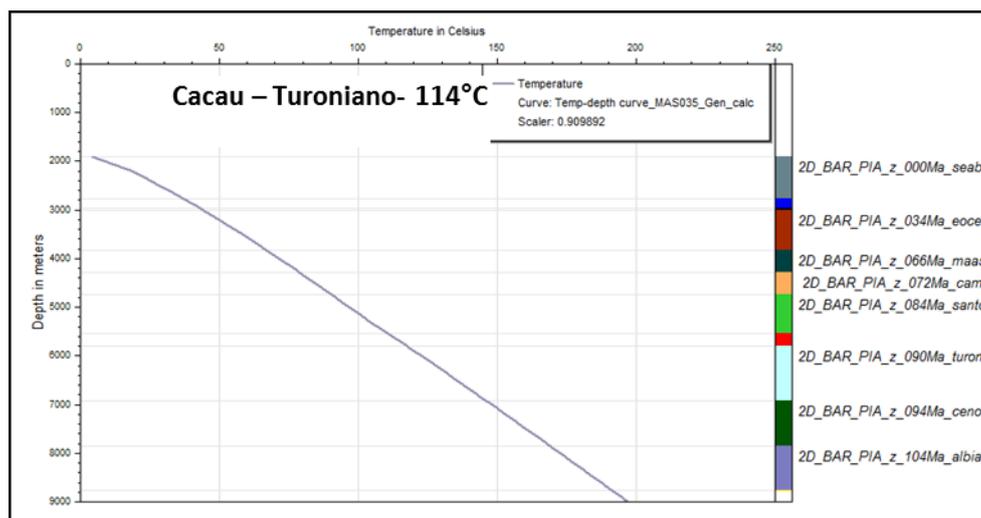


FIGURA II.5.1.2.45 – Gráfico de temperatura no intervalo Turoniano do prospecto Cacau.

Fonte: BP (2015).

Dada a escassez de dados geológicos e de engenharia do petróleo na região do setor SBAR-AP2, Bacia de Barreirinhas, o volume de pior caso empregado no presente estudo consiste numa estimativa preliminar, baseada em dados disponíveis de poços previamente perfurados em outros setores da Bacia de Barreirinhas, aplicável à área do Bloco BAR-M-346.

Consideradas as incertezas em relação às características de poços e reservatórios, utilizou-se um conjunto comum de parâmetros considerados dentro de uma faixa de valores e o seu impacto em relação à taxa de fluxo total. Os pressupostos considerados pela BP a partir de análogos de poços e características geológicas são listados a seguir (**Tabela II.5.1.2.3**):

- Permeabilidade (k): 70 mD como permeabilidade média para arenitos do Cretáceo Superior;
- Espessura do reservatório (h): 50 metros (164,1 ft) de rochas porosas e permeáveis (arenitos turbidíticos) com hidrocarbonetos ('net pay');
- Viscosidade do óleo (μ): 0,9 cP, estimativa conservadora, considerando óleo de baixa viscosidade do óleo;
- Área de drenagem (r_e) e diâmetro do poço (r_w): Considerou-se um raio de drenagem de aproximadamente 3090m (10138 ft) e o diâmetro do poço (r_w) de 8,5 polegadas no intervalo que contém os reservatórios;
- Fator de dano (S): Zero (0), estimativa conservadora, considerando a inexistência de reboco causando redução da permeabilidade ao redor do poço;
- Fator de volume de formação (B_o): 1,25 – valor compatível com a densidade de 29 °API esperado como possível para acumulação de óleo nessa área;
- Queda de pressão: 12,35 ppg com reservatório a 10.000 psi numa profundidade de 4300m;
- Poço inteiro preenchido com óleo de 29° API.
- Gradiente da água do mar de 8,6 ppg na cabeça do poço em 2200m de lâmina d'água.
- Fricção zero ou outra perda de pressão mecânica através do fluxo do poço.
- Ausência de gás ou restrições de queda de pressão por fluxo turbulento.

A lei de Darcy, que regula o fluxo do poço, é expressa da seguinte forma (**Figura II.5.1.2.46**):

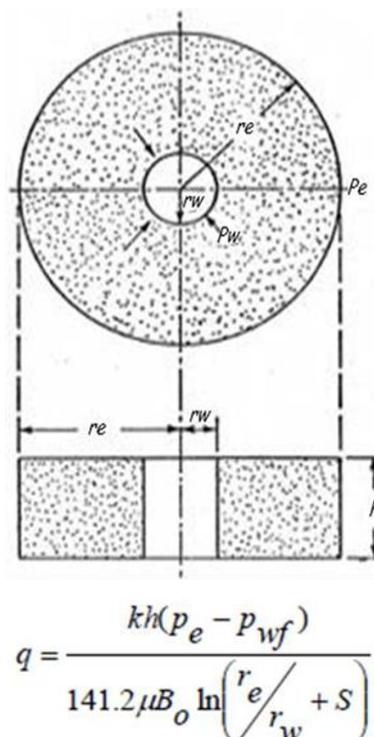


FIGURA II.5.1.2.46 – Modelo para o fluxo radial de fluidos no poço e a equação que rege o fluxo no poço (Lei de Darcy).

Fonte: BP (2015).



TABELA II.5.1.2.3 – Características dos parâmetros considerados para o cálculo do fluxo do poço.

Q		10,634 STB/Day
$Q = dp * K * h / (141.2 * u * Bo * \ln(Re/Rw))$		
Profundidade do reservatório	4300	m
Lâmina d'água	2200	m
Pressão do reservatório	10000	psia
Viscosidade	0.9	cp
Permeabilidade	70	md
Espessura	50	m
Raio de drenagem	10138	ft
Diâmetro do poço	8.5	in
Bo	1.25	RB/STB
Pressão hidrostática	5385	psi
Pressão na superfície	3211.9032	psi
API	29	
GOR	400	
Sg	0.7	
T	200	
So	0.881619938	
F	606.4251243	
Bo	1.2456	
Mínimo	Médio	Máximo
1450	10634	20567

Fonte: BP (2015).

Assim sendo, considerando os preceitos apresentados e as características esperadas para os reservatórios do Cretáceo Superior da Bacia de Barreirinhas, o cálculo da vazão de pior caso para as atividades de perfuração no Bloco BAR-M-346 foi de 10.634 bbls/dia, de acordo com a Lei de Darcy.

C) Estratigrafia

No **Anexo B**, ao final deste capítulo, é apresentada a Carta Estratigráfica da Bacia de Barreirinhas, incluindo a legenda das litologias, indicando os reservatórios almeçados, bem como as rochas fonte e também as rochas selantes. Os prognósticos indicam que os objetivos dos prospectos mapeados são areias depositadas em canais de talude soterrados de idades Santoniano (Bacuri), Coniaciano (Babaçu) e Turoniano (Cacau). As rochas geradoras são de idade Cenomaniano e as rochas selantes de idade Maastrichtiano-Campaniano.

