

II.5.1.2 Geologia e Geomorfologia

II.5.1.2.1 Geologia Regional

A) Localização

A Bacia do Pará-Maranhão (**Figura II.5.1.2.1**) é uma bacia marginal exclusivamente marítima incluída na região denominada Margem Equatorial Brasileira. Esta Bacia está localizada entre os meridianos 47°W e 44°W e paralelos 1°S e 1°N, possuindo uma área de 48.000 km². A mesma encontra-se limitada a oeste pela Plataforma da Ilha de Santana e a norte pela Fratura de São Paulo. Todavia, as fronteiras a noroeste com a Bacia da Foz do Amazonas e sudeste com a Bacia de Barreirinhas são consideradas arbitrárias e imprecisas. Isso se dá por conta de não se conhecer feições tectônicas significativas que atuem na compartimentação das bacias (SOARES *et al.*, 2007).

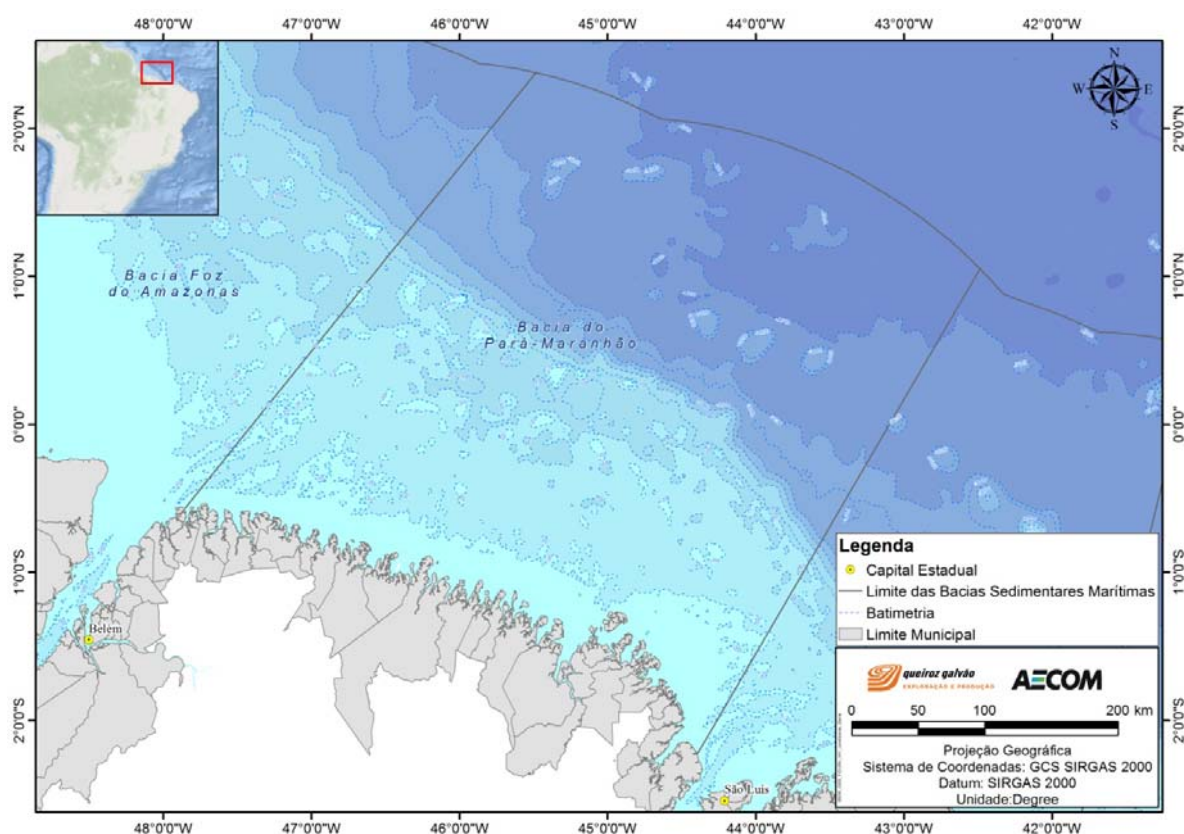


FIGURA II.5.1.2.1 – Mapa de localização da Bacia de Pará-Maranhão e bacias marginais adjacentes.

Fonte: AECOM

B) Geologia Regional

Três estágios evolutivos ocorreram no processo de formação da Margem Equatorial Brasileira, incluindo a Bacia do Pará-Maranhão, sendo eles: 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. Nestes períodos, as forças transtensionais criaram uma série de depocentros (MATOS, 1999a *apud* MOHRIAK, 2003).

O estágio sin-transformante, por sua vez, abriga regiões que foram dominadas a partir de transtensão por cisalhamento puro, sendo limitados por zonas cisalhantes discretas, como exemplo da Bacia de Barreirinhas (MOHRIAK, 2003), mas também por zonas de cisalhamento de transpressão e transtensão (*wrench*). Segundo este autor, na porção entre o Piauí e Ceará-Acaraú, são observadas grandes feições compressoriais (falhas de empurrão). Tais feições seriam resultado do encurtamento crustal e do soerguimento dos sedimentos que foram depositados anteriormente.

Já o estágio pós-transformante corresponde pela fase de margem passiva, no qual ocorre um contato contínuo das porções de crosta oceânica ao longo da falha transformante ativa. Segundo MATOS (1999) *apud* MOHRIAK (2003) essa fase é marcada pela constante subsidência e sedimentação na margem continental, originada e regulada pelo resfriamento da litosfera. A **Figura II.5.1.2.2**, abaixo, apresenta o modelo geodinâmico esquemático descrito no trabalho de MOHRIAK (2003) para a margem continental transformante.

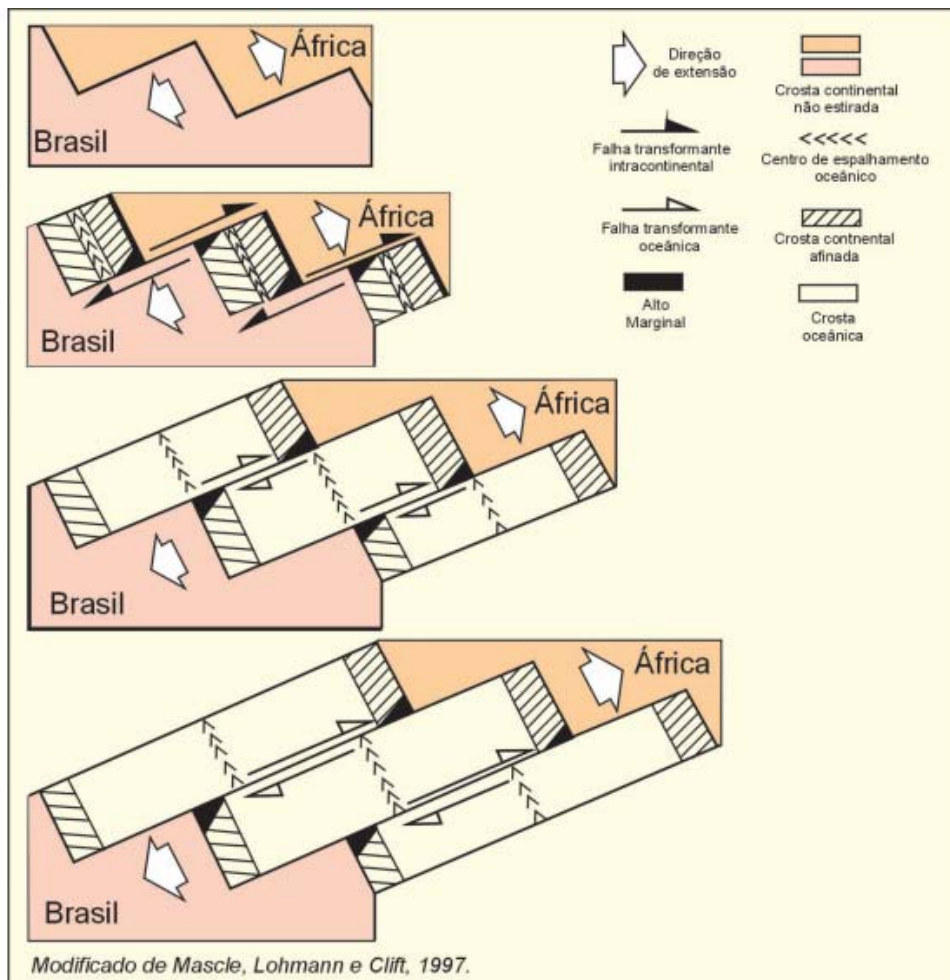


FIGURA II.5.1.2.2 – Modelo geodinâmico esquemático da margem continental transformante.

Fonte: MOHRIAK (2003).

Segundo SOARES JR. *et al.* (2011), a evolução do rifteamento e da paleogeografia da Margem Equatorial, no qual a Bacia do Pará-Maranhão está inserida, pode ser explicada da seguinte forma:

- Neotriássico: Marcado pela existência de um único continente (Pangea) e pelo Megaoceano Pantalassa. O ambiente estável foi rompido pelo evento magmático conhecido como ‘*Central Atlantic Magmatic Province*’ (CAMP), que fez com que as áreas da Foz do Amazonas, sudeste do Pará, sudoeste do Maranhão e região norte do Estado de Roraima, além de países vizinhos, sofressem soerguimento por conta de anomalias térmicas do manto astenosférico, seguidos de processos de magmatismo e rifteamento.

Os derrames do CAMP por sua vez alcançaram a superfície através de condutos registrados como sendo o enxame de diques do leste do estado do Amapá e também no Graben de Calçoene, sendo este o primeiro estágio de formação da Bacia da Foz do Amazonas. Os processos de separação da América do Norte, África e América do Sul formaram o Graben de Calçoene, que seria um braço abortado deste evento.

- Jurássico: Nas regiões próximas à Bacia do Parnaíba e do Graben de Calçoene ocorreu um processo de soerguimento, experimentando erosão intensa.
- Eocretáceo (**Figuras II.5.1.2.3 – A e B**) : ocorreram modificações marcantes na paisagem causadas pela separação entre a África e a América do Sul. No Barremiano, um novo evento de rifteamento com vulcanismo marcou a reativação de estruturas da Bacia da Foz do Amazonas, correspondendo à segunda fase *rift*. Também ocorreu a conexão de falhas normais das bacias de Marajó e da Foz do Amazonas, que passaram a atuar conjuntamente.
- No Eoalbio (**Figuras II.5.1.2.3 – C e D e Figura II.5.1.2.4 – A e B**), o bloco continental a ser separado da África foi definido a partir da formação das bacias do Pará-Maranhão e Barreirinhas. Houve a conexão destas duas bacias com a Bacia da Foz do Amazonas, compondo um único sistema de grabens onde dominavam sistemas marinhos, agora conectados com o Atlântico Central (SOARES JR. *et al.*, 2011). O Albiano é considerado o período mais importante para a configuração das bacias marginais da Margem Equatorial.

Durante este período, ocorreu a última etapa na separação dos continentes Africano e Sul-Americano e a ampliação do *Graben* de Cassiporé, seguida pela implantação da margem passiva e o início da formação das falhas transformantes de direção ENE-WSW, que seccionaram os *grabens* de direção NW-SE. O rifteamento ocorreu desde a Bacia do Ceará e formou as bacias de Barreirinhas (com incursão marinha) e Pará-Maranhão (ambientes lacustre e fluviais), e ocorreu também a criação de um novo sistema de falhas na Bacia da Foz do Amazonas.

- Ao final do Albiano (**Figuras II.5.1.2.4 – C e D**) ocorreu a ligação entre os oceanos Atlântico Equatorial e o Central, a partir do contínuo rifteamento da Bacia do Pará-Maranhão, e se deu por conta do movimento de rotação anti-horária da África em relação à América do Sul. Isto originou uma ingressão marinha na Bacia da Foz do Amazonas. Os grandes pacotes sedimentares encontrados nessa região evidenciam um rifteamento com grabens estreitos e profundos e com soerguimentos que podem ter atingido cotas altimétricas elevadas (SOARES JR. *et al.* (2011).

- Neocretáceo: este período foi marcado pela concentração de todo esforço extensional na porção Atlântica Equatorial, transformando as bacias da Foz do Amazonas, Barreirinhas e Pará-Maranhão em bacias de Margem Passiva (**Figuras II.5.1.2.5 – A, B, C e D**). O início da deriva continental na região impôs a atuação de falhas transcorrentes com direção de NE-SW nos *rifts* do Meio-Norte do Brasil, compartimentando os depocentros.
- No Eoceno a região experimentou clima tropical úmido, evidenciado por *red beds* sem evaporitos, na Bacia do Amazonas. Esta era a única região onde ainda ocorria deposição de sedimentos, no início do Cenozóico. 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 mais expressivamente (SOARES JR. *et al.*, 2011).
- O intervalo do Eoceno ao Oligoceno marcou a fase mais intensa de colisão entre as placas Sul-Americana e Nazca, resultando na instalação da cadeia andina. A ascensão gradual dos Andes pode 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).
- 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. 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, 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 (SOARES JR. *et al.*, 2011).

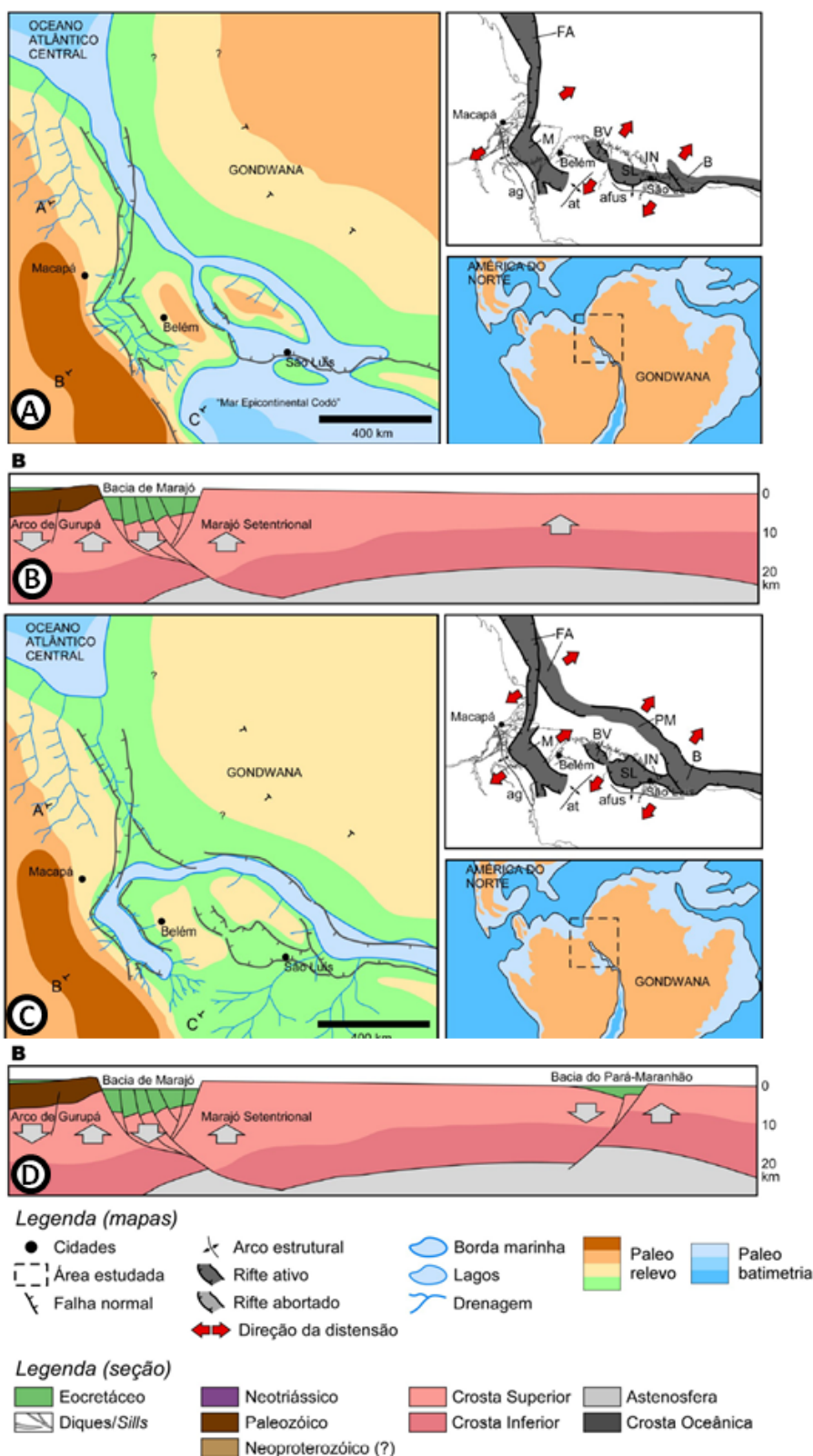


FIGURA II.5.1.2.3 – Paleogeografia e perfil esquemático da evolução da Margem Equatorial Brasileira durante o Eocretáceo (A e B) e durante o Eoalbio (C e D).