A **Tabela II.5.1.2.4** abaixo apresenta as características dos reservatórios esperados em cada prospecto. A **Figura II.5.1.2.47** apresenta o principal sistema petrolífero identificado no Bloco BAR-M-346 relacionado à carta estratigráfica apresentada no **Anexo B**, ao final deste capítulo.

TABELA II.5.1.2.4 – Características esperadas do reservatório para cada poço.

Poço	Objetivo	Características do Reservatório
Babaçu	Coniaciano	Areias de canal de talude inferior
Bacuri	Santoniano	Areias de canal de talude
Cacau	Turoniano	Areias de canal de talude inferior

Fonte: BP (2015).

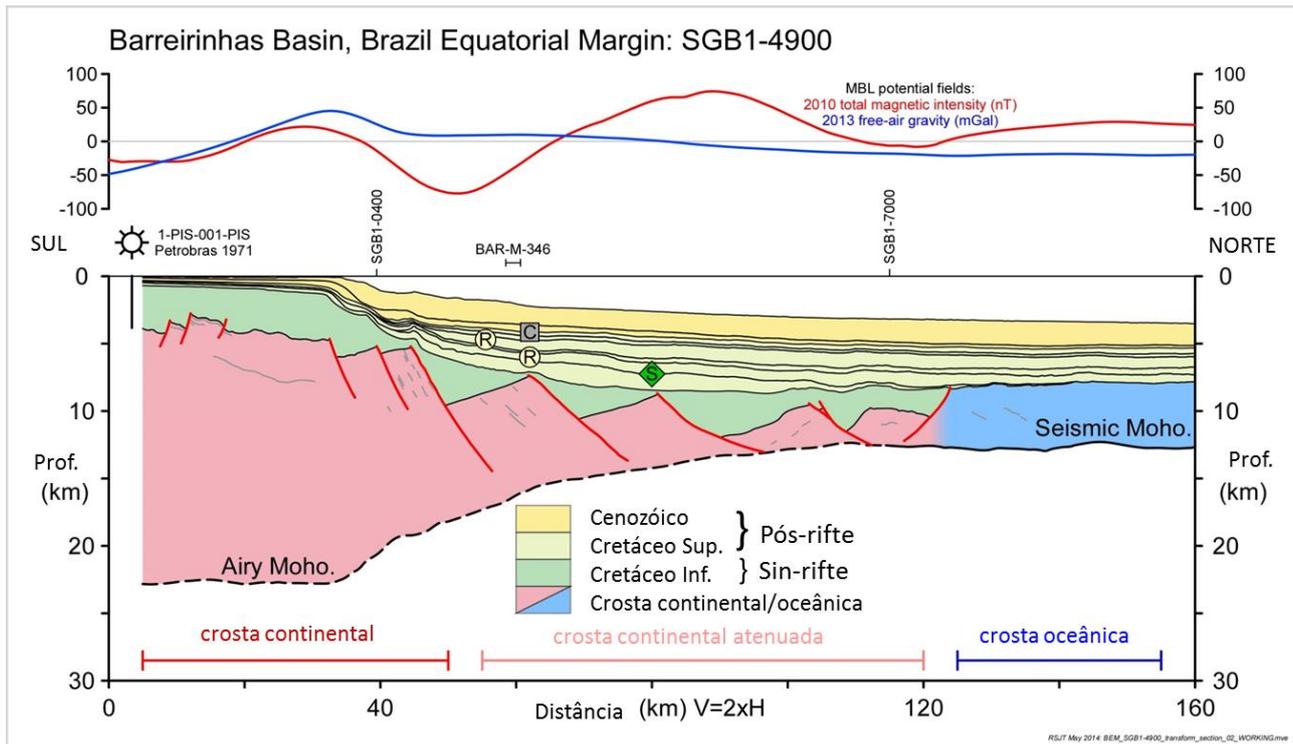


FIGURA II.5.1.2.47 – Esquema do sistema petrolífero para o Bloco BAR-M-346, apresentando as principais formações, bem como as rochas fonte (S), reservatório (R) e selantes (C).

Fonte: BP (2015).

A seguir são apresentadas as litologias esperadas (**Figura II.5.1.2.48**) para o prospecto Cacau no Bloco BAR-M-346. As previsões litológicas para os prospectos Bacuri e Babaçu estão sendo definidas e serão disponibilizadas assim que concluída a análise dos dados. A revisão e atualização das previsões geológicas para cada um dos três prospectos mapeados, Cacau, Bacuri e Babaçu, serão realizadas quando o dado sísmico 3D *spec* que está sendo levantado pela CGG, e inclui a área do Bloco BM-BAR-346, estiver disponível. A estimativa atual é que o resultado do processamento do dado sísmico 3D preliminar (*fast track*) esteja disponível no quarto trimestre de 2016, em torno do mês de Outubro.

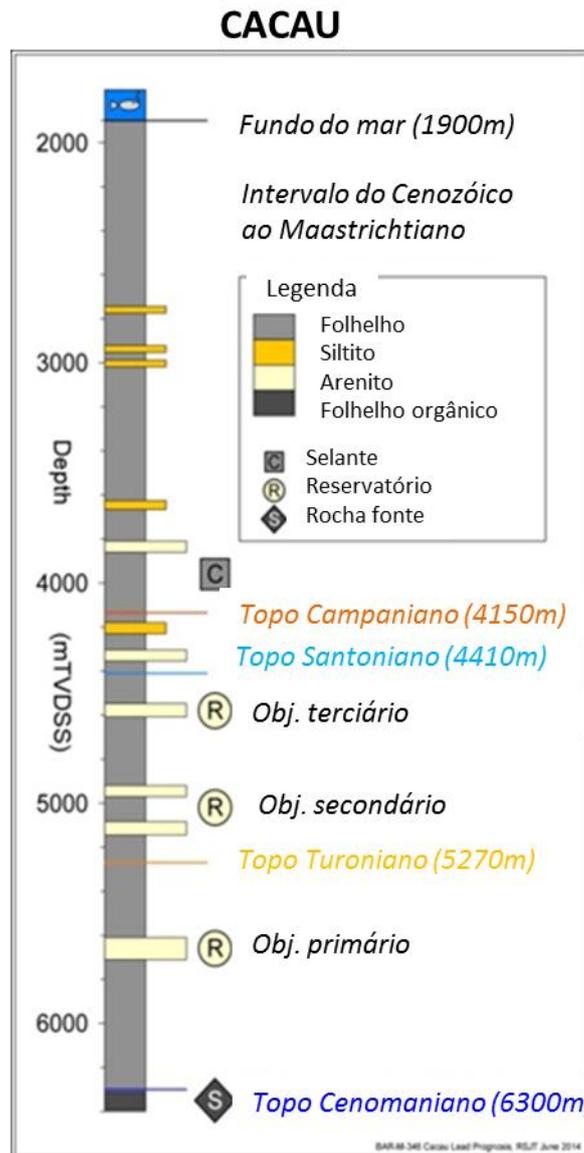


FIGURA II.5.1.2.48 – Previsão das litologias a serem perfuradas no prospecto Cacau.