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

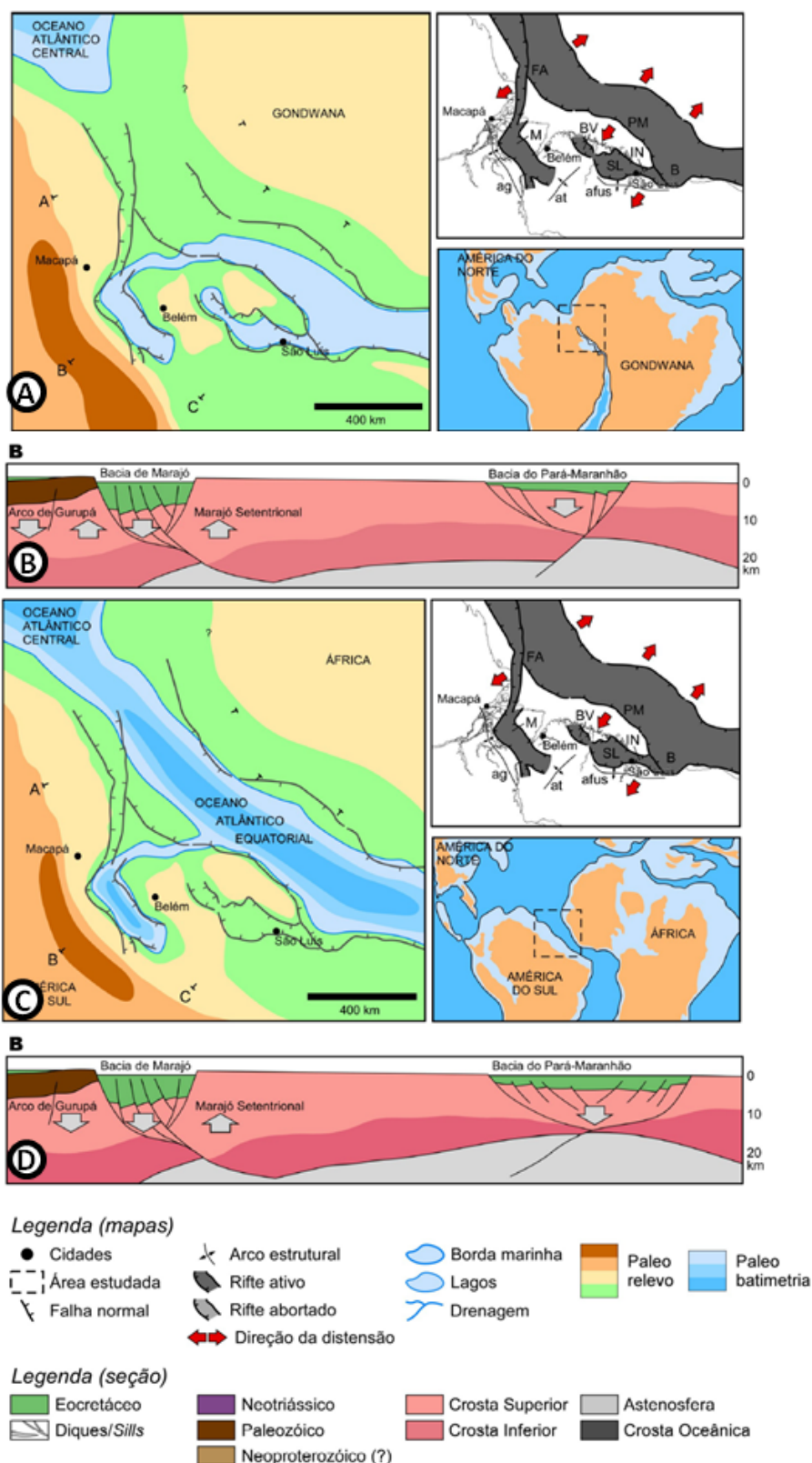


FIGURA II.5.1.2.4 – Paleogeografia e perfil esquemático da evolução da Margem Equatorial Brasileira durante o Albiano médio (A e B) e durante o final do Albiano (C e D).

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

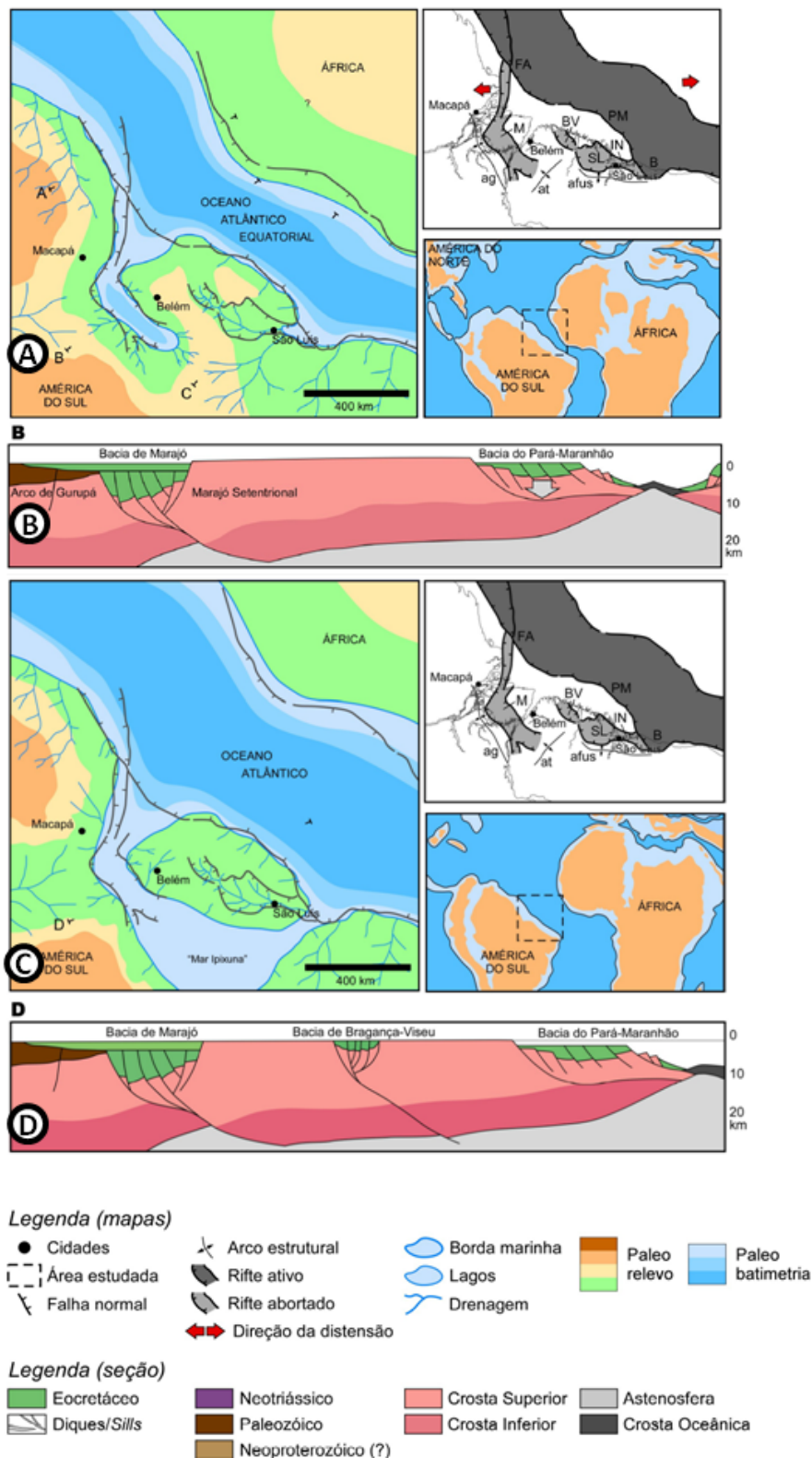


FIGURA II.5.1.2.5 – Paleogeografia (A e C) e perfil esquemático da evolução da Margem Equatorial Brasileira (B e D) durante Neocretáceo.

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

Assim sendo, SOARES JR. *et al.* (2011) concluíram que algumas bacias da Margem Equatorial Brasileira possuíram seu desenvolvimento interrompido, enquanto outras se desenvolveram a partir do fracionamento continental e formação da margem passiva. Além disso, após a separação dos continentes Sul-Americano e Africano as paleotensões foram redefinidas no sentido E-W conforme o surgimento de zonas transformantes na crosta oceânica.

Todavia, SOARES *et al.* (2007) caracterizou a Bacia do Pará-Maranhão como estando em uma situação oblíqua na margem equatorial, com direção NO-SE. Ou seja, neste trecho, a separação continental se assemelha a uma bacia de margem passiva. Esta separação se iniciou através de dois eventos de rifteamento no Aptiano e Albiano. Entre esses eventos, que são caracterizados por depocentros nítidos e camadas de crescimento, uma sequência homogênea com refletores plano-paralelos foi depositada, sendo esta relacionada à Formação Codó. Dessa forma, por conta de suas características, esta sequência indica que ocorreu uma interrupção no processo de rifteamento, sendo depositada em uma bacia do tipo *sag* pós-*Rift* II ou *sag* Pré-*Rift* III. Já a fase *Drift* tem início no final do Nealbiano até o recente.

C) Geologia Estrutural

MOHRIAK (2003) caracterizou a evolução tectono-sedimentar da margem equatorial brasileira com base em uma extensa revisão bibliográfica. De acordo com este autor, a Margem Equatorial é caracterizada pela ocorrência de falhas de borda do *rift* subparalelas às falhas transformantes (E-W). Além disso, esta região da Margem Continental brasileira apresenta variados estilos tectônicos, desde falhas normais de *rift* até falhas inversas (Bacia do Ceará) e dobramentos associados a falhas de transcorrência. Também é notável a tectônica gravitacional apresentando um cinturão de dobramentos associados, que ocorrem além do talude das Bacias da Foz do Amazonas, Pará-Maranhão e Barreirinhas (MOHRIAK, 2003).

A **Figura II.5.1.2.6** abaixo apresenta as principais feições estruturais identificadas por MOHRIAK (2003) para a Margem Equatorial Brasileira.

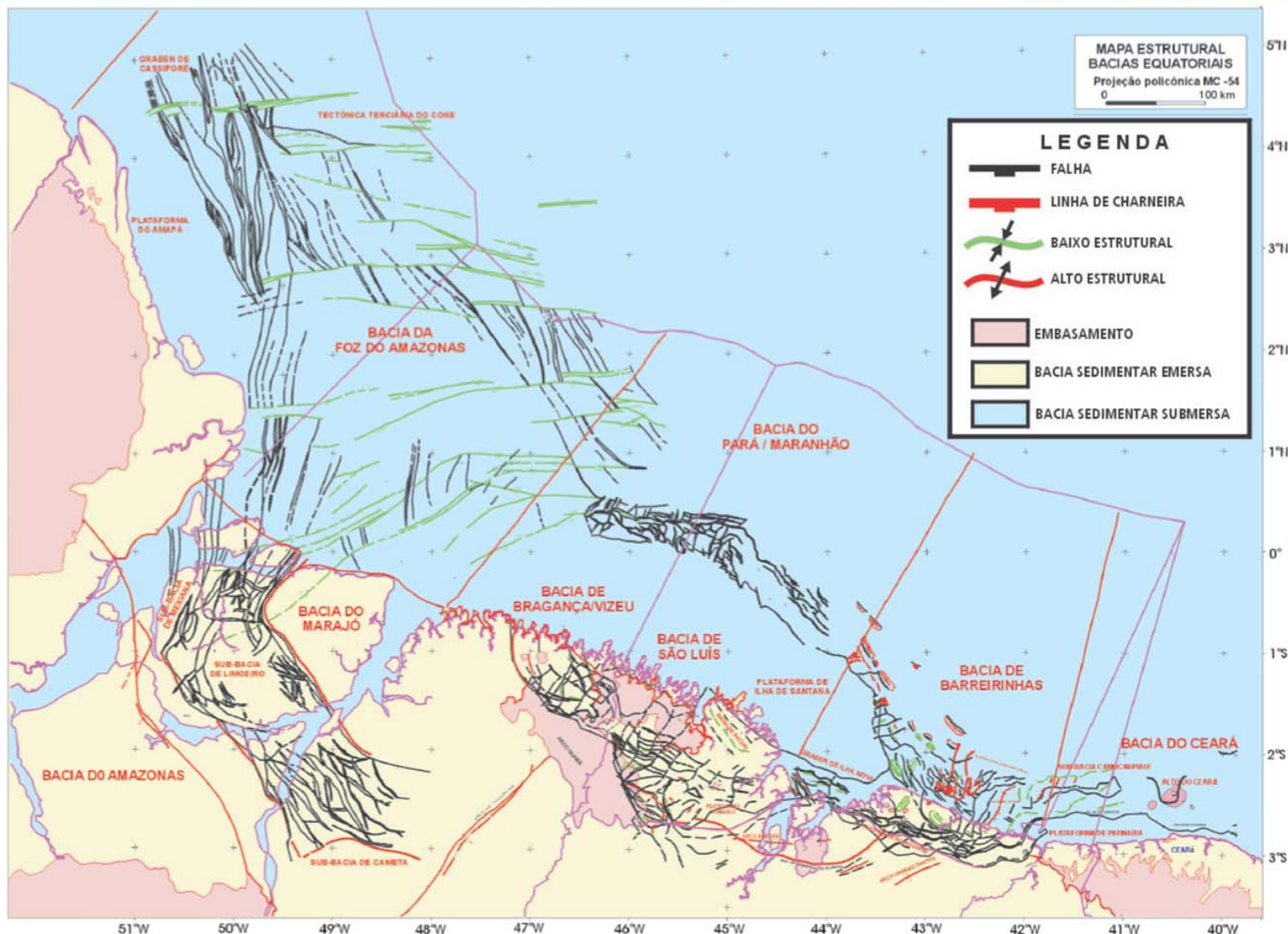


FIGURA II.5.1.2.6 – Principais feições estruturais das bacias que compõem a Margem Equatorial brasileira e áreas adjacentes.

Fonte: MOHRIAK (2003).

MOHRIAK (2003), identificou que na região da Bacia do Pará-Maranhão ocorre um alto vulcânico associado a zonas de fratura (**Figuras II.5.1.2.7**), além de um cinturão de dobramentos na região do sopé do talude (**Figuras II.5.1.2.8**), cuja origem pode estar associada a processos de colapso gravitacional na plataforma, bem como compressão na área de crosta oceânica, especialmente nos pontos afetados por zonas de fratura.

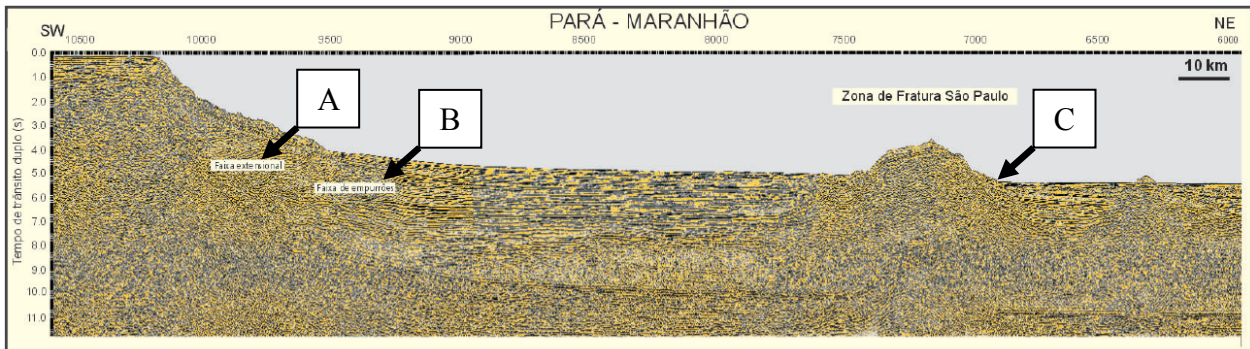


FIGURA II.5.1.2.7 – Perfil sísmico evidenciando a presença das seguintes feições: A - Faixa Extensional, B - Faixa de Empurrões e C - Alto Vulcânico associado a Zona de Fratura de São Paulo.

Fonte: MOHRIAK (2003).

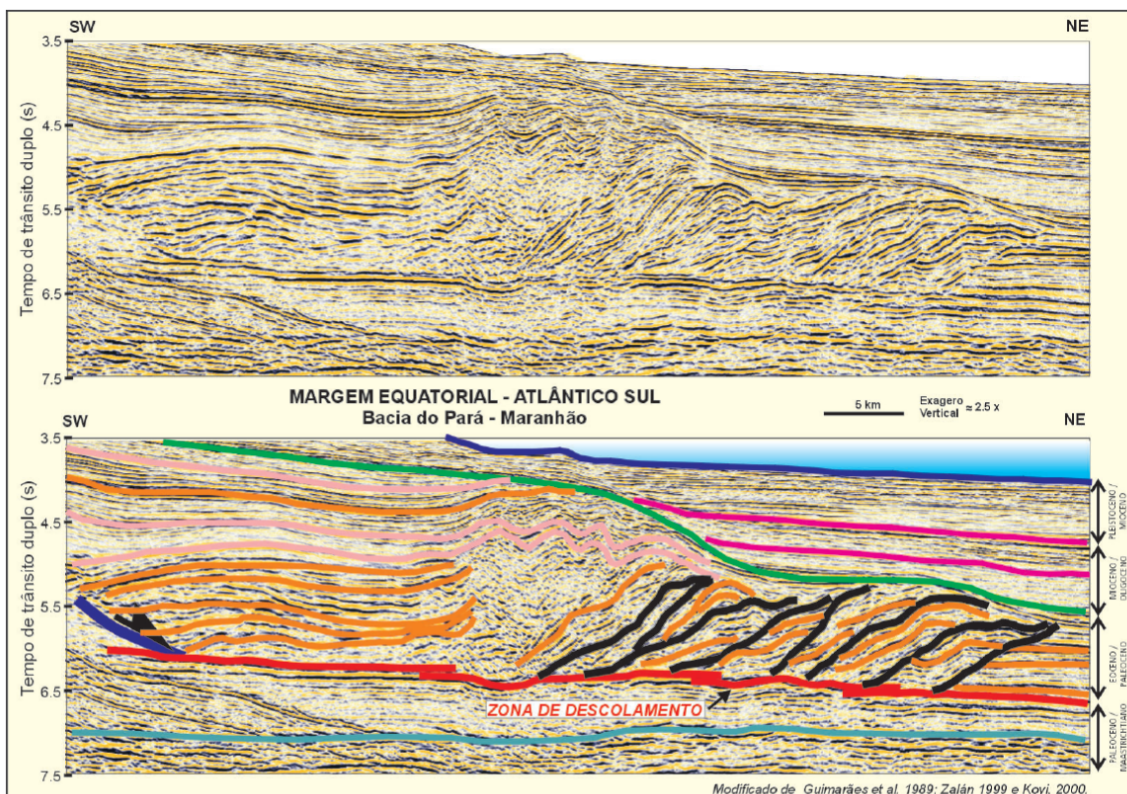


FIGURA II.5.1.2.8 – Perfil sísmico evidenciando a presença de um cinturão de dobramento na área de quebra de plataforma, talude e bacia profunda adjacente a Bacia do Pará-Maranhão.

Fonte: MOHRIAK (2003).

Uma seção geológica esquemática da Bacia do Pará-Maranhão é apresentada abaixo (**Figura II.5.1.2.9**), evidenciando as principais estruturas e formações da bacia. O **Mapa II.5.1.2.1** contendo as principais estruturas da Bacia do Pará-Maranhão, é apresentado no **ANEXO A**, ao final deste item.

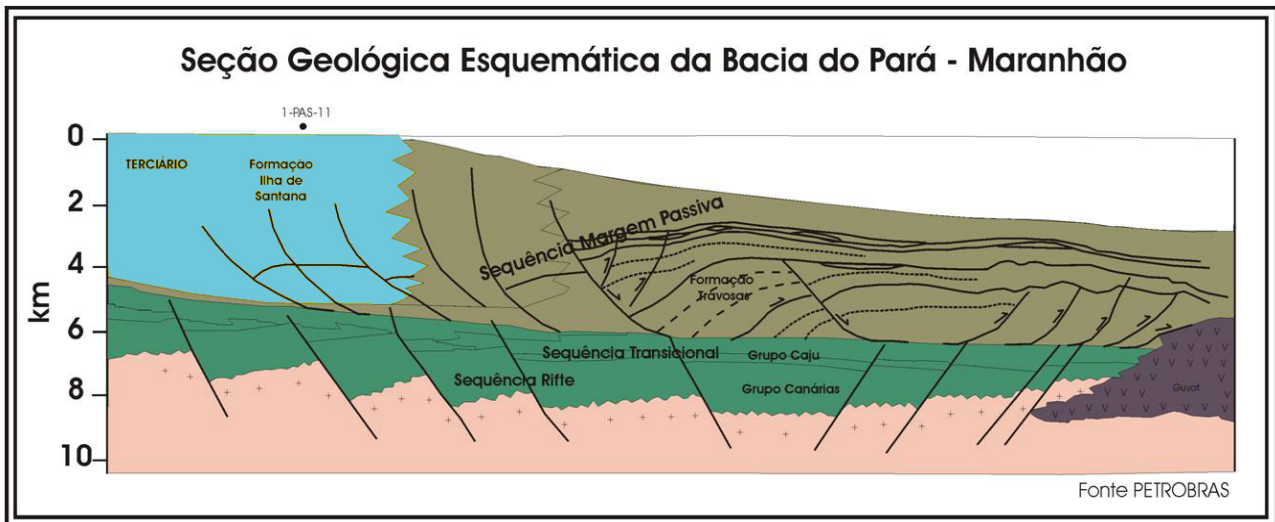


FIGURA II.5.1.2.9 – Perfil esquemático da Bacia do Pará-Maranhão, indicando as principais estruturas e idades de sedimentação.

Fonte: ANP (2011).

D) Estratigrafia

A estratigrafia da Bacia do Pará-Maranhão foi estudada inicialmente por BRANDÃO & FEIJÓ (1994) com base em 29 poços já perfurados na região e 45.500 km de linhas sísmicas. Estes autores dividiram a estratigrafia da bacia em três grupos, sendo eles Grupo Canárias, Grupo Caju e Grupo Humberto de Campos. A nomenclatura é igual a da Bacia de Barreirinhas, por conta da similaridade entre essas duas bacias.

- Grupo Canárias: é composto por arenito lítico cinza-claro, fino a grosso, imaturo, siltito cinza a castanho-avermelhado e folhelho cinza-médio a esverdeado. Entendeu-se que estes sedimentos foram depositados em um ambiente deltaico marinho durante o Mesoalbio.
- Grupo Caju: composto por arenito quartzoso médio a grosso, folhelho escuro e calcarenito bioclástico e oncolítico de forma local. Estes ambientes teriam sido depositados em um ambiente nerítico de alta e baixa energia.
- Grupo Humberto de Campos: é composto por arenito quartzoso branco, grosso, da Formação Areinhas, nas regiões mais proximais. No mesmo período foi depositado o pacote carbonático da Formação Ilha de Santana, que foi formado por uma grande variedade de biocalcarenitos e biocalciritos nas regiões de plataforma mais rasa além de calcarenitos finos e calcilitos na plataforma externa. Na região do Talude ocorrem margas, folhelhos, lamitos seixosos e também turbiditos. Nas áreas mais distais também foram identificados folhelhos cinzentos, e siltitos da Formação Travosas intercalados com arenitos quartzosos finos.

De acordo com BRANDÃO & FEIJÓ (1994), é possível identificar as seguintes sequências:

- Sequência *Rift* - esta sequência representa os clásticos continentais e neríticos eoalbianos do Grupo Canárias que foram depositados no *rift* que por sua vez deu origem ao Oceano Atlântico.
- Sequências de Margem Passiva – as sequências K70 - K80 representam carbonatos e clásticos marinhos regressivos do Grupo Caju (Neoalbiano), que representam o estágio inicial de formação do Oceano Atlântico. Os arenitos Areinhas, carbonatos da Ilha de Santana e folhelhos Travosas foram depositados em um sistema costeiro-plataforma-talude-bacia, que agregam as sequências: K90(Cenomaniano ao Santoniano), K100 - K110 (Campaniano), K120 (Maastrichtiano), T10 (Paleoceno), T20 - T40 (Eoceno a Oligoceno) e T50 - T60 (Mioceno ao Holoceno).

SOARES *et al.* (2007) estudou as sequências deposicionais da Bacia do Pará-Maranhão com base em informações diversos trabalhos realizados pela PETROBRAS, além de realizar uma revisão bibliográfica sobre a bacia. Adicionalmente, visando a atualização do conhecimento a respeito desta bacia, este mesmo autor reinterpreto informações de poços existentes e linhas sísmicas disponíveis para a bacia, aplicando-se novos conceitos sobre estratigrafia de sequências.

Mesmo com a tentativa de atualização dos conhecimentos referentes à sedimentação na Bacia do Pará-Maranhão, estes autores mantiveram a nomenclatura proposta pelo trabalho de BRANDÃO & FEIJÓ (1994) seguindo o mesmo padrão apresentado para a Bacia de Barreirinhas (FEIJÓ, 1994). As sequências e descrições apresentadas a seguir estão relacionadas à carta Estratigráfica Formal da Bacia do Pará-Maranhão, apresentada na **Figura II.5.1.2.10** e no **ANEXO B**.

Desta forma, estes autores descrevem a estratigrafia de sequências da Bacia do Pará-Maranhão (**Figura II.5.1.2.10**) como sendo divididos em: Embasamento, Supersequência Intracratônica, Supersequência *Rift* e Supersequência *Drift*, descritas a seguir:

- Embasamento: a Bacia do Pará-Maranhão está desenvolvida sobre o Cráton de São Luís, que teve a sua ruptura de maneira ortogonal em relação a sua trama estrutural durante o processo de separação da América do Sul da África. Este *rift* tem geometria de meio-*graben* com borda flexural a sudoeste (Plataforma da Ilha de Santana) e borda falhada a nordeste, sendo que esta última está situada na sua bacia conjugada na costa africana, na Costa do Marfim.

O limite norte da bacia é regulado praticamente pela Fratura Oceânica de São Paulo. Esta fratura nucleou-se na região de contato entre a Faixa Móvel Araguaia/Gurupi (neoproterozóico) e da Faixa Móvel Santa Luzia-Viseu (Cráton de São Luís - paleoproterozóico). A região de sutura entre os dois domínios Cráton São Luís acabou por condicionar uma mudança no trend e na estrutura da Bacia do Pará-Maranhão, como também no Arco do Gurupi (que divide as bacias de Bragança-Viseu e São Luís).

- Supersequência Intracratônica: assim como na Bacia de Barreirinhas, a Bacia do Pará-Maranhão apresenta refletores plano-paralelos na porção inferior das seções sísmicas. Todavia, diferente da Bacia de Barreirinhas, não se pode atribuir uma idade a mesma. A idade devoniana foi sugerida por esses autores por conta da similaridade e por ser conhecida a ocorrência na bacia conjugada na costa africana (Gana), onde estes são produtores no campo de Takoradi. Em termos de Litoestratigrafia estes correspondem ao Grupo Caniné, sendo da base para o topo constituídos pelas Formações Itaim (arenitos), Pimenteiras (folhelhos) e Cabeças (arenitos).
- Supersequência *Rift*: 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 do Pará Maranhão. Estudos sísmicos evidenciaram alguns depocentros pouco desenvolvidos controlados por falhas de bordas com sentido NO-SE e O-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: é composta pela Formação Codó, agregando calcilitos e folhelhos lagunares, com espessura relativamente constante, de acordo com a assinatura sísmica. Evidências sismoestratigráficas e a localização desta sequência indicam que esta se formou em um ambiente de bacia tipo *sag* inter-*rifts*. Desta forma, os autores entenderam que deveriam classificar este depósito como sendo do tipo *sag* pré-*rift*.
 - Sequência K60: é composta por sedimentos siliciclásticos, continentais a parálicos correspondendo a leques deltaicos. Em termos litoestratigráficos, esta sequência corresponde ao Grupo Canárias. Camadas carbonáticas no grupo Sin-*rift* III foram identificadas em alguns poços que foram perfurados na porção central desta bacia (1-MAS-12 e 1-MAS-11).
- Supersequência *Drift*:
 - Sequência K70 – K82: esta seção foi correlacionada à Bacia de Barreirinhas por conta da ausência de informações de microfósseis e palinórfos que correspondam a essa idade na bacia. Na Bacia de Barreirinhas, esta sequência é o início da seção *drift*, 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), calcilitos, margas e folhelhos da Formação preguiças, além dos clásticos depositados em ambiente marinho raso da Formação Peria.

Até o momento da descrição realizada por SOARES *et al.* (2007), as únicas evidências do Grupo Caju na Bacia do Pará-Maranhão são camadas carbonáticas no topo da Sequência *Rift*.

 - Sequência K84-K86: Depositada acima da plataforma mista do Grupo Caju está a sequência siliciclástica que é delimitada em seu topo por uma discordância intraturoniana. Esta por sua vez possui grande correlação com uma significativa queda global do nível dos mares.

- Sequência K88-K90: esta sequência possui cerca de 12 Ma, sendo limitada ao topo pela discordância na porção intermediária do Campaniano. Esta discordância possui uma excelente correlação com a variação eustática global, sendo este período relacionado ao um rebaixamento do nível do mar. A discordância do Meso-campaniano, conjuntamente com discordância do *break up*, são as duas principais discordâncias da Margem Equatorial Brasileira.
- Sequência K100-K120: teve duração de ~9 Ma, tendo o seu topo marcado por uma discordância de cerca de 70 Ma. Esta discordância, embora apresente uma relação com um rebaixamento global do nível do mar, este não apresentou características fortes o suficiente que possam inferi-lo como responsável por essa discordância. Todavia, estudos de fissão de apatita evidenciaram que nesse período ocorreu um soerguimento das áreas continentais da Margem Equatorial. Assim sendo, estima-se que um evento tectônico poderia estar relacionado a ocorrência dessa discordância, que possui um controle tectono-eustático.
- Sequência K130-E20: Esta sequência teve início ao final do Cretáceo Superior, se estendendo até o Paleoceno Superior, com duração de ~12 Ma. Esta sequência tem o seu limite superior marcado pela presença de uma discordância, com boa correlação com a curva eustática global, que neste período apresentou um nível de mar em acentuada queda. Durante o Maastrichtiano se estabeleceu uma plataforma carbonática incipiente, que se expandiu até dominar toda a plataforma continental ao contrário das bacias vizinhas, Barreirinhas e Foz do Amazonas, que tiveram o desenvolvimento dessa plataforma carbonática apenas durante o Paleoceno. Embora o início desta sedimentação carbonática, a sedimentação siliciclástica permaneceu predominante nesta sequência. A sedimentação que se inicia no Maastrichtiano é conhecida litoestratigraficamente como a Formação Ilha de Santana, sendo representada por biocalcarenítos e biocalcirruditos nas áreas de plataforma rasa e calcarenitos finos e calcilitos na plataforma externa.
- Sequência E30: esta sequência é limitada ao topo por um hiato bioestratigráfico ao sul da Bacia, sendo esta agrupada com a sequência seguinte, formando a Sequência E30-E50. Nesta sequência a plataforma carbonática é ampliada e adquire um caráter misto conforme depósitos siliciclásticos deltaicos se intercalam localmente à sedimentação carbonática. Conforme a expansão da plataforma carbonática, a sedimentação siliciclástica é represada em uma área cada vez mais proximal. Somente em regiões com a influência de rios de maior drenagem é que a sedimentação siliciclástica tem capacidade de sobrepor a plataforma carbonática, formando uma sedimentação de caráter misto.
- Sequência E40-E50: Esta sequência de aproximadamente 8 Ma. marca a expansão da plataforma mista, sendo caracterizada pela deposição de arenitos deltaicos da Formação Areinhas, intercalados com carbonatos da Formação Ilha de Santana. Esta sequência é limitada na sua porção superior a uma superfície erosiva importante no Mesoeoceno, onde ocorreram sistemas de vales incisos que escavaram a plataforma carbonática. Na porção de águas profundas ocorre o início do processo de tectônica gravitacional, sendo responsável pela formação de falhas lítricas em domínio extensional. Tais falhas ocorrem no talude e no início da bacia, passando ao domínio transicional, a partir de anticlinais suaves e

posteriormente a domínio compressivo dominado por amplas frentes de empurrão, conforme avança para águas profundas. Assim sendo, a deformação causada por essa tectônica causou alterações no assoalho marinho da época, determinando a ocorrência de altos e baixos estruturais. Os altos estruturais tornaram-se sujeitos a erosão e os baixos a acomodação dos rejeitos das falhas lítricas e no flanco anterior as frentes de empurrão. Tais espaços se tornaram propícios à acumulação de sedimentos, posteriormente, até o Mioceno Superior.

- Sequência E60-E70: Esta sequência é limitada por duas discordâncias, identificadas a partir de hiatos deposicionais em poços, sendo correlacionada com a queda no nível do mar. Nesta sequência ocorre um aumento na presença de dolomitos, originado a partir do rebaixamento do nível do mar, permitindo dessa forma que o lençol freático percolasse dentro da plataforma carbonática exposta. No que diz respeito a ocorrência de magmatismo neste período, evidências magnetométricas indicam a ocorrência de indícios de magmatismo extrusivo, todavia esta interpretação é meramente especulativa, uma vez que não foram amostradas tais rochas nesta seção. O tectonismo teria especial importância na tectônica gravitacional instalada na porção de águas profundas da porção norte da bacia, pois o relevo estrutural poderia ter servido como anteparo aos cavalgamentos do domínio compressional. Nesta sequência a plataforma carbonática adquire um caráter agradacional.
- Sequência E80-N10: Esta sequência teve duração 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.
- Sequência N20-N30: Quase totalmente restrita ao Mioceno Médio (Langhiano e Serravaliano), esta sequência apresenta um magmatismo básico estimado como sendo Mesomiocênico. A datação dessas rochas foi realizada com base em correlação estratigráfica com estratos de idade inferida, sismicamente em situação de *onlap* por sobre corpos ígneos. Especula-se que este evento se trata de vulcanismo, embora não existam dados conclusivos.
- Sequência N40-N50: Esta Sequência foi depositada em 10 Ma. e é caracterizada pelo avanço da plataforma carbonática, se confundindo com a Bacia de Barreirinhas. Também ocorreu uma importante progradação dos sistemas deposicionais costeiros, reconhecida como 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. No Holoceno a sedimentação foi pouco significativa, restringindo-se ao retrabalhamento da seção clástica na plataforma interna/média e por acúmulo de sedimentos carbonáticos retrabalhados na borda da Plataforma Continental.

Como mencionado, a carta estratigráfica formal da bacia é apresentada no **ANEXO B** em formato A3, ao final deste item. Entretanto, uma versão em menor escala é apresentada na figura a seguir:

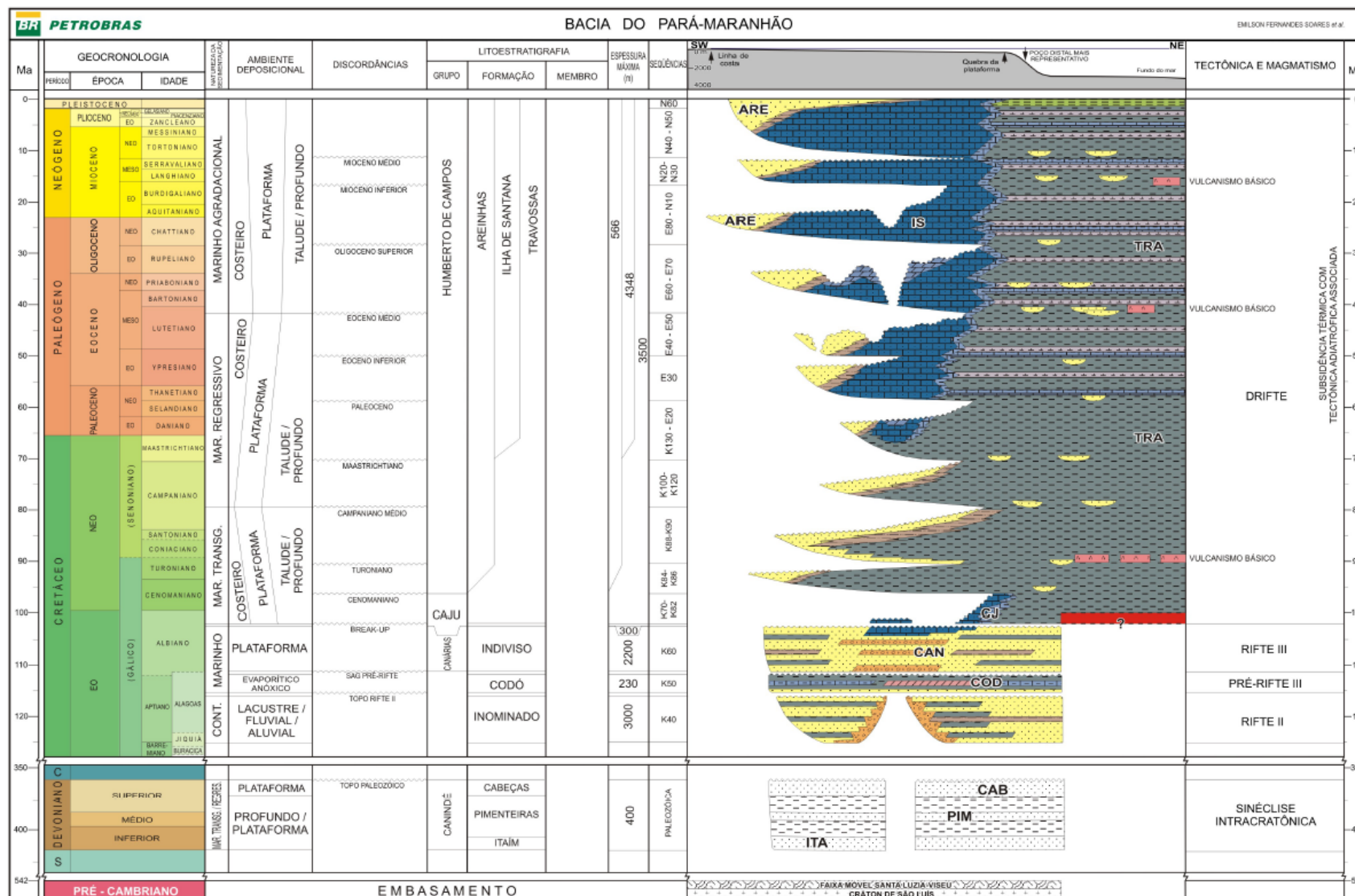


FIGURA II.5.1.2.10 – Carta estratigráfica formal para a Bacia do Pará-Maranhão.