Fonte: BP (2015).

D) Fisiografia

O Bloco BAR-M-346 localiza-se na Bacia de Barreirinhas onde a lâmina d'água varia de 1.645 m a 2.800 m. A avaliação das feições do fundo do mar foi feita a partir de três conjuntos de dados descritos a seguir:



- 1) *Multi-beam echosounder* (MBES) de 2013. Este conjunto de dados fornece cobertura completa da batimetria do Bloco BAR-M-346 com resolução de 15 m x 15 m *bins* e cobertura *backscatter* de 3 m x 3 m *bins*, contudo este não apresenta dados de boa qualidade;
- 2) Conjunto de sísmica 2D de baixa resolução com malha de grande espaçamento que não permite a identificação de pequenas feições. A interpretação da superfície rasa é limitada por conta da resolução temporal e espacial do dado;
- 3) Dados oriundos da aquisição de amostras (*box core*) e imagens do fundo marinho feitos com veículo de operação remota (ROV).

Os resultados serão atualizados quando novos dados de sísmica 3D que estão sendo adquiridos pela CGG na área do Bloco BAR-M-346 estiverem disponíveis, no segundo semestre de 2016.

A partir destes dados foi possível realizar a caracterização preliminar do fundo marinho e da sedimentação rasa na área do Bloco BM-BAR-346. Os resultados serão atualizados quando novos dados de sísmica 3D que estão sendo levantados pela CGG estiverem disponíveis. O horizonte que corresponde ao fundo do mar é derivado do dado *multi-beam echosounder* (MBES). As principais feições encontradas em superfície do Bloco BAR-M-346 são fluxo de detritos (*debris flow*), canais submarinos e escarpas (**Figura II.5.1.2.49**).

O fundo marinho e as camadas mais rasas apresentam evidências de antigos depósitos de fluxo de detritos. Os canais recentes do fundo do mar, considerados extensão de cânions submarinos que cortam a plataforma continental, atravessam o Bloco BAR-M-346 de Sul a Norte (**Figura II.5.1.2.49**). A natureza erosiva dos canais sugere que essas feições estiveram ativas no passado geológico recente (Terciário). No entanto, espera-se que os canais tenham sido preenchidos com sedimentos depositados em nível de mar baixo, e estejam atualmente inativos e, portanto, que fluxo de detritos é improvável de ocorrer durante a perfuração de um poço exploratório nesta área.

Devido à complexidade geral do fundo do mar, parece haver grandes áreas onde a instabilidade do talude que deverão ser evitadas, tais como canais submarinos e áreas próximas às escarpas. Em geral, a complexidade do fundo do mar diminui para o norte, embora ainda haja áreas de instabilidade que devem ser levadas em consideração quando houver a definição das locações de futuros poços na área.

Como estratégia de ocupação de área instável tem-se como recurso fundamental o uso de sísmica 3D que está sendo adquirida pela CGG, através do mapeamento detalhado do fundo do mar e, do ponto de vista sedimentar, pode-se reconhecer e mapear com boa precisão as áreas por onde passam canais e canyons submarinos, assim como, do ponto de vista estrutural, a identificação de olistostromas, de escarpas e de falhas que possam atingir a superfície ou próximo dela, além de permitir, quando presentes, o reconhecimento de elementos tais como vulcões de lama, chaminés de gás (*gas chimneys*), gás hidratado e bioconstruções que possam representar elementos de risco para as operações.

Ademais, se necessário, são feitos levantamentos de testemunhagem (piston cores) do fundo do mar e a inspeção do local antes do início das operações, através de imagens feitas utilizando veículo de operação remota (Remotely Operated Vehicle ou ROV). Dessa forma, reconhecendo os perigos na superfície ou próximo dela, na localização final dos poços, poderão ser identificados locais seguros para a perfuração,

iniciada com jateamento de tubo condutor de 36 polegadas, em posições que estejam fora da influência de todas as feições acima mencionadas, objetivando dar maior segurança às operações de perfuração. Além disto, por medida preventiva extra de segurança, antes do início da perfuração, são feitos ‘mapeamentos’ de poços de alívio, incluindo possíveis posições e geometrias, um completo programa de poço.