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

E) Geologia do Petróleo

Atividade exploratória na Bacia teve início em 1978, com a perfuração de dois poços pioneiros (1-MAS-5 e 1-MAS-8) e seguiu até 1993, com a perfuração do poço 1-PAS-23. Em 1978 foi perfurado o primeiro poço produtor subcomercial de óleo (1-MAS-0005-MA) (ANP, 2011). O resultado mais expressivo ocorreu em 1981, a partir do poço 1-PAS-11, resultando na primeira produção na área, obtendo óleo leve e gás (ANP, 2007; ANP, 2011). O primeiro poço em águas profundas na Bacia ocorreu em 1993 (1-PAS-0025-PA). A retomada de investimentos exploratórios ocorreu em 2011, com a perfuração do poço 1-BRSA-903-PAS. Este último poço foi classificado pela ANP como sendo portador de petróleo. A **Tabela II.5.1.2.1** abaixo apresenta os prospectos testados para a Bacia do Pará-Maranhão. A **Figura II.5.1.2.11** evidencia todos os poços já perfurados na bacia.

TABELA II.5.1.2.1 – Prospectos testados na Bacia do Pará-Maranhão, incluindo o ano, as características do reservatório e o tipo de descoberta.

Poço/Ano	Características do Reservatório	Tipo de descoberta e características do hidrocarboneto
1-PAS-9 (1979)	Associados a falhas de crescimento.	Descoberta de óleo 38° API.
1-PAS-27 (2011)	Associados a calcarenitos fraturados	Óleo recuperado de 41° API
1-PAS-11 (1981)	Associados a falhas de crescimento.	Descobridor de campo com óleo 40 -44° API.
1-MAS-12 (1980)	Associados a calcarenitos fraturados	Descoberta de óleo 35,6° API
1-MAS-16 (1982)	Associados a falhas de crescimento.	Descoberta de óleo (API não determinado).
1-MAS-19 (1982)	Associados a falhas de crescimento.	Descoberta de gás.
1-PAS-21 (1984)	Associada a dobramentos.	Descoberta de óleo e gás.
1-MAS-5 (1978)	Associada a dobramentos.	Descoberta de óleo 34° API e gás.
1-MAS-17 (1983)	Areias turbidíticas do talude clástico.	Descoberta de óleo 37° API e gás.
1-MAS-11 (1979)	Areias turbidíticas do talude clástico.	Descoberta de óleo 27-41,5° API e gás.

Fonte: ANP (2007)

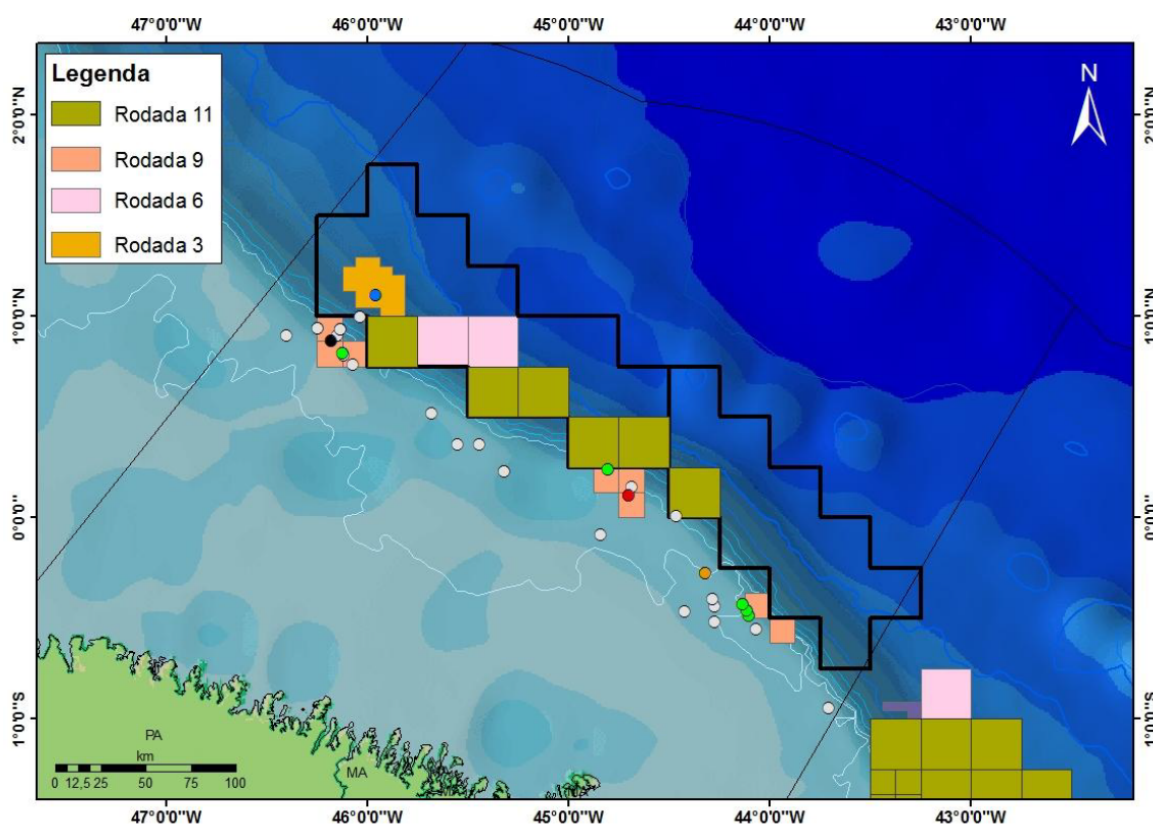


FIGURA II.5.1.2.11 – Mapa de localização dos poços perfurados na Bacia do Pará-Maranhão.
 Fonte: ANP (2011).

O poço 1-PAS-11 (**Figura II.5.1.2.12**) teve sua descoberta em 1981, perfurado a uma profundidade de lâmina d'água de 67 m. A sua rocha Reservatório era composta por calcarenitos eocênicos fraturados, localizados a uma profundidade de 4.280 m a 4.328 m. O fluido óleo/condensado encontrado variou de 40° a 44° API, e teve uma produção acumulada de 0,42 MM bbl de óleo/condensado e 0,31 MM boe de gás até 1984 (ANP, 2007).

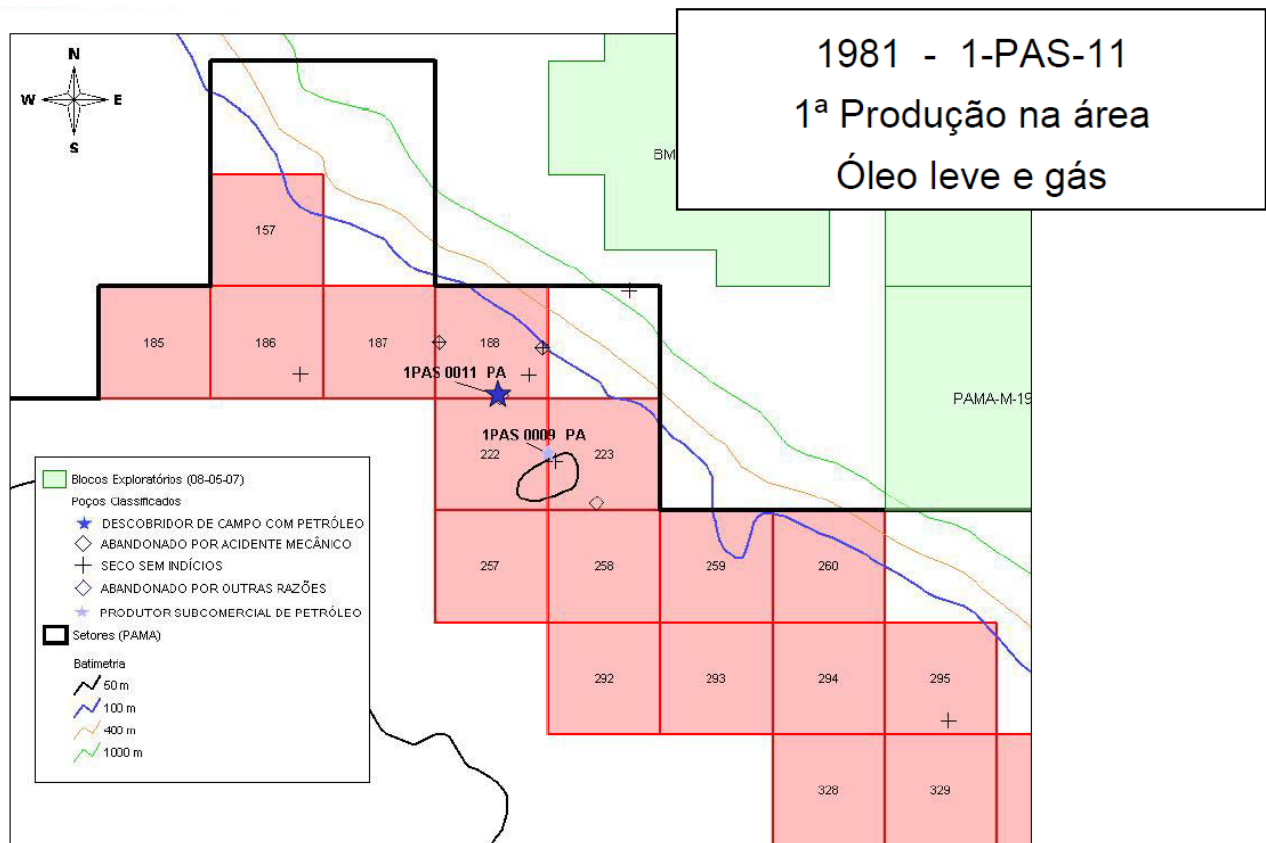


FIGURA II.5.1.2.12 – Mapa de localização do poço 1-PAS-11, que obteve a primeira produção de óleo leve e gás na Bacia do Pará-Maranhão.

Fonte: ANP (2007).

O sistema petrolífero da Bacia do Pará-Maranhão (**Figuras II.5.1.2.13 e II.5.1.2.14**) é composto por rochas geradoras da Sequência Pré-*rift* III (Formação Codó) do Eoaptiano, (composta por folhelhos escuros lacustrinos) com COT de 1 % a 5 % e Querogênio tipo I e II, Supersequência *Drift* (Grupo Caju) do Nealbioano ao Cenomaniano (folhelhos negros) com COT de 1% a 5% e Querogênio tipo II e um possível gerador da Supersequência *Drift* (Formação Travossas) do Turoniano (folhelhos) com COT de 0,5% a 1,7% e Querogênio tipo II e III (ANP, 2011). A migração dos hidrocarbonetos ocorre a partir de falhas lítricas das seções transicional e margem passiva, falhas planares da fase *rift* e do contato direto entre as rochas geradoras e reservatório (ANP, 2007; ANP, 2011).

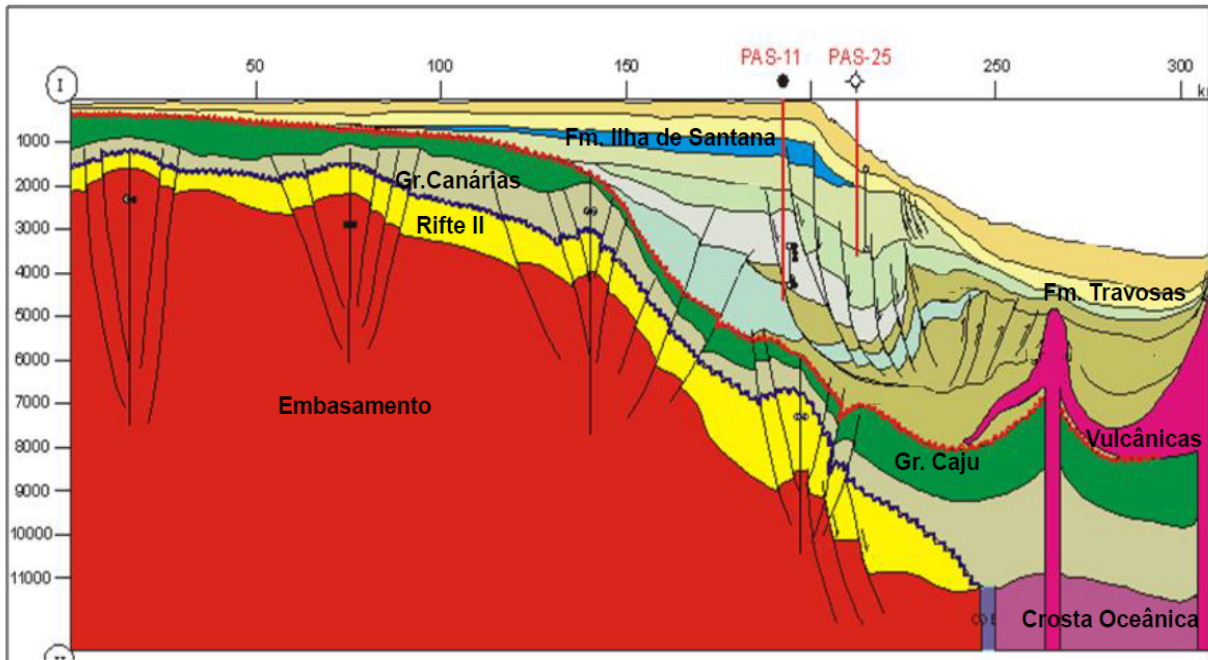


FIGURA II.5.1.2.13 – Seção esquemática da Bacia do Pará-Maranhão indicando as principais seqüências estratigráficas e feições estruturais.

Fonte: ANP (2011).

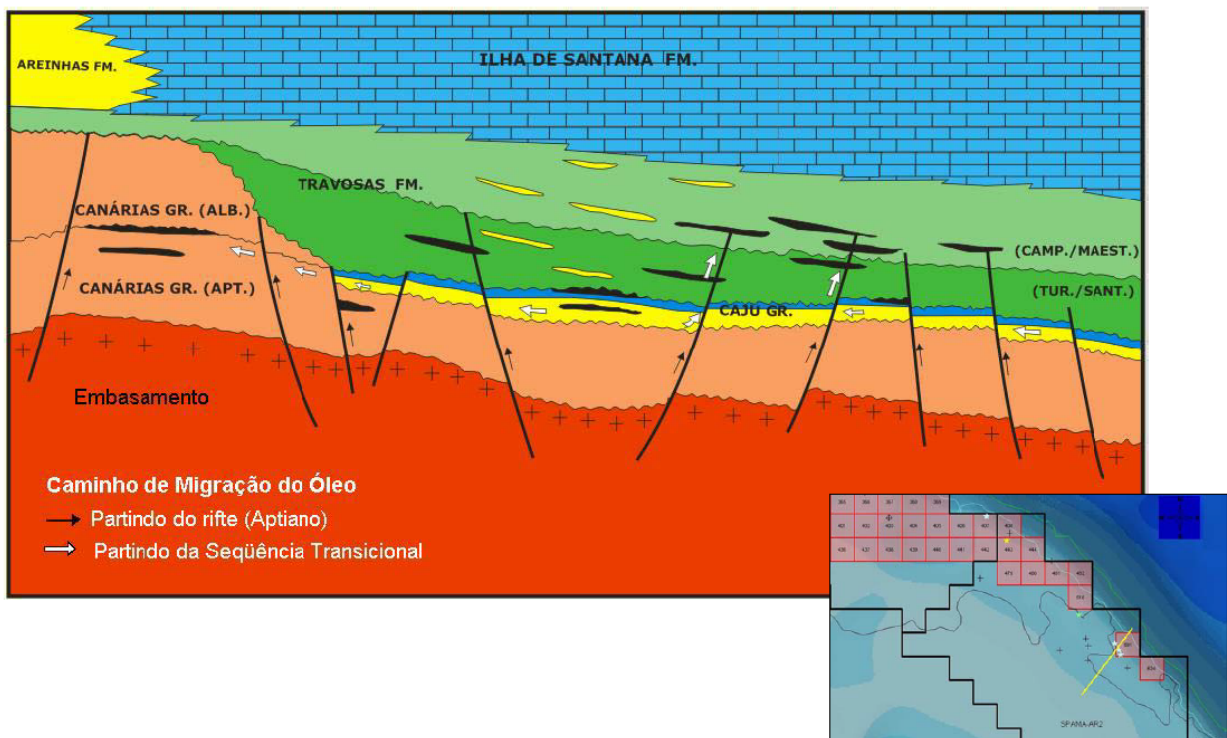


FIGURA II.5.1.2.14 – Seção geológica esquemática localizada (linha amarela no mapa de localização) da Bacia do Pará-Maranhão indicando as principais acumulações e migrações de hidrocarbonetos. A seção geológica completa encontra-se na Figura II.5.1.2.13, acima.

Fonte: ANP (2011).

Os reservatórios são compostos por: Arenitos turbidíticos (distal) do Paleógeno, Arenitos turbidíticos (proximal) da Formação Travosas ($\phi \sim 20\%$), Calcários fraturados, bancos, recifes, depósitos de talus e turbiditos carbonáticos da Formação Ilha de Santana ($\phi = 5\%$ a 12%) e Arenitos Flúvio-deltaicos do Grupo Canárias (Albiano) (ANP, 2011). As rochas selantes são Calcilutitos, Folhelhos e Margas intraformacionais, associadas a trapas estruturais, estratigráficas e mistas (ANP, 2007; ANP, 2011). Os principais plays oferecidos na 11ª Rodada de Licitações da ANP para a Bacia do Pará-Maranhão (**Figura II.5.1.2.15**) foram Arenitos flúvio-deltaicos (Neoaptiano a Eoalbiano); Arenitos turbidíticos (Cretáceo Superior e Inferior). Calcarenitos fraturados e dolomitos (Terciário) e Arenitos turbidíticos (Oligoceno).

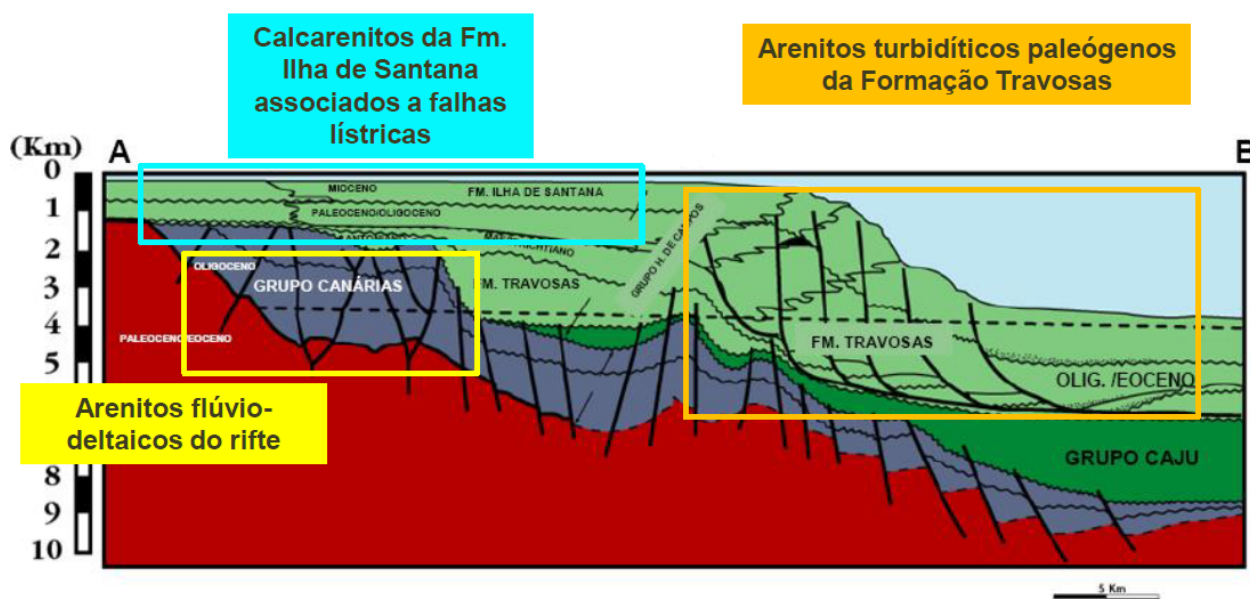


FIGURA II.5.1.2.15 – Seção esquemática da Bacia do Pará-Maranhão indicando os principais *plays* da Bacia.

Fonte: ANP (2011).

F) 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 da margem equatorial 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.

As 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) (PALMA, 1979).

O setor norte, onde se encontra as Bacias da Foz do Amazonas, do Pará-Maranhão e de Barreirinhas, 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 a 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 de o 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.

PALMA (1979) identificou diversas feições geomorfológicas sobre a plataforma continental da Bacia do Pará-Maranhão (**Figura II.5.1.2.16**), entre o golfo amazônico (foz do Rio Pará) e o golfo maranhense. Dentre elas, destacam-se os bancos de maré e vale submarino do Pará, as faixas de areia (*Sand Ribbons*), o delta de borda de plataforma do Gurupi, o vale submarino do Turiaçu, o campo de bancos do Cururupu e o parcel de Manoel Luiz. No que diz respeito ao Recife de Manoel Luiz, este se caracteriza por ser um recife composto por corais vivos, de forma circular imperfeita.

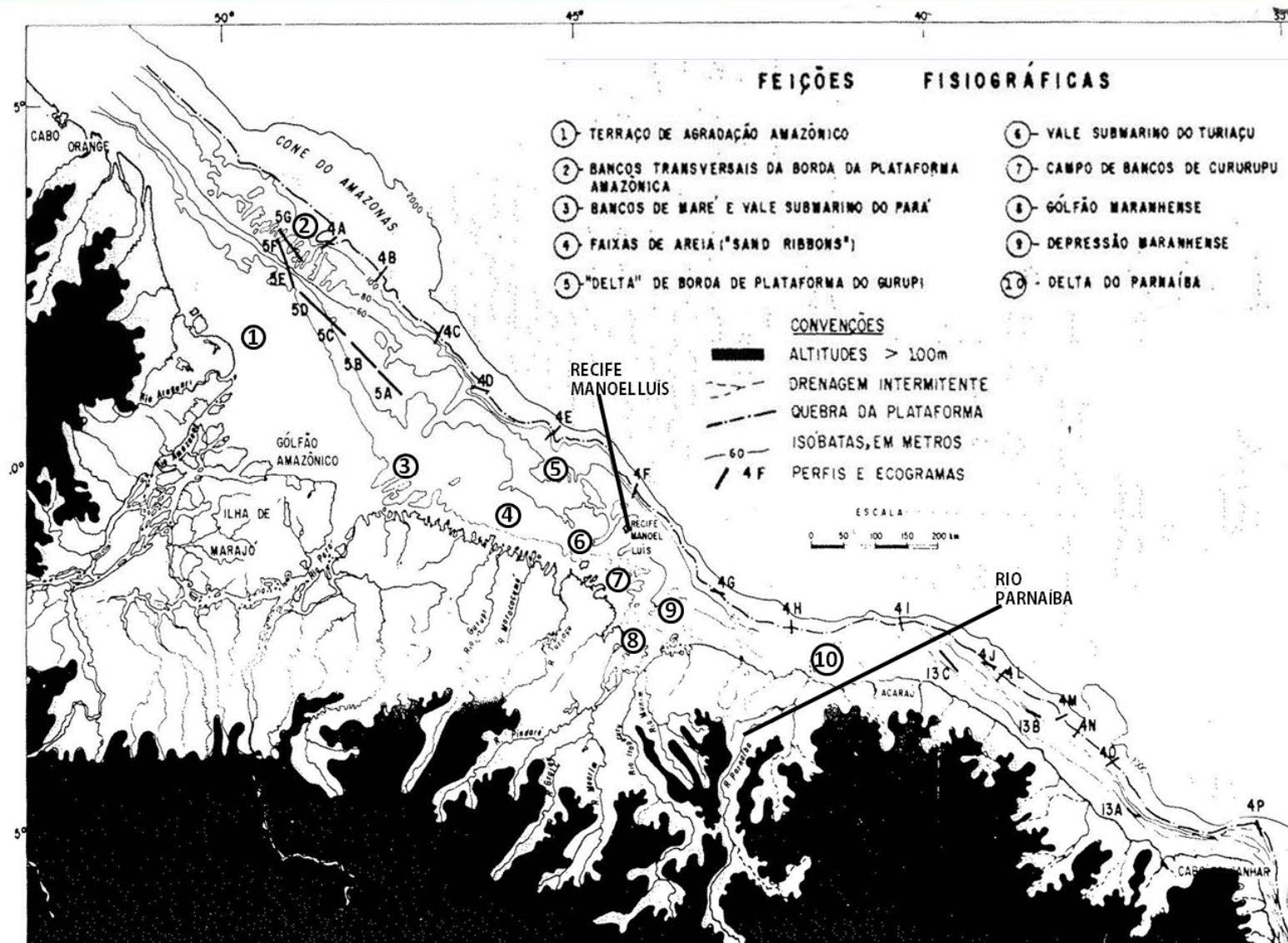


FIGURA II.5.1.2.16 – Localização das feições fisiográficas sobre a plataforma continental da Margem Equatorial.

Fonte: PALMA (1979).

- **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 descrita 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. No talude da Bacia do Pará-Maranhão ocorrem diversos cânions, todavia destacam-se os cânions do Pará e Gurupi, mencionados anteriormente. Os cânions possuem profundidades que variam, em sua maioria, de 50 m a 750 m; sendo o do Gurupi em profundidades de até 1.210 m (DAMUTH & PALMA, 1979).

- **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 da Margem Equatorial pode variar 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. No que diz respeito ao Sopé continental na região da Bacia do Pará Maranhão, este caracteriza-se por ter largura de 300 km a 340 km e profundidades que variam de 2.330 m a 3.275 m. As declividades do sopé nesta região variam de 1:250 e 1:325 (DAMUTH & PALMA, 1979).

- **Montes Submarinos**

Montes submarinos, ou altos-fundos, são elevações no fundo marinho de qualquer espécie e composição, que não representam perigos à navegação (GUERRA & GUERRA, 2010). Da mesma forma, *guyots* são montes submarinos com formato de cone truncado, em cotas superiores a 200 m de profundidade, com seu topo quase horizontal. Quando esta feição está em regiões mais rasas do que 200 m de profundidade, usa-se o termo banco (GUERRA & GUERRA, 2010).

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, dentre eles alguns *guyots*, provavelmente submetidos à 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.

O **Mapa II.5.1.2.2**, contendo a fisiografia da Bacia do Pará-Maranhão, é apresentado no **ANEXO C** ao final deste item.

G) Faciologia

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.5.1.2.17**. 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.

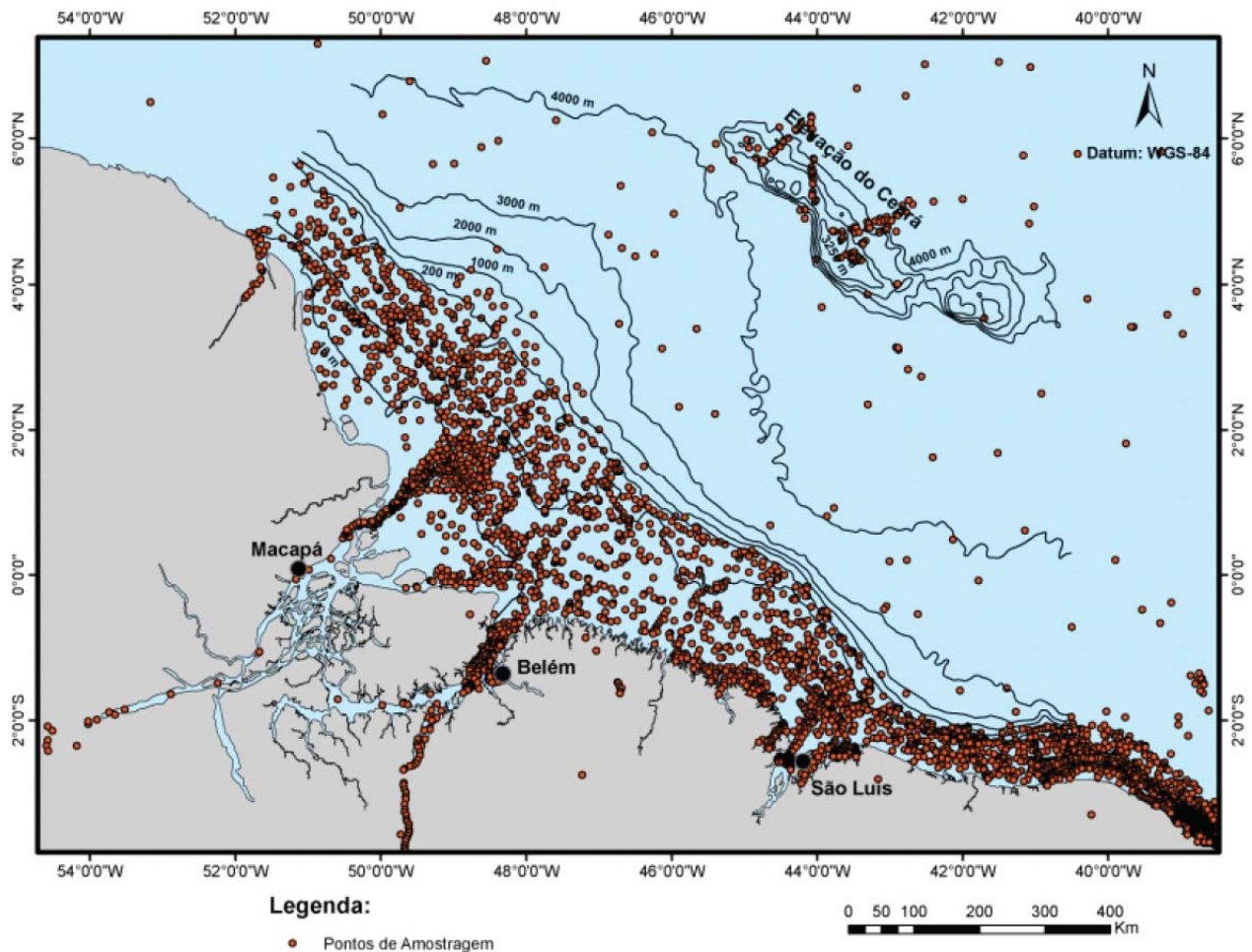


FIGURA II.5.1.2.17 – Localização dos pontos de amostragem de sedimentos superficiais utilizados no projeto PIATAM OCEANO.

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.5.1.2.18**). 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 RJ. *et al.* (2008) é a ocorrência de carbonatos (**Figura II.5.1.2.19**) que predominam na porção externa da plataforma continental.

Com ênfase na descrição da região da Bacia do Pará-Maranhão, os autores identificaram uma predominância de areias na plataforma continental, além de sedimentos lamosos provenientes da drenagem continental, associada à desembocadura do Rio Pará. Na borda de plataforma, mais ao sul, foi identificada a ocorrência de cascalhos, relacionadas à deposição carbonática na região (FIGUEIREDO RJ. *et al.*, 2008).

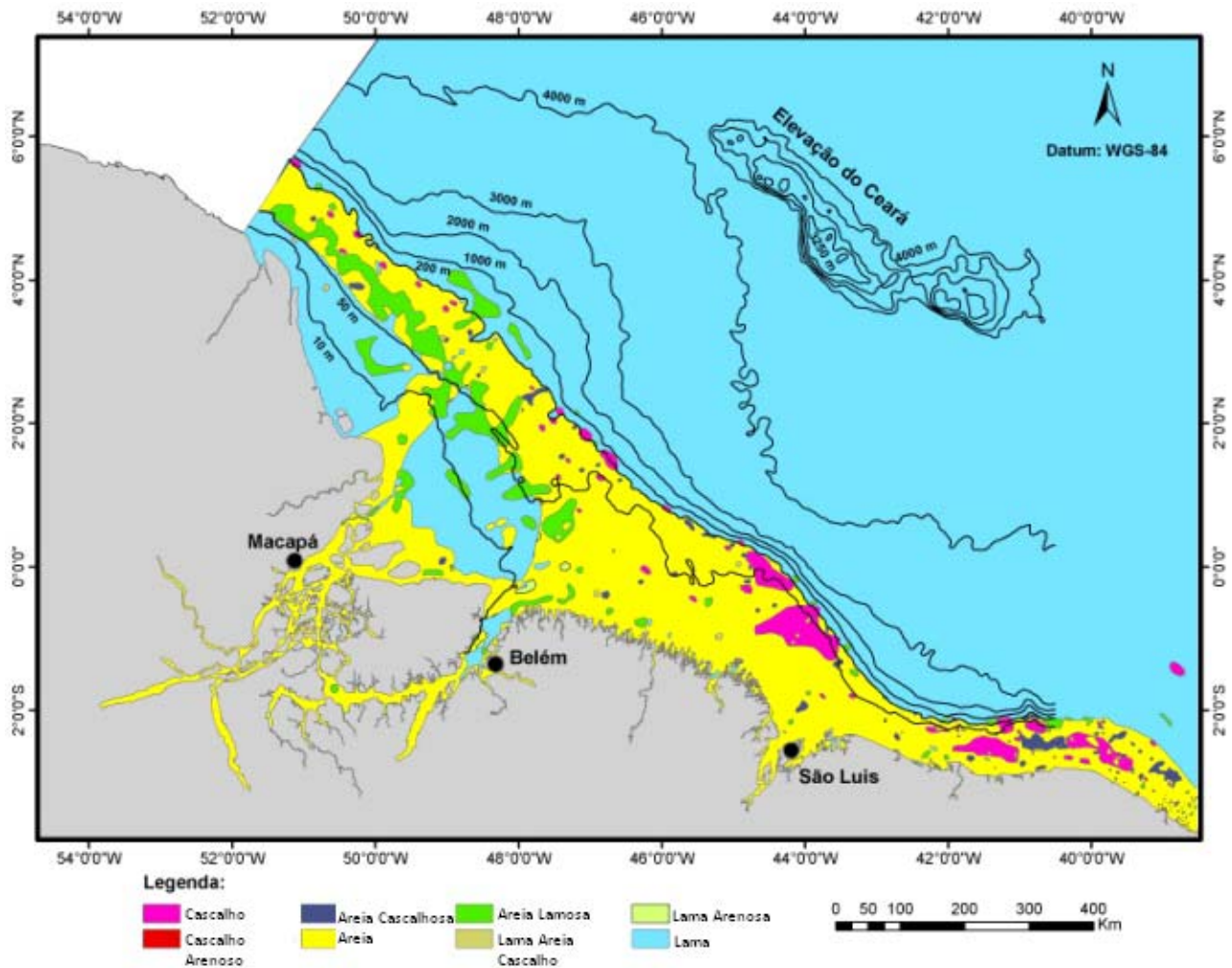


FIGURA II.5.1.2.18 – Mapa de parâmetros granulométricos superficiais resultantes do Projeto PIATAM OCEANO.