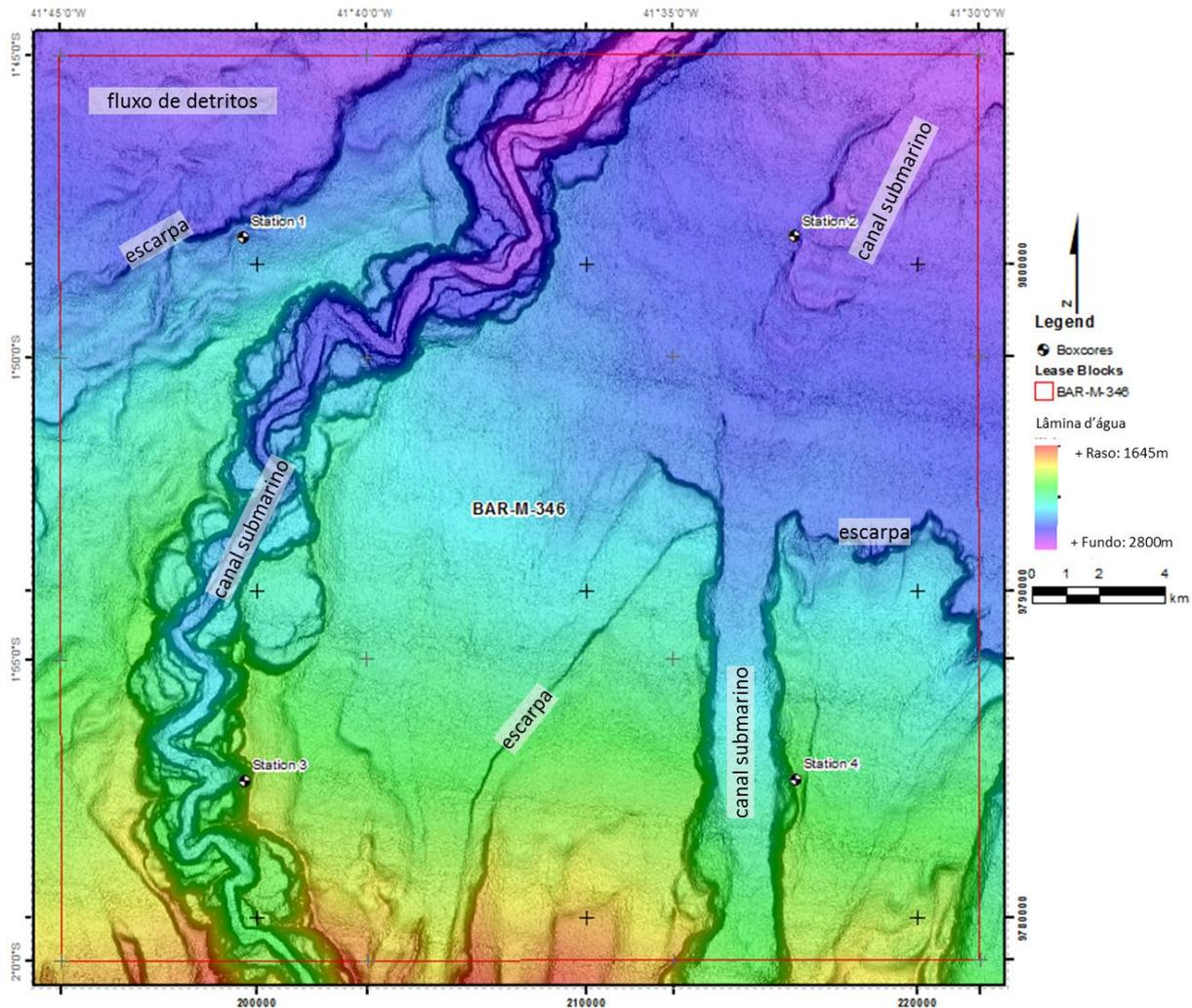


FIGURA II.5.1.2.49 – Mapa mostrando a variação da batimetria, de 1.645m a sul a 2.800m a norte, no Bloco BAR-M-346 e as principais feições do fundo do mar.

Fonte: BP (2015).

E) Faciologia

Com base nas amostragens de sedimentos (*box cores*) e filmagens do fundo do mar feitas, espera-se que os sedimentos em torno da margem dos canais submarinos sejam areias e siltes carbonáticos depositados de forma laminar. Estes tipos de sedimentos são decorrentes da falta de uma fonte significativa de sedimentos terrestres e da presença de correntes equatoriais fortes. A presença de sedimentos mais grossos nos canais é esperada e justificada pela deposição de material grosseiro durante os eventos de descarga do canal e pela dispersão de sedimentos mais finos devido às correntes de fundo (**Figura II.5.1.2.50**). Acredita-se que os sedimentos depositados na área do Bloco BAR-M-346 sejam mais competentes do que os encontrados em outras partes da Margem Equatorial.

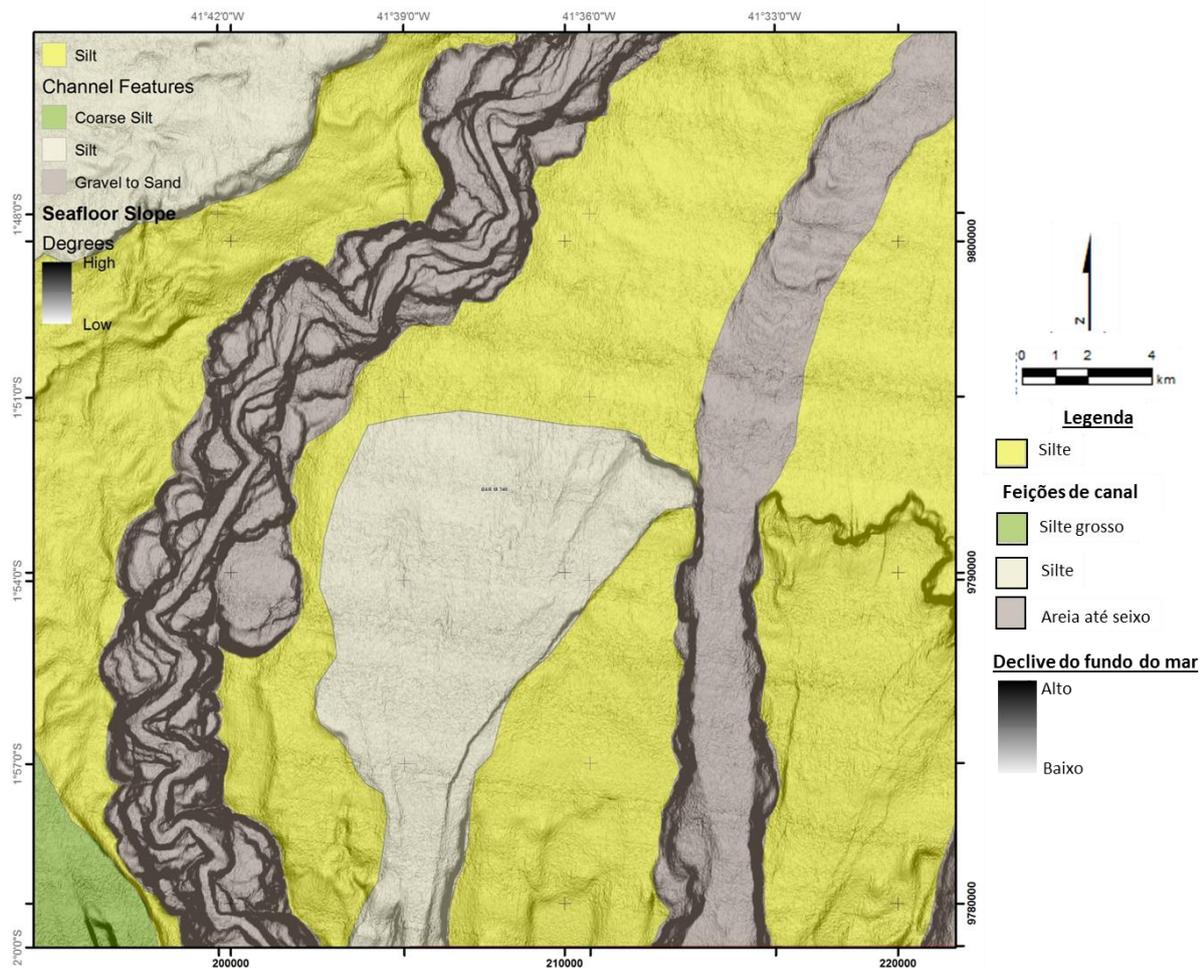


FIGURA II.5.1.2.50 - Mapa da área do Bloco BM-BAR-346 mostrando a distribuição dos sedimentos na superfície do fundo marinho.

Caracterização geotécnica com ênfase em fatores de risco geológico

➤ Possibilidade de ocorrência de movimentos gravitacionais de massa

A caracterização geotécnica foi realizada com base nas informações de sísmica 2D disponíveis para o Bloco BAR-M-346. No que diz respeito aos riscos de deslizamentos e desmoronamentos no bloco, embora ocorram evidências de feições do tipo fluxo de detritos e depósitos de transporte de massa (*mass transport deposits* – MTD), os dados disponíveis indicam que estes eventos ocorreram no passado geológico recente, estima-se que no Terciário. Desta forma, cabe ressaltar que não é esperada a ocorrência de deslizamentos ou fluxos de massa durante a atividade de perfuração no Bloco BAR-M-346.

Além disso, os canais modernos identificados, que são uma extensão dos cânions submarinos, atravessam o bloco no sentido Sul-Norte. Os canais erosivos sugerem que estas feições estiveram ativas em um período considerado recente da história geológica, mas com nível do mar mais baixo que o atual. Dessa forma, entende-se que estas feições não se encontram mais ativas. Ademais, não são esperados fluxos de sedimento ao longo dos respectivos canais que possam causar qualquer tipo de dano ao empreendimento. Todavia, vale ressaltar que é possível que fluxos turbidíticos de pequena escala possam ocorrer de forma pontual, mas a BP Energy do Brasil não espera que estes eventos causem danos à atividade.



Os resultados serão atualizados quando novos dados de sísmica 3D que estão sendo levantados pela CGG na área do Bloco BAR-M-346 estiverem disponíveis, no segundo semestre de 2016.

➤ **Presença de gás raso e/ou água rasa sobrepresurizada e de hidratos**

Não são observadas evidências geofísicas (anomalias de alta amplitude e baixa impedância) indicativas da presença de gás raso no Bloco BAR-M-346. Acredita-se que as anomalias observadas neste bloco estão relacionadas à mudança de litologia. No entanto, devido a limitação do dado sísmico 2D, considera-se que o risco da presença de gás raso seja moderado.

Os resultados serão atualizados quando novos dados de sísmica 3D que estão sendo levantados pela CGG na área do Bloco BAR-M-346 estiverem disponíveis, no segundo semestre de 2016.

➤ **Presença de falhamentos potencialmente reativáveis**

As primeiras camadas estratigráficas do Bloco BAR-M-346 foram avaliadas com base em levantamentos sísmicos 2D. Abaixo seguem as seções estudadas ao longo do bloco, bem como a localização das linhas sísmicas (**Figuras II.5.1.2.51 e II.5.1.2.52**). Nas figuras abaixo é possível visualizar diversas feições anteriormente descritas, como a presença de canais submarinos, anomalias de amplitudes, sedimentos laminados e depósitos de transporte de massa (MTD).

Com base nas informações sísmicas disponíveis, não foram identificadas falhas que chegam até a superfície do fundo marinho. O potencial para a presença de falhas que possam afetar o fundo Marinho é insignificante.

Os resultados serão atualizados quando novos dados de sísmica 3D que estão sendo levantados pela CGG na área do Bloco BAR-M-346 estiverem disponíveis, no segundo semestre de 2016.

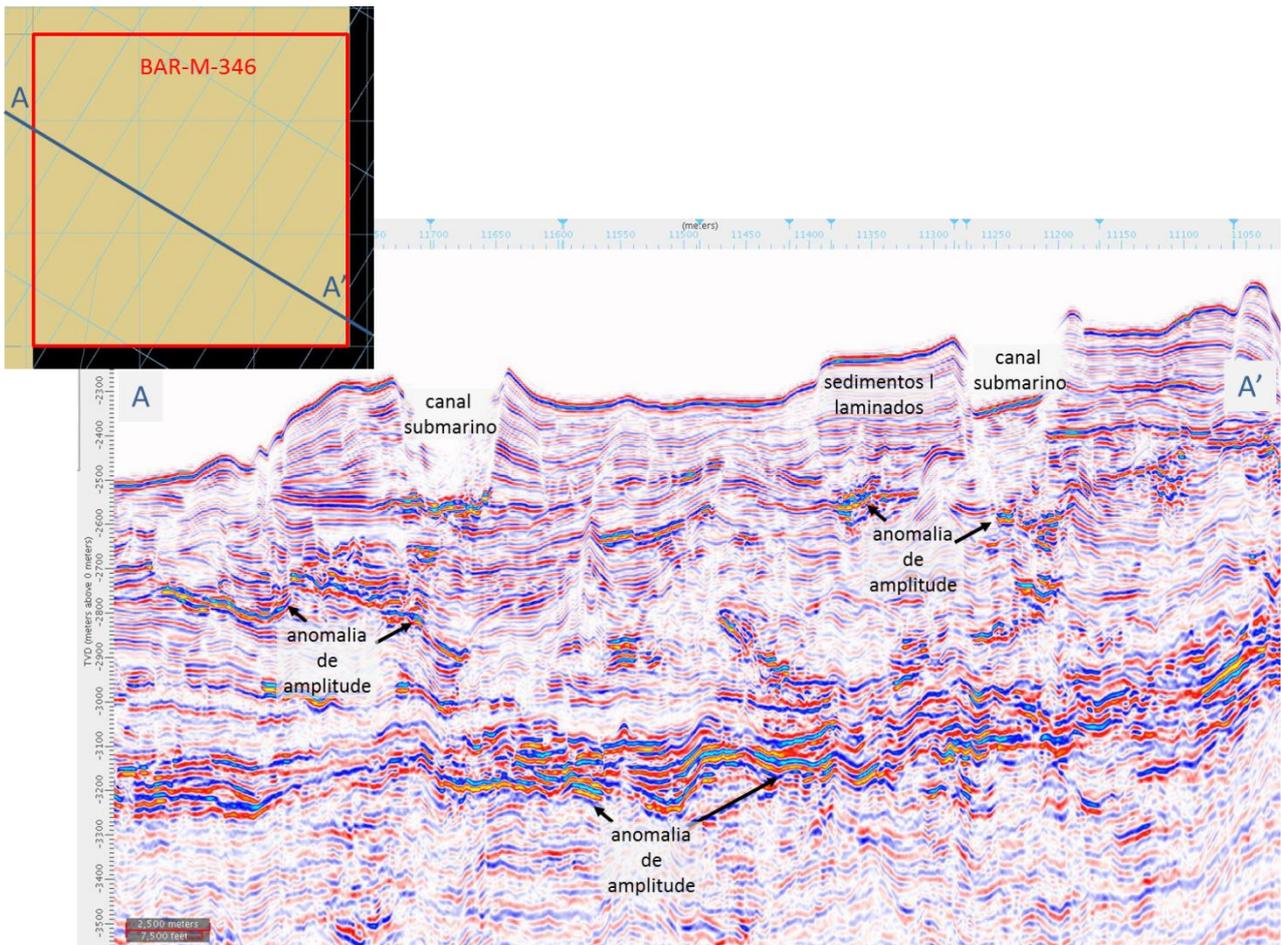


FIGURA II.5.1.2.51 – Sessão sísmica 2D identificando as principais feições superficiais do Bloco BAR-M-346: anomalias de amplitude, canais submarinos e sedimentos laminados.

Fonte: BP (2015).