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

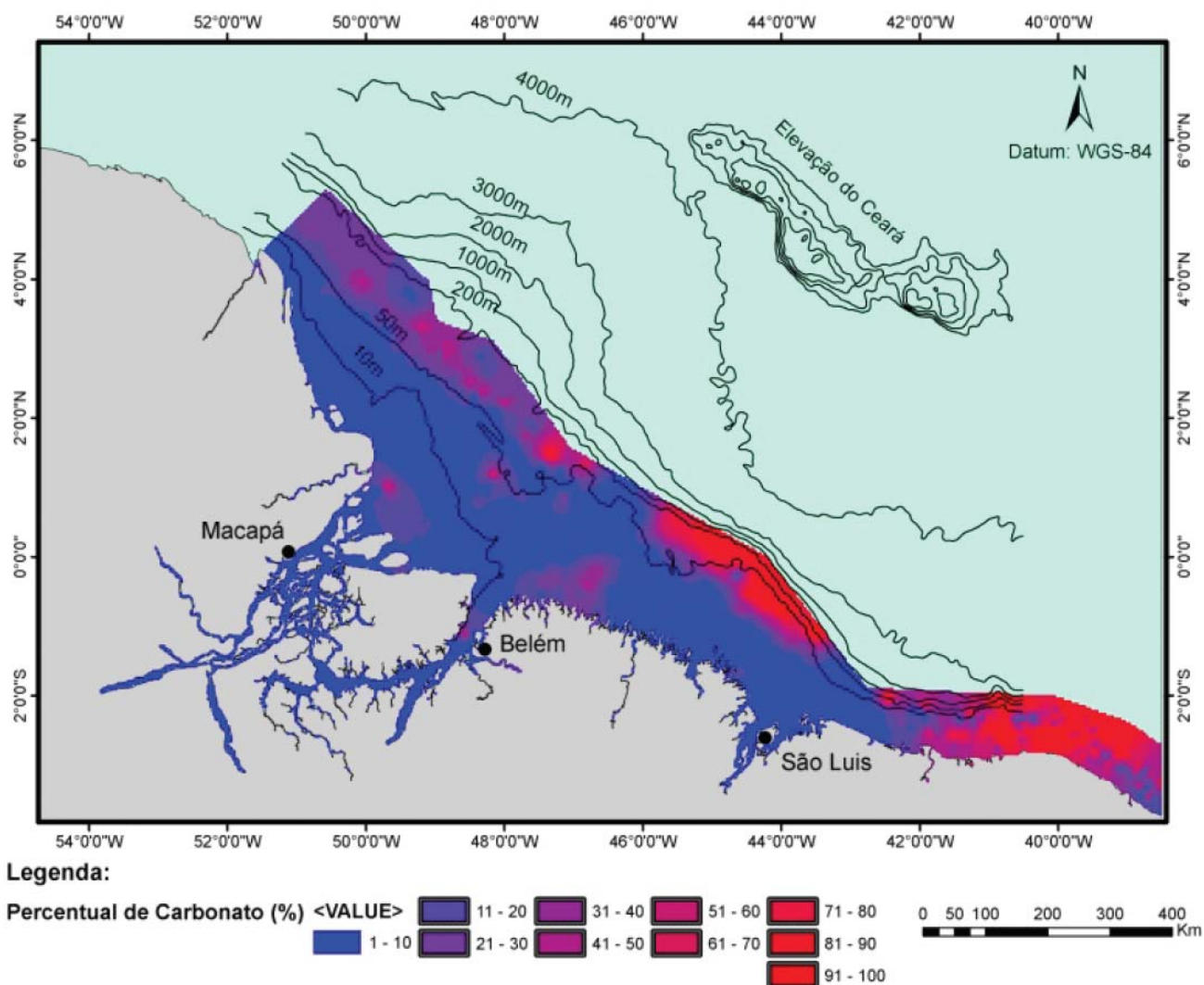


FIGURA II.5.1.2.19 – Mapa da concentração superficial de carbonatos (%) resultantes do Projeto PIATAM OCEANO.

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

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, apresentados no mapa faciológico II.5.1.2.3, no ANEXO D. Os dados do REMAC (1979) 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 (1979) constam na caracterização sedimentológica das bacias da Foz do Amazonas, do Pará-Maranhão e de Barreirinhas descritas por FIGUEIREDO JR. *et al*. (2008).

No que diz respeito ao mapa faciológico apresentado no ANEXO D, realizado com base nos dados do projeto REMAC (1979), as seguintes feições sedimentares podem ser observadas na Bacia do Pará-Maranhão:

- Fácies sedimentares (plataforma continental): consistem nas principais fácies sedimentares presentes na plataforma continental brasileira, sendo subdivididos em dois grandes grupos definidos por KOWSMAN & COSTA (1979), conforme descritos a seguir:
 - Holocênica a moderna não retrabalhada – Diz respeito aos sedimentos recentes, geralmente localizados nas regiões mais próximas à linha de costa;
 - Retrabalhada desde o Holoceno até o moderno – Diz respeito a sedimentos que sofreram modificações durante e após um período de transgressão marinha (Transgressão Flandreana). Esses sedimentos também podem ser reconhecidos como areias relíctas ou areias retrabalhadas.
- Domínio Terrígeno (plataforma continental): consistem em áreas da plataforma continental com predominância de sedimentos siliciclásticos de origem exclusivamente terrígena. Podem ser divididos em dois grupos definidos por KOWSMAN & COSTA (1979), conforme descritos a seguir:
 - Areia Fluvial – Sedimentos provenientes da drenagem continental, a partir de rios que desembocam na plataforma continental.
 - Areia de Supridor Indeterminado – Sedimentos terrígenos cuja fonte não pôde ser determinada com exatidão.
- Domínio Carbonático (plataforma continental): consistem em áreas da plataforma continental com predominância de sedimentos carbonáticos de origem biogênica. Os sedimentos deste domínio foram definidos a partir do tipo de organismo de origem e a sua classe granulométrica. Dessa forma, KOWSMAN & COSTA (1979) subdividem da seguinte forma: Areia de foraminíferos bentônicos, Areia e/ou Cascalho de algas coralíneas ramificantes, Areia e/ou cascalho de Halimeda, Areia e/ou cascalho de moluscos, Areia e/ou cascalho de algas recifais, Areia e/ou cascalhos de briozoários recifais e Recifes de algas.
- Sedimentação (oceano profundo): a caracterização dos ambientes de sedimentação do oceano profundo foi realizada por KOWSMAN & COSTA (1979) a partir da interpretação de dados batimétricos e perfis acústicos contínuos (fonte na frequência de 3,5 kHz). Cabe ressaltar que, por conta da ausência de medições diretas, os tipos de sedimentos não puderam ser aferidos em todos os casos, por isso a classificação por ambientes de sedimentação. Tais ambientes são divididos em vários grupos definidos por esses autores, conforme descritos a seguir:
 - Hemipelágica – Identificados a partir de horizontes plano-paralelos e classificados como sendo compostos, predominantemente, por sedimentos terrígenos finos hemipelágicos (KOWSMAN & COSTA, 1979).
 - Turbidítica – Identificados por KOWSMAN & COSTA (1979) a partir de ecos prolongados, difusos e sem refletores de subfundo, sendo característicos de sedimentos mais grosseiros, como silte e areia. Este ambiente de sedimentação está localizado ao longo do sopé continental, a jusante de vales submarinos, em cadeias submarinas ou em algumas regiões de talude.

- Desmoronamento e deslizamento – Identificados a partir de ecos hiperbólicos, concentrados na base de escarpas acentuadas, podendo ocorrer também ao redor de montes submarinos isolados ou flancos de elevações submarinas (KOWSMAN & COSTA, 1979). Ressalta-se que estes ambientes de sedimentação foram inferidos de forma indireta e podem abrigar fácies sedimentares distintas em sua superfície.
- Mascarada por Afloramentos Rochosos – Nas áreas de topografia acidentada como: cordilheiras meso-oceânicas, talude continental e escarpas submarinas, a ocorrência de ecos hiperbólicos muito pronunciados nos sinais acústicos utilizados no estudo (originados de retornos laterais) impediu que os sedimentos superficiais fossem idealmente classificados (KOWSMAN & COSTA, 1979). Estas áreas foram, então, identificadas como tendo a sua sedimentação “mascarada por afloramentos rochosos”. Ou seja, por conta da provável ocorrência de afloramentos de rochas sedimentares ou vulcânicas, o retorno do sinal acústico foi alterado, dificultando a inferência do tipo exato de sedimentação por parte desses autores.
- Bioconstrução Calcária Nerítica – Identificados como sendo regiões com a ocorrência de deposição de vasas calcárias, depositadas também em algumas regiões do talude e sopé continentais, bem como nos altos batimétricos do atlântico sul (KOWSMAN & COSTA, 1979).

H) Sismicidade

Tendo em vista ausência de trabalhos sobre sismicidade na região da Margem Equatorial Brasileira, foram utilizados dois trabalhos em áreas próximas a Bacia do Pará-Maranhão, com a finalidade de se caracterizar a sismicidade na bacia. ASSUMPCÃO (1992) estudou as forças intraplacas na América do Sul, com base em dados focais de abalos sísmicos e também de informações geológicas. Este autor identificou que, para a região da Bacia Amazônica, entre 1950 e 1989, ocorreram abalos sísmicos com magnitudes de 3,5 a 5,5 m_b (**Figura II.5.1.2.20**).

De acordo com este autor, na região central da Amazônia a distribuição dos epicentros e as informações de forças sugerem que ocorre uma província dominada por uma força compressiva de sentido N-S.

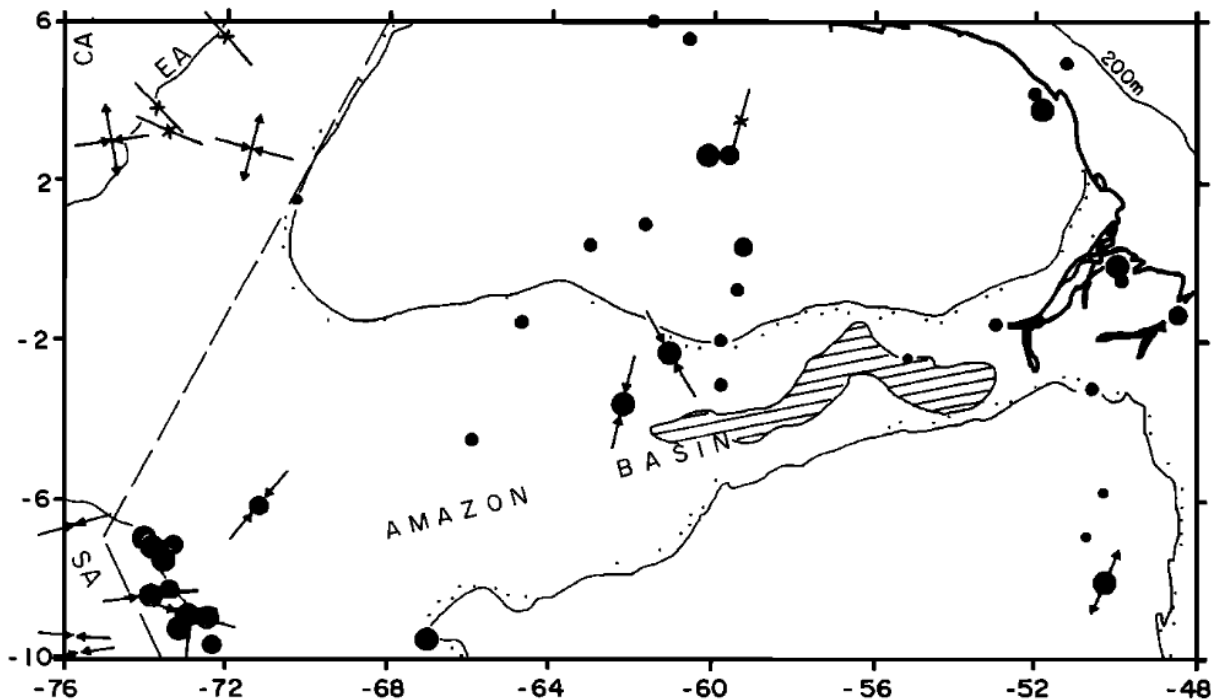


FIGURA II.5.1.2.20 – Atividade sísmica na região Amazônica e próxima à Bacia da Foz do Amazonas. Os círculos pretos representam os epicentros de abalos registrados nessa região.

Fonte: ASSUMPÇÃO (1992).

Mais ao sul, na região nordeste, VILAR (2008), identificou que esta é a principal área de atividade sísmica do país, principalmente na região da borda da Bacia Potiguar. A atividade sísmica nessa área é classificada como sendo do tipo interplaca, sendo consideravelmente inferiores às atividades sísmicas que ocorrem em zonas de borda de placas tectônicas como, por exemplo, os Andes. 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 $2m_b$, para a região nordeste do Brasil (Figura II.5.1.2.21). As informações de magnitude e localização dos sismos que são apresentadas no mapa são referentes a uma base histórica de um período que vai desde 1808 até a data de publicação do trabalho (VILAR, 2008).

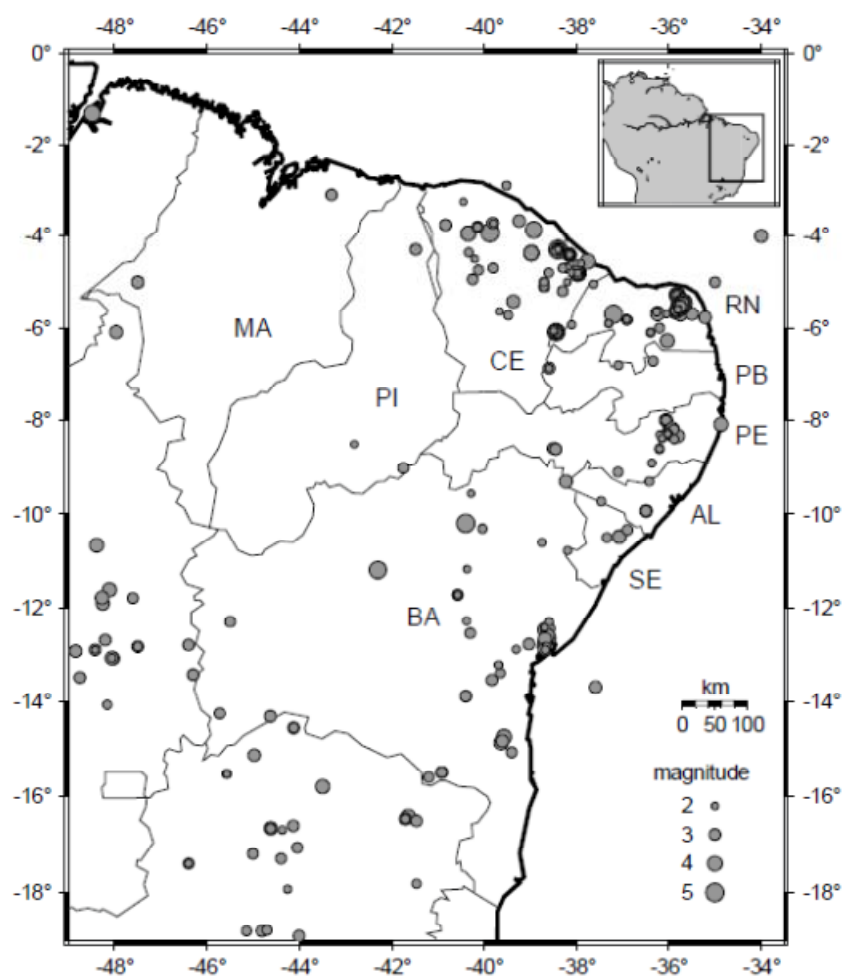


FIGURA II.5.1.2.21 – Sismicidade no nordeste brasileiro.

Fonte: VILAR (2008).