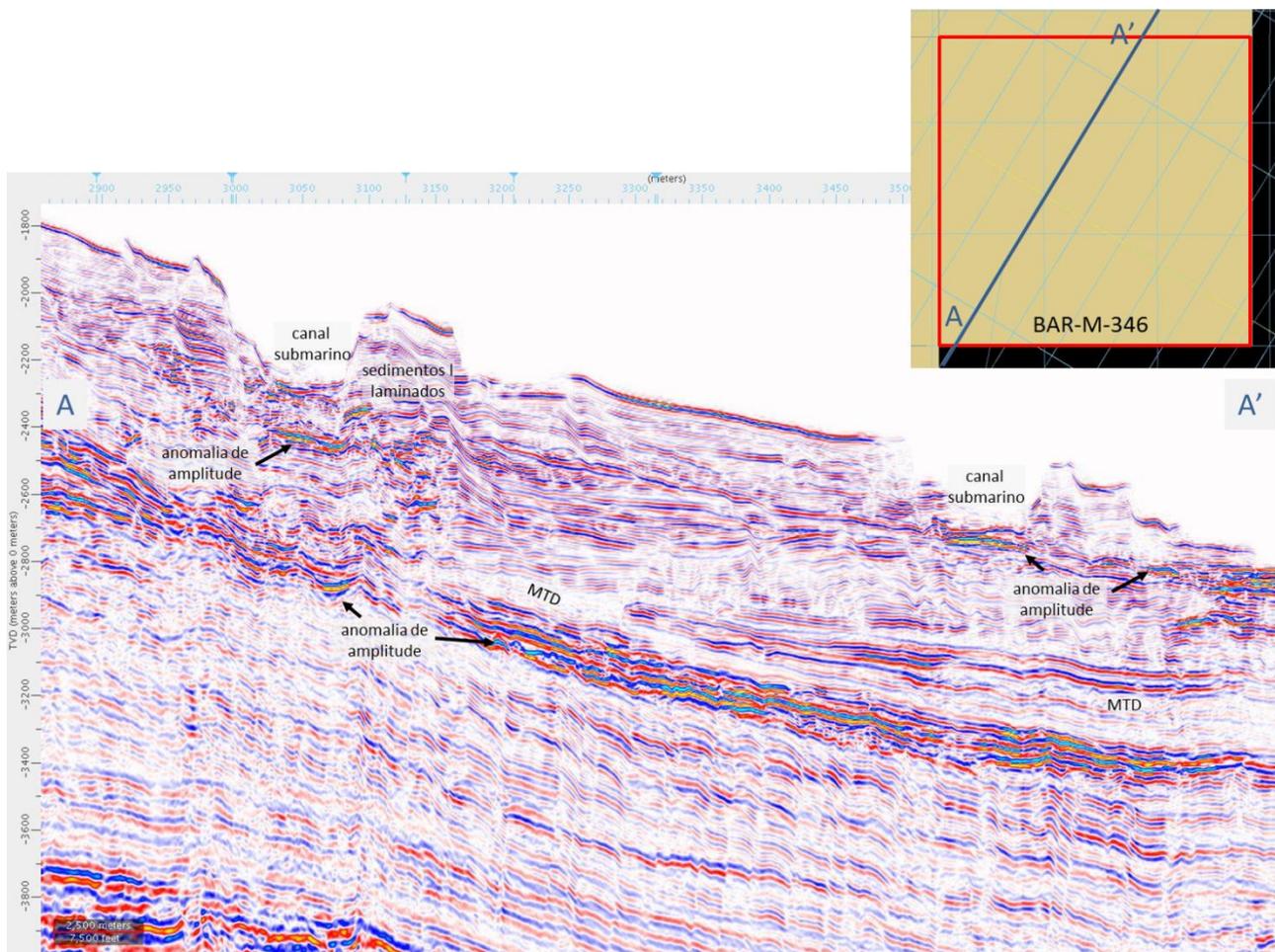


FIGURA II.5.1.2.52 – Sessão sísmica 2D identificando as principais feições superficiais do Bloco BAR-M-346: canais submarinos, anomalias de amplitude, sedimentos laminados e MTDs.

Fonte: BP (2015).

➤ **Possibilidade de falhamentos rasos afetarem ancoragens**

Nas atividades de perfuração previstas para o Bloco BAR-M-346 não estão previstas a utilização de sistemas de ancoragens, por conta das características oceanográficas da região e também da grande profundidade. Um navio sonda, responsável pela perfuração, possuirá um sistema de posicionamento dinâmico (*Dynamic Positioning - DP*) que o manterá na posição correta durante toda a atividade dispensando a necessidade de ancoragem.

➤ **Possibilidade de sismos tectônicos ou atectônicos originarem acidentes**

No que diz respeito à possibilidade de sismos afetarem o empreendimento, foi utilizado um mapeamento dos abalos sísmicos realizados pelo Centro de Sismologia do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG-USP) com mais de 100 anos de informações sismológicas para o território brasileiro (até 2012). Segundo este estudo, não existe registros de abalos sísmicos ocorridos diretamente sobre a área aproximada do Bloco BAR-M-36 (quadrado vermelho destacado na **Figura II.5.1.2.53**), embora existam

alguns registros de atividade sísmica nas proximidades da Bacia de Barreirinhas. Tais atividades, segundo IAG-USP (2013), estariam relacionadas a abalos intraplaca rasos de magnitudes que não ultrapassam 5,6° na escala Richter. Os períodos de ocorrência desses abalos variaram de 1926 (registro histórico) a 2007, sendo o mais próximo ao empreendimento ocorrido em 1988 com menos de 3° na escala Richter. Além disso, segundo FRANÇA & ASSUMPCÃO (2008), as regiões de maior importância com relação à atividade sísmica no Brasil seriam o Nordeste, Sudeste e Centro-Oeste.

Desta forma, analisando-se o espaçamento no período de ocorrência entre os sismos mais próximos a área do empreendimento proposto, entende-se que existe uma baixa frequência de eventos sísmicos na região. Assim sendo, a BP Energy do Brasil não espera que ocorram esses tipos de fenômenos durante a atividade de perfuração no bloco.

A **Figura II.5.1.2.53** apresenta o estudo realizado pelo IAG-USP (2013) contendo a localização e a intensidade dos abalos sísmicos ocorridos no Brasil até 2012.