No que diz respeito a distribuição dos epicentros na região amazônica, COSTA *et al.* (1996), identificou que a zona sismogênica no qual se insere a Bacia do Pará-Maranhão (Zona Sismogênica de Cruzeiro do Sul) é caracterizada por sismos com epicentros a 500-700 km de profundidade, relacionados a subducção da placa de Nazca com a Placa Sul-Americana. Todavia, discordo com esses autores, também ocorrem sismos rasos, embora estes não possuam uma definição acurada, embora se acredita que estejam relacionados a manifestações intraplacas. Esta zona apresenta epicentros esparsos, conforme evidenciados na **Figura II.5.1.2.22.**

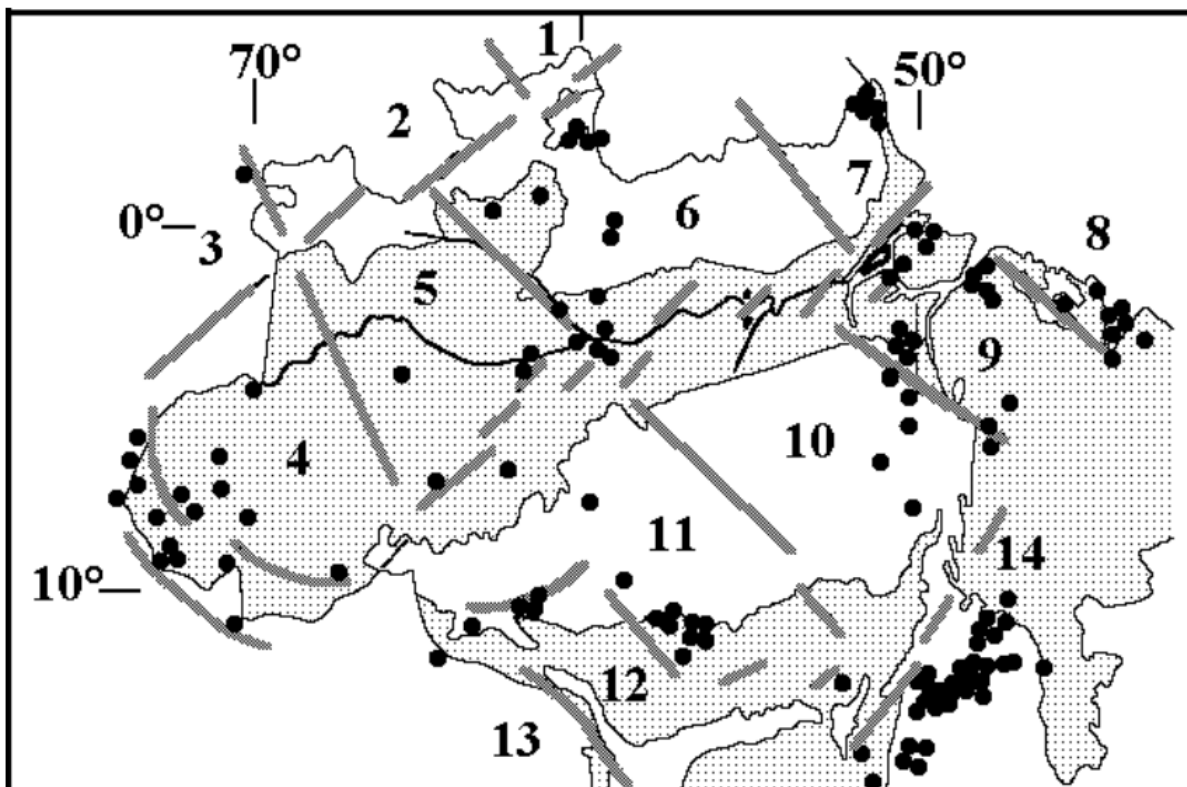


FIGURA II.5.1.2.22 – Sismicidade na região Amazônica. Os pontos pretos são referentes aos epicentros de abalos registrados, as linhas cinzas são suturas e as áreas pontilhadas são as coberturas fanerozóicas. A Bacia do Pará-Maranhão está inserida na Zona Sismogênica 8 – Zona Sismogênica de Cruzeiro do Sul.

Fonte: COSTA *et al.* (1996).

II.5.1.2.2 Geologia Local

A) Localização

A QGEP em parceria com a empresa Pacific Rubiales adquiriu os blocos PAMA-M-265 e PAMA-M-337 (**Figura II.5.1.2.23**) no Round 11 da ANP. A atividade de perfuração marítima nos blocos, localizados na Bacia do Pará-Maranhão, tem como compromisso firme perfurar 01 (um) poço pioneiro para prospecção de óleo e/ou gás no Bloco PAMA-M-337. A luz dos dados atuais, a perfuração do poço exploratório será feita no bloco PAMA-M-337, Lead Gamela, mas, a depender da análise dos dados sísmicos que serão adquiridos nestes blocos, pode haver uma mudança na prioridade, perfurando-se o poço, neste caso, no bloco PAMA-M-265.

As coordenadas dos dois *leads* propostos se encontram na tabela abaixo.

TABELA II.5.1.2.2 – Coordenadas geográfica dos poços proposto nos Blocos PAMA-M-265 e PAMA-M-337.

Poço	Lâmina d'água (m)	Latitude	Longitude
GAMELA	2.965	0° 25' 11,8370"	- 44° 35' 30,5345"
TEMBÉ	3.036	0° 39' 21.7038"	- 45° 04' 50.7042"

DATUM: SIRGAS 2000.

A **Figura II.5.1.2.23** apresenta a localização dos *leads* Tembé e Gamela.

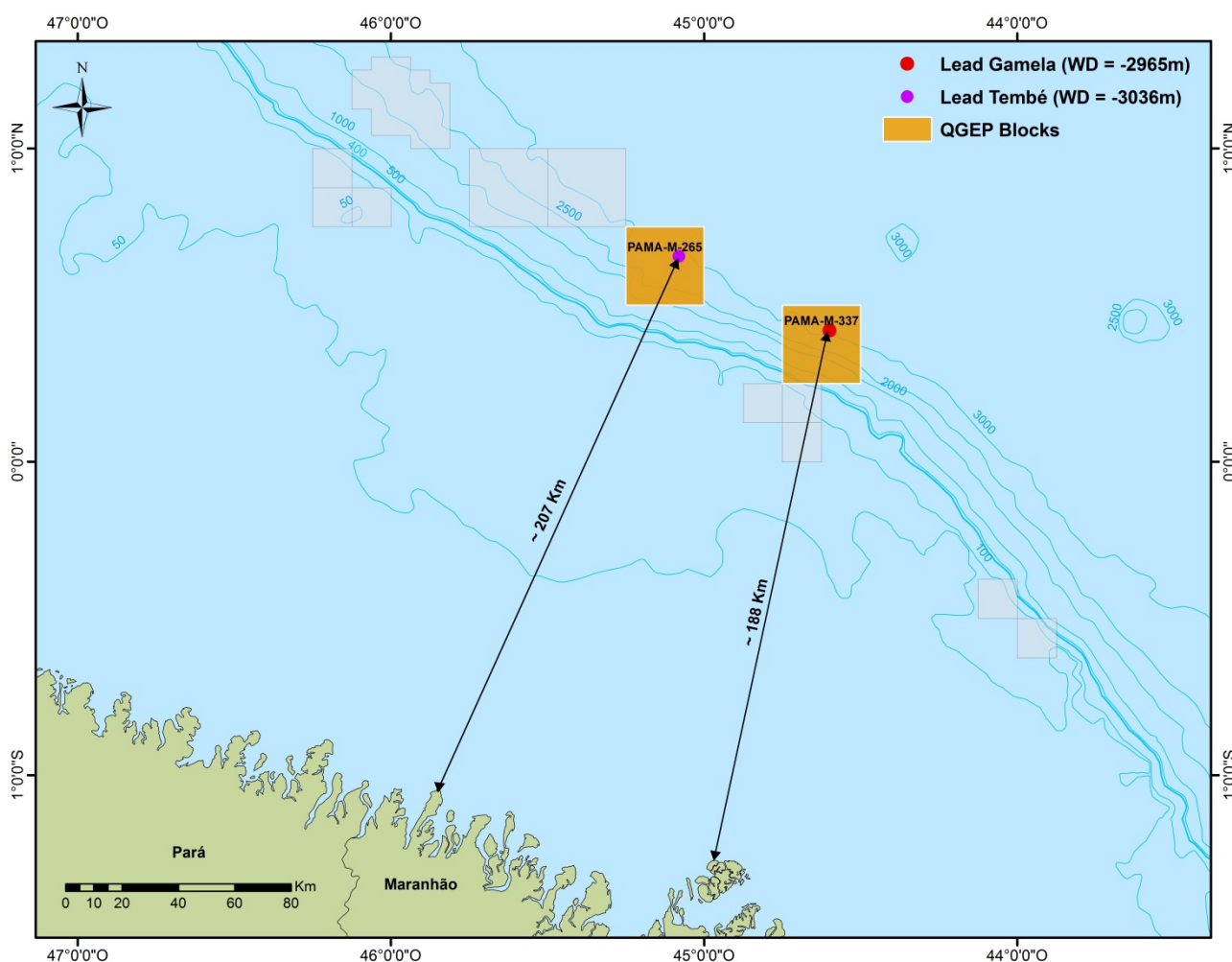


FIGURA II.5.1.2.23 - Localização dos leads Tembé (Bloco PAMA-M-265) e Gamela (Bloco PAMA-M-337).

B) Geologia estrutural

A geologia estrutural tanto na área do Bloco PAMA-M-265 quanto na área do Bloco PAMA-M-337 é caracterizada por um domínio estrutural compressivo com grande incidência de falhas de empurrão e dobras associadas, relacionado à tectônica gravitacional, manifestada através de fluxos de massa. Este estilo de deformação característico é descrito por ZALÁN (2001) como um cinturão gravitacional de dobras e empurrões (*gravitational fold-and-thrust belts*), similar em geometria e dimensões aos cinturões orogênicos das áreas compressivas. Os *leads* destacados (vide **Figura II.5.1.2.23**), visam testar os reservatórios do Maastrichtiano e Campaniano estruturados por essa deformação. Nos mapas estruturais ao nível do Campaniano Médio aonde espera-se a ocorrência de arenitos turbidíticos da Fm. Travosas (objetivo principal) identifica-se que as estruturas estão diretamente associadas ao *sub-thrust* de uma falha de empurrão (vide **Figura II.5.1.2.24** e **Figura II.5.1.2.25**).

Além disso, na área de ambos os blocos é possível identificar a presença de *grabens* e *horsts* na porção inferior da seção sísmica, representando a sedimentação *rift* do Grupo Canárias do Eocretáceo e que se estendeu até o Neolábiano.

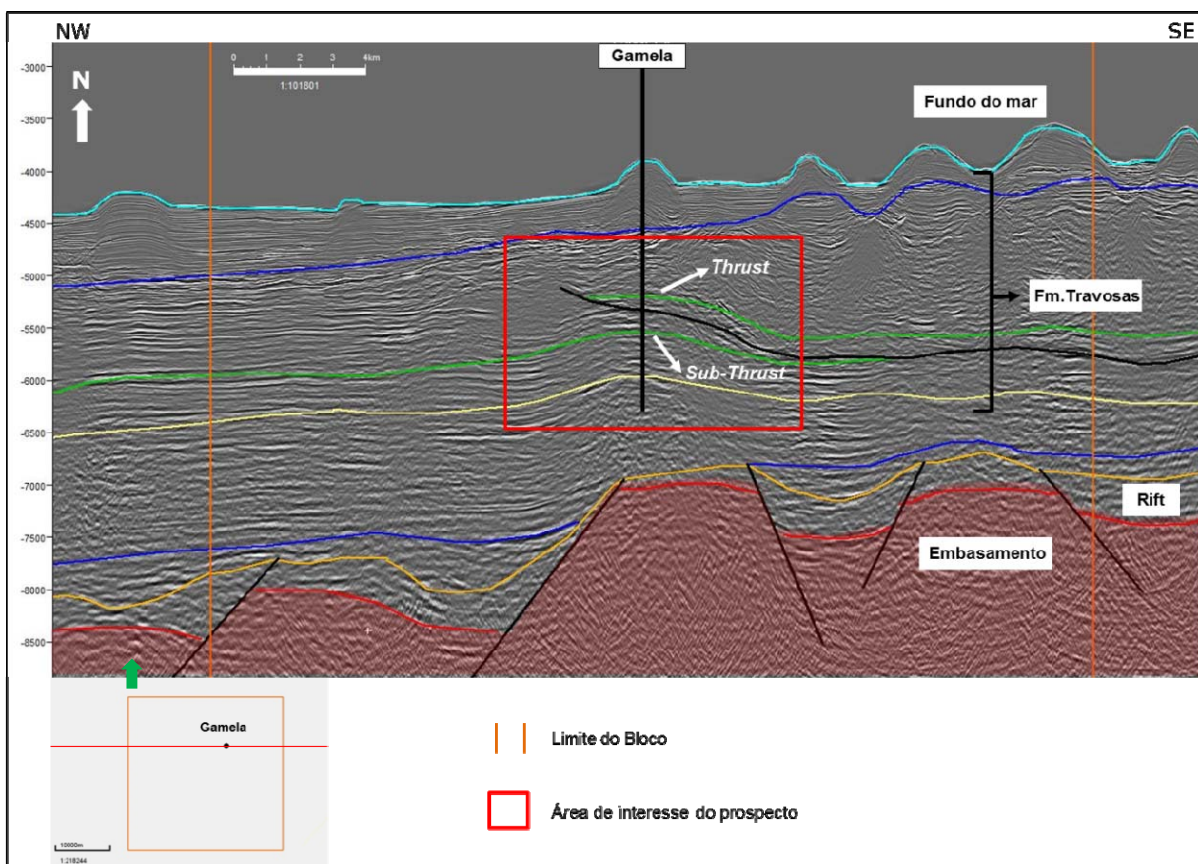


FIGURA II.5.1.2.24 - Seção sísmica 2D em tempo (adquirida pela empresa WesternGeco) mostrando as principais feições estruturais na região do Bloco PAMA-M-337. As principais feições são as falhas de empurrão e dobras associadas às zonas de descolamento formadas durante o Neocretáceo na seção pós-rift, e a presença de *grabens* e *horsts*, os quais representam a sedimentação *rift* do Grupo Canárias do Eo-Cretáceo, que se estendeu até o Neolábiano.

Fonte: QGEP (2015).

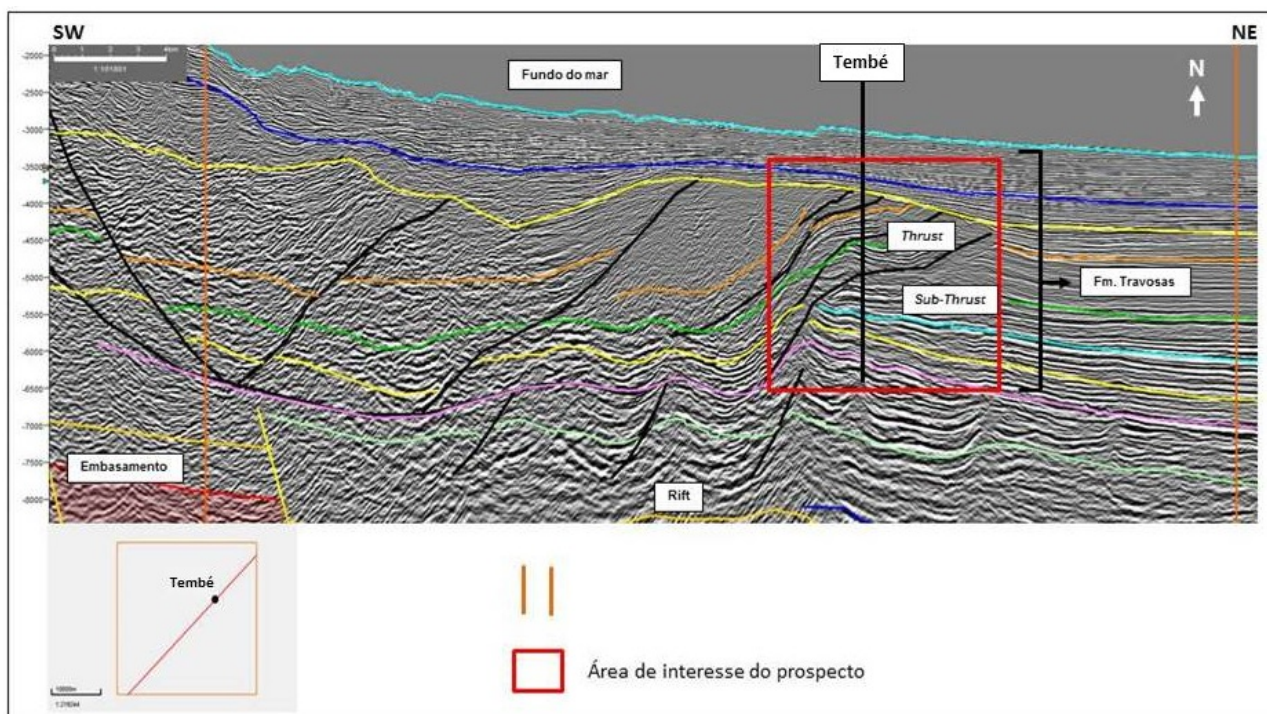


FIGURA II.5.1.2.25 - Seção sísmica 2D em tempo (adquirida pela empresa WesternGeco) mostrando as principais feições estruturais na região do Bloco PAMA-M-265. As principais feições são as falhas de empurrão e dobras associadas às zonas de descolamento formadas durante o Neocretáceo na seção pós-rift, e a presença de *grabens* e *horsts*, os quais representam a sedimentação *rift* do Grupo Canárias do Eocretáceo, que se estendeu até o Neolábiano.

Fonte: QGEP (2015).

As **Figura II.5.1.2.26** e **Figura II.5.1.2.27** apresentam os mapas estruturais do Campaniano Médio (*sub-thrust*) e as falhas de empurrão associadas.

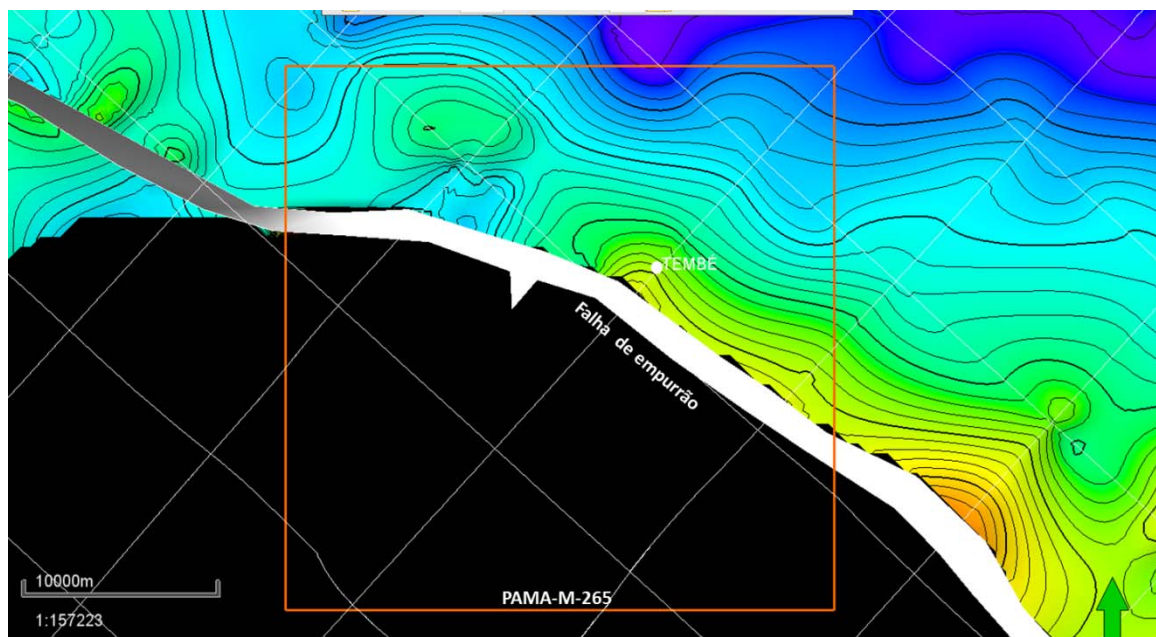


FIGURA II.5.1.2.26 - Mapa estrutural ao nível do Campaniano Médio *sub-thrust*), onde espera-se a ocorrência de arenitos turbidíticos da Fm. Travosas. A estrutura do *lead* Tembê está diretamente associada ao *sub-thrust* da falha de empurrão.