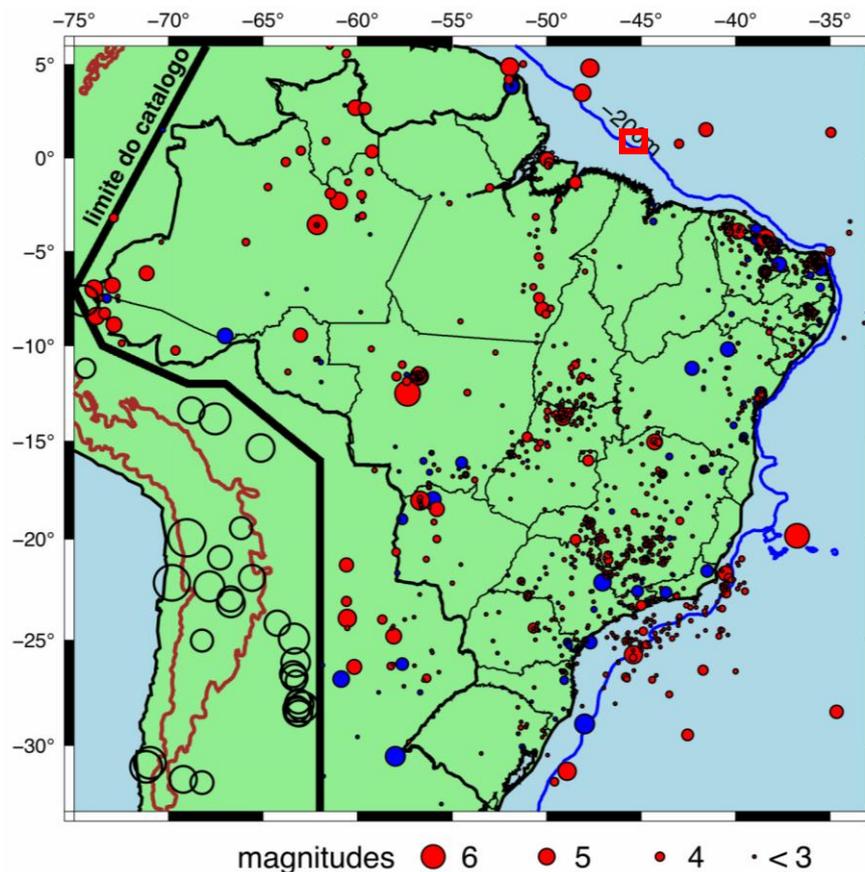


FIGURA II.5.1.2.53 – Epicentros do catálogo Sísmico Brasileiro. Os círculos vermelhos são eventos com magnitude Richter instrumental; os círculos azuis são eventos mais antigos com magnitudes estimadas (dados macrossísmicos, área afetada ou intensidade máxima); os círculos vazios são os sismos mais fortes sentidos no Brasil (epicentro nos Andes).

Fonte: IAG-USP (2013).



➤ **Possibilidades de danos ao reservatório**

Com relação à possibilidade de danos ao reservatório decorrente da atividade, esclarece-se que as condições dos reservatórios são virgens, pois nenhum desenvolvimento foi iniciado. Como consequência, nenhum risco relacionado à produção ou injeção é esperado. Na perfuração, não está planejada nenhuma injeção de fluidos dentro dos reservatórios. Somente em caso de descoberta nos reservatórios exploratórios, um teste de formação poderá ser realizado, com uma duração máxima de 72h, observada regulamentação específica da ANP. Sendo um teste de curta duração, não haverá nenhuma mudança significativa no regime de pressão ou nas propriedades geomecânicas do reservatório.

Além disso, previsões preliminares de pressão de poros e de fratura (cálculo da janela de perfuração) foram realizadas para a definição da arquitetura dos futuros poços e assegurar que o peso da lama esteja sempre entre a pressão de poros e fratura. Desta forma, não é esperada injeção de fluidos no reservatório induzindo pela variação de pressão maior que a capacidade de suporte da vedação do reservatório.

➤ **Presença de estruturas de escape de fluidos**

No que diz respeito a feições de escape de fluidos e vulcões de lama, espera-se que essas feições não ocorram na Bacia de Barreirinhas. Novos dados sísmicos 3D a serem adquiridos no Bloco BAR-M-346 poderão melhor esclarecer questões a respeito.

F) Análise da possibilidade de ocorrência de zonas de alta pressão no trajeto da perfuração

A modelagem preliminar de pressão de poros baseou-se exclusivamente em dados sísmicos 2D (**Figura II.5.1.2.54**) e sugere que o gradiente de pressão nos reservatórios no Bloco BAR-M-346 pode variar de 8,5 a 12,1 ppg.

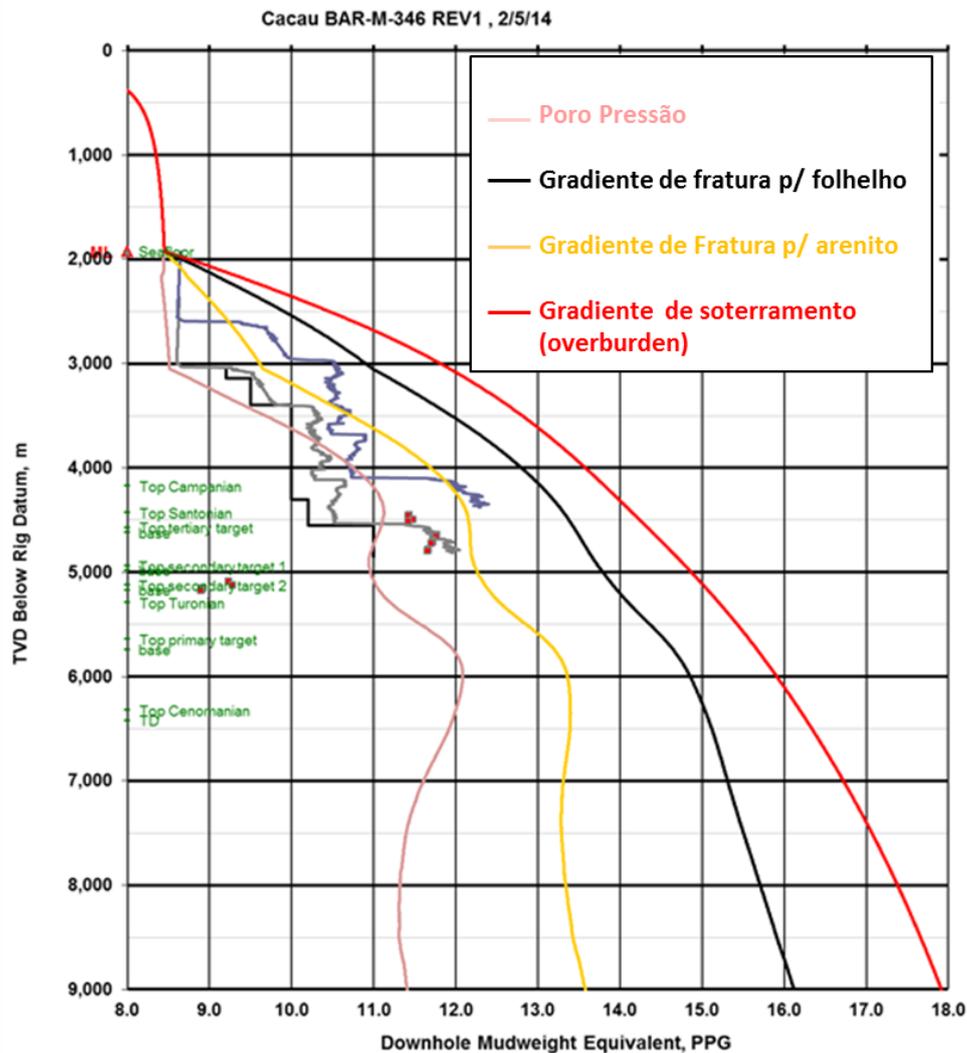


FIGURA II.5.1.2.54 – Gráfico de geopressões esperadas para a perfuração do prospecto Cacau, Bloco BAR-M-346.

Fonte: BP (2015).

Existem procedimentos de segurança previstos pela indústria de petróleo durante a perfuração de um poço com o objetivo permanente de manter o controle da pressão do mesmo. Desta forma, os procedimentos previnem eventuais desequilíbrios no sistema de fluidos, melhoram a resposta em caso de perdas de circulação e influxos de fluido (*kick*), e permitem retomar o controle do poço sem ocasionar prejuízos ao empreendimento e ao meio ambiente.

As análises completas de gradiente de fratura serão realizadas com base na nova sísmica 3D de alta resolução que está sendo adquirida pela CGG com cobertura total do Bloco BAR-M-346 a fim de fornecer informações sobre a pressão da formação dos intervalos a serem perfurados. A utilização do veículo operado remotamente (ROV) auxiliará na inspeção e identificação das condições geológicas do fundo marinho. As áreas de instabilidade serão evitadas durante a perfuração.



A equipe de perfuração da BP Energy do Brasil segue um plano de ação para o gerenciamento do risco de perda de controle do poço (*Risk Action Plan*). Este Plano, aplicável a todas as operações de perfuração de poços no país, estabelece as ações preventivas que devem ser colocadas em prática pela equipe antes e durante as atividades de perfuração. Entre essas ações estão a confecção do programa de poço, a seleção de equipamentos e serviços, a seleção da unidade de perfuração, a manutenção do balanço hidrostático do poço, a capacidade de resposta a fluxo superficial, o sistema de contenção de pressão do poço, a capacidade de resposta ao descontrole de poço (*kick*), a operação do sistema de BOP, a garantia de manutenção do posicionamento da unidade de perfuração e barcos de apoio, e a capacidade de reação a condições meteorológicas críticas e desastres naturais.

Os projetos de poço dos prospectos para o Bloco BAR-M-346 e os correspondentes Planos Operacionais de Perfuração se encontram em processo de preparação e avaliação, para que sejam aprovados em sua conformidade com os requerimentos globais da BP quanto às técnicas de engenharia aplicadas à perfuração de poços.

Para o BOP, equipamento essencial de segurança, são estabelecidos critérios de configuração de gavetas, sistemas de emergência, testes e verificações. Ainda de acordo com os requerimentos internos da BP, uma empresa terceirizada deverá fornecer certificação, logo antes do início das operações, atestando ter constatado os seguintes itens: 1) foi realizada inspeção física detalhada do BOP confirmando que o equipamento encontra-se apto a operar conforme as especificações do fabricante; 2) nenhuma modificação ou atualização eventualmente realizada no equipamento comprometeu o seu projeto ou operacionalidade; 3) os testes e manutenções regularmente realizados entre a perfuração de dois poços estão em conformidade com as recomendações do fabricante.

O sistema de emergência do BOP será testado antes de sua instalação. Os testes a serem realizados incluirão: o sistema hidráulico de emergência (*Emergency Hydraulic Backup System* ou EHBS), o sistema de desconexão de emergência (*Emergency Disconnect System* ou EDS), intervenção com ROV e *Pod* de Controle Acústico.

O BOP utilizado pela BP em todas as operações de água profunda possui 6 gavetas (3 de tubo, 2 cegas cislhantes e 1 cislhante de revestimento) e 2 anulares, e foi desenvolvido para resistir a uma pressão máxima de 15K psi, a maior hoje disponível no mercado. Além das manutenções e testes dirigidos ao BOP, as condições do seu sistema são monitoradas remotamente, durante toda a operação, através de um moderno sistema criado pela BP e de uso exclusivo da empresa, denominado EHAWK, com alarmes automáticos quanto a qualquer perda de funcionalidade do equipamento.

A fim de assegurar o controle rigoroso durante a perfuração, uma série de procedimentos preventivos será colocada em prática, a saber:

- Realizar testes de absorção (*leak off test*) e/ou integridade da formação e revestimento após o fim de cada operação de descida e cimentação de revestimento (com exceção apenas do condutor de 36");
- Testar a integridade da cimentação anular de todas as colunas de revestimento descendidas e de todos os tampões de cimento e mecânicos, com testes de pressão positiva e negativa (através de redução controlada de pressão hidrostática);



- Monitorar a pressão de poros e fratura durante a perfuração das diversas fases ou seções do poço. Tal monitoramento poderá ser realizado por meio do próprio monitoramento da sonda de perfuração, da perfilagem durante a perfuração (LWD) e das unidades de *mud logging*, calculando-se a pressão de poros com as medições de LWD e os parâmetros de perfuração (tais como velocidade da formação, taxa de penetração, peso sobre broca, rotação, vazão, etc.) e, também, através de monitoramento dos volumes nos tanques e fluxo de fluido de perfuração com alarmes visuais e sonoros, detectores de gás, características dos cascalhos, etc.;
- Usar o BOP para conter e controlar qualquer influxo indesejável, circulando para fora do poço e, depois, ajustando a densidade do fluido de perfuração para suportar a nova pressão de formação.
- Testar o BOP antes de sua descida na superfície, quando da primeira descida e conexão com a cabeça de poço, após a descida e cimentação de um novo revestimento, e com um intervalo máximo entre testes de 21 dias, incluindo *manifolds* e válvulas de segurança;
- Injetar glicol regularmente no BOP (*stack*) por meio do ROV da unidade de perfuração, com o objetivo de prevenir a formação espontânea de hidratos na cabeça do poço, e possuir estoque de metanol para uso caso seja necessário dissolver hidratos já formados na cabeça do poço;
- Monitorar permanentemente o nível do fluido de perfuração nos tanques através de sensores de fluxo durante a perfuração e do tanque de manobra (*trip tank*) durante as retiradas e descidas da coluna de perfuração;
- Sempre que for retirada a coluna ou durante paradas de perfuração e conexões, verificar se o nível do fluido de perfuração está estável no anular, observando se não há perda excessiva, nem influxo de fluido;
- Efetuar periodicamente o treinamento de Controle de Poço com o objetivo de assegurar que as equipes envolvidas na perfuração estejam capacitadas para o controle do poço e testar seus poderes de reação em situações inesperadas;
- Realizar diariamente reuniões com foco nos procedimentos de segurança e emergência relacionados com as operações em curso e as operações a serem futuramente realizadas;
- Manter quantidade adequada de baritina estocada na sonda para usar em caso de necessidade de aumentar a densidade do fluido de perfuração;
- Manter material de contingência estocado na sonda para uso caso seja necessário combater uma perda excessiva de fluido de perfuração para a formação;
- Trabalhar com um volume adequado de fluido de perfuração, mantendo permanentemente uma reserva de 200% do volume do poço aberto disponível durante a perfuração do condutor.



- Em caso de detecção de influxo indesejável (*kick*), o procedimento imediato é parar a perfuração e fechar o Preventor de Erupção – BOP. Este preventor isola o poço, prevenindo um influxo maior. As leituras das pressões no tubo bengala e no revestimento são utilizadas para se planejar e dar início à circulação do poço para retirada do fluido invasor (água, óleo ou gás) pelo método do Sondador ou do Engenheiro. Qualquer que seja o método adotado para circular o *kick*, após expulsar de forma controlada o fluido invasor do poço, aumenta-se a densidade do fluido de perfuração para exercer uma pressão hidrostática maior do que a da formação, a fim de prevenir novos influxos.