Fonte: QGEP (2015).

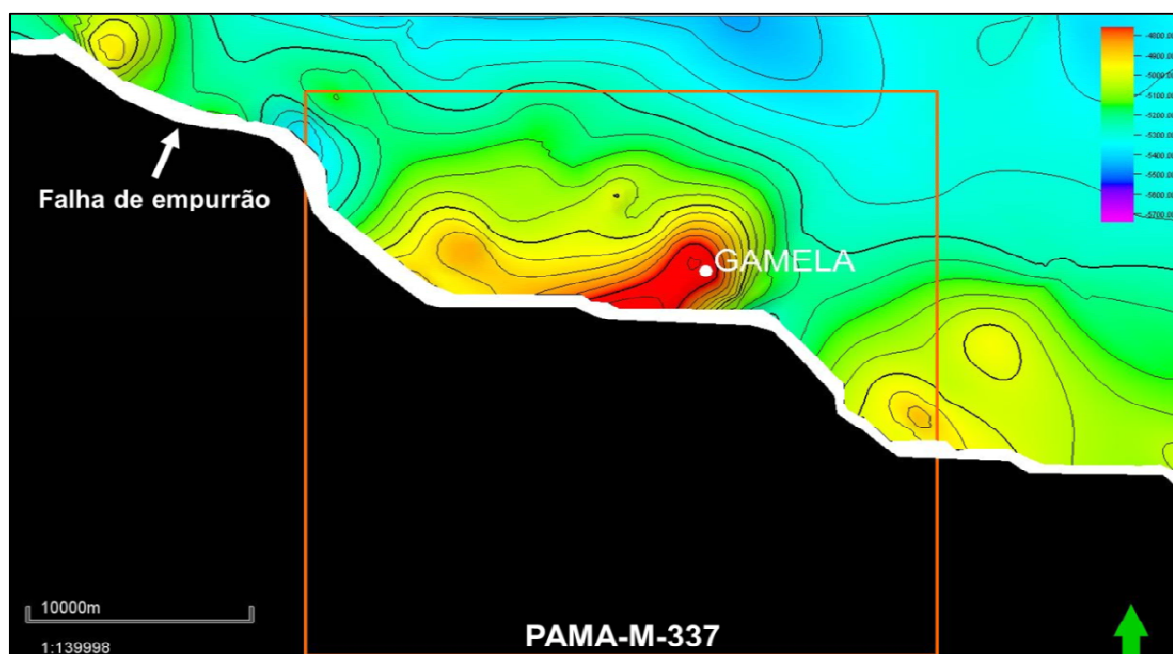


FIGURA II.5.1.2.27 - Mapa estrutural ao nível do Campaniano Médio (*sub-thrust*), onde espera-se a ocorrência de arenitos turbidíticos da Fm. Travosas. A estrutura do *lead* Gamela está diretamente associada ao *sub-thrust* da falha de empurrão.

Fonte: QGEP (2015).

C) Estratigrafia

Os principais objetivos esperados nos *leads* Tembê e Gamela, nos blocos PAMA-M-265 e PAMA-M-337 respectivamente, são os reservatórios turbidíticos distais neocretáceos, da Formação Travosas (**Figura II.5.1.2.28**). Os quadros de previsão geológica propostos para ambos os prospectos mostram as principais litologias e os objetivos primários e secundários a serem perfurados, bem como as previsões para os tipos e as profundidades de revestimentos e perfilagens associadas (vide **Figura II.5.1.2.29** e **Figura II.5.1.2.30**).

As locações propostas preveem perfurar os objetivos principais abaixo do plano da falha reversa, visando aí testar os reservatórios turbidíticos da Formação Travosas estruturados abaixo da zona de cavalgamento (**Figura II.5.1.2.26** e **Figura II.5.1.2.27**).

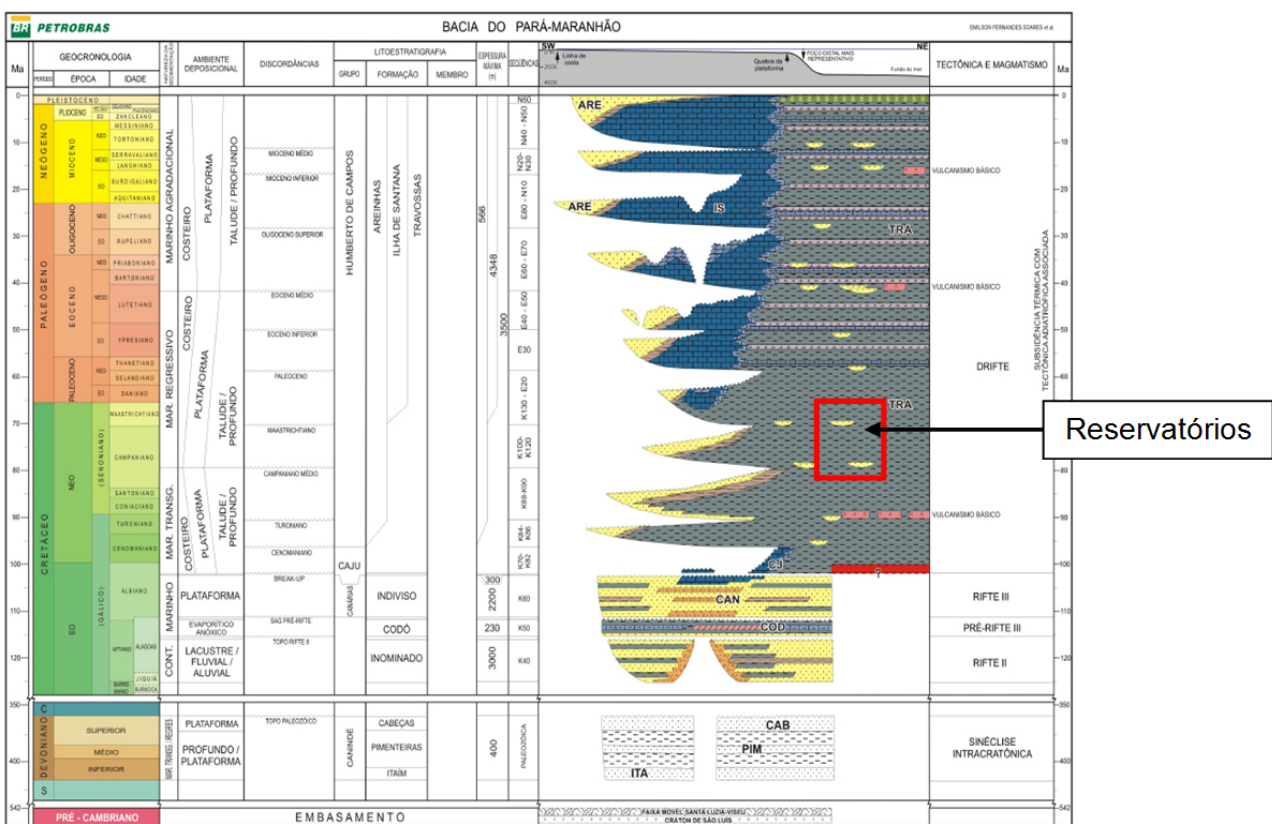


FIGURA II.5.1.2.28 - Carta estratigráfica da Bacia do Pará-Maranhão (Soares et al. 2007). O polígono vermelho refere-se aos reservatórios pertencentes à Fm. Travosas a serem perfurados nas áreas dos blocos.

Fonte: QGEP (2015).

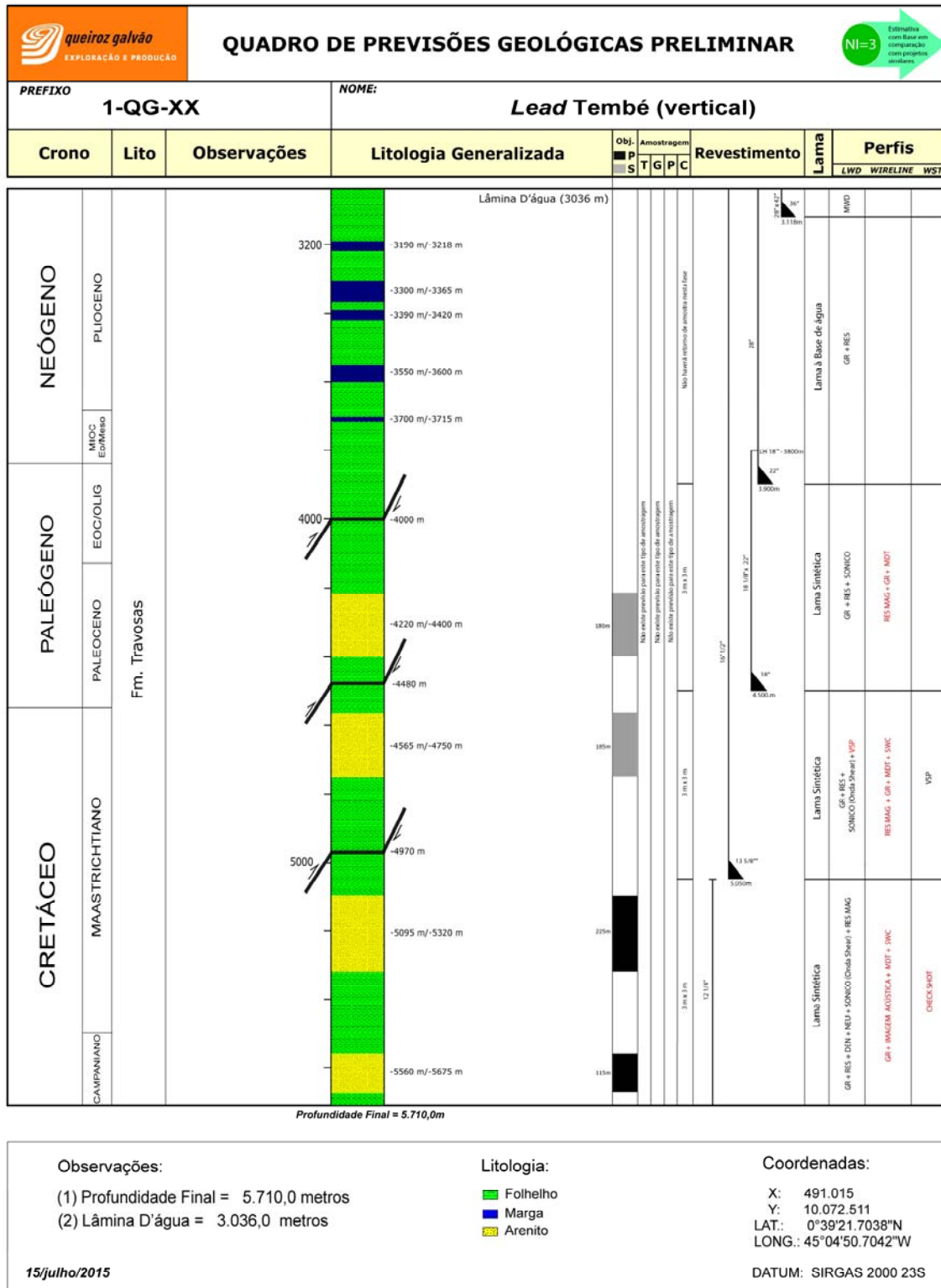


FIGURA II.5.1.2.29 - Quadro de previsão geológica proposto para o lead Tembé mostrando as principais litologias e os objetivos primários e secundários, bem como as previsões para revestimentos e perfilagens. Está previsto perfurar a seção abaixo do plano de falha para testar os reservatórios abaixo da zona de cavalgamento.

Fonte: QGEP (2015).

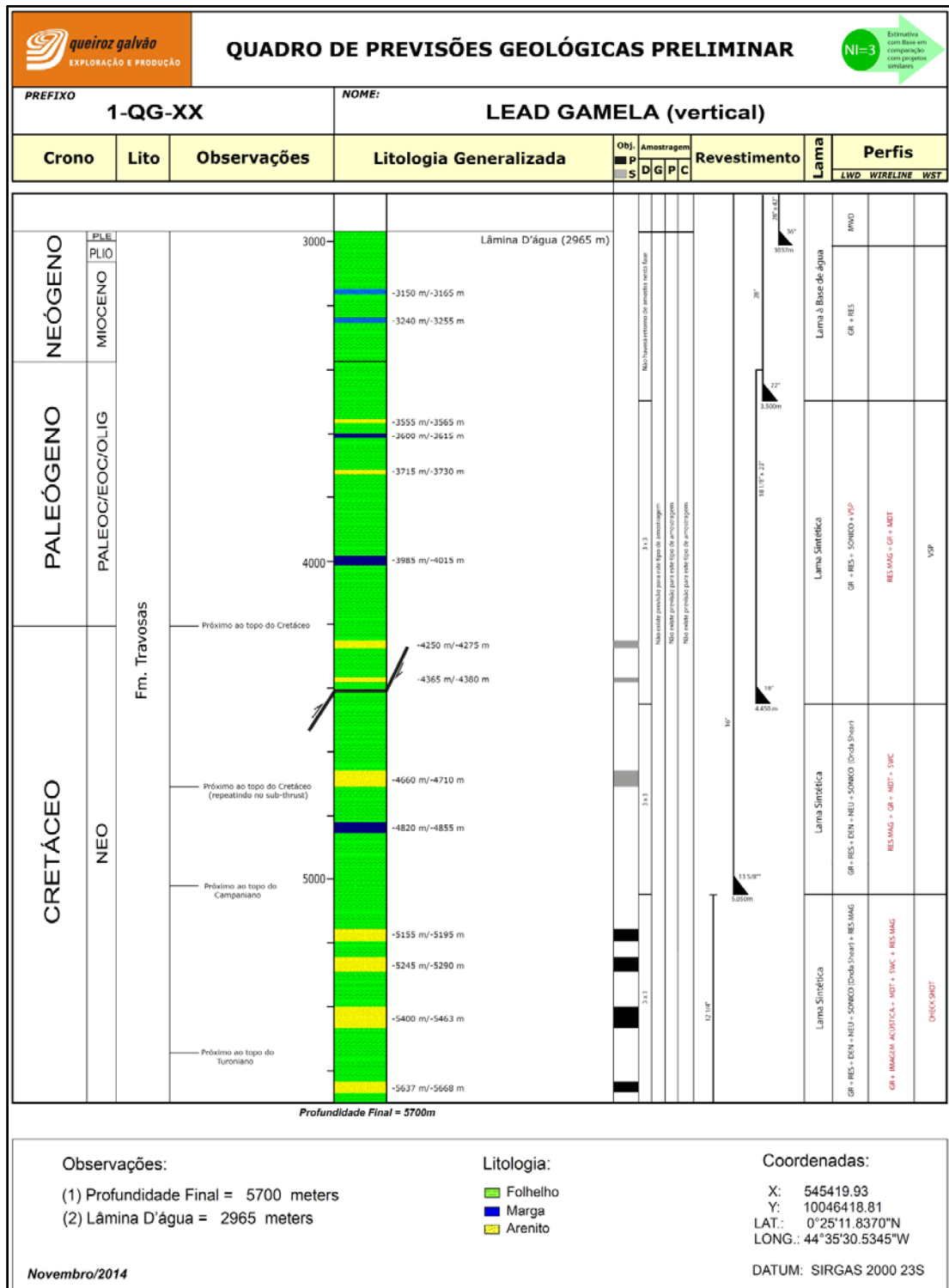


FIGURA II.5.1.2.30 - Quadro de previsão geológica proposto para o lead Gamela mostrando as principais litologias e os objetivos primários e secundários, bem como as previsões para revestimentos e perfilagens. Está previsto perfurar a seção abaixo do plano de falha para testar os reservatórios abaixo da zona de cavalgamento.

Fonte: QGEP (2015).

O único poço existente na região de águas profundas é o 1-BRSA-903 (1-PAS-27), perfurado pela Petrobras em 2011, e distante 120 e 200 km dos blocos PAMA-M-265 e PAMA-M-337, respectivamente (**Figura II.5.1.2.31**), recuperou óleo leve, de 41° a 44° API. Alguns poços perfurados em água rasa e com recuperação de óleo em DST's registraram grau API em torno de 34° a 36° API. Projeta-se para o bloco um grau API médio de 40°.

A geração na área conta com folhelhos e margas da seção albo-cenomaniana, definida mediante análise geoquímica em poços exploratórios, como o 1-MAS-12-MAS, cerca de 60 km a sudoeste do Bloco PAMA-M-337. A migração para os objetivos propostos, turbiditos do pacote Maastrichtiano-Campaniano, se daria através do mosaico de falhas e dobras que ali proliferaram. Também se conta, especulativamente, com geradores da própria seção objetivo, Cretáceo Superior, uma vez que o óleo recuperado em teste do poço 1-PAS-27-PAS é tido como proveniente deste pacote.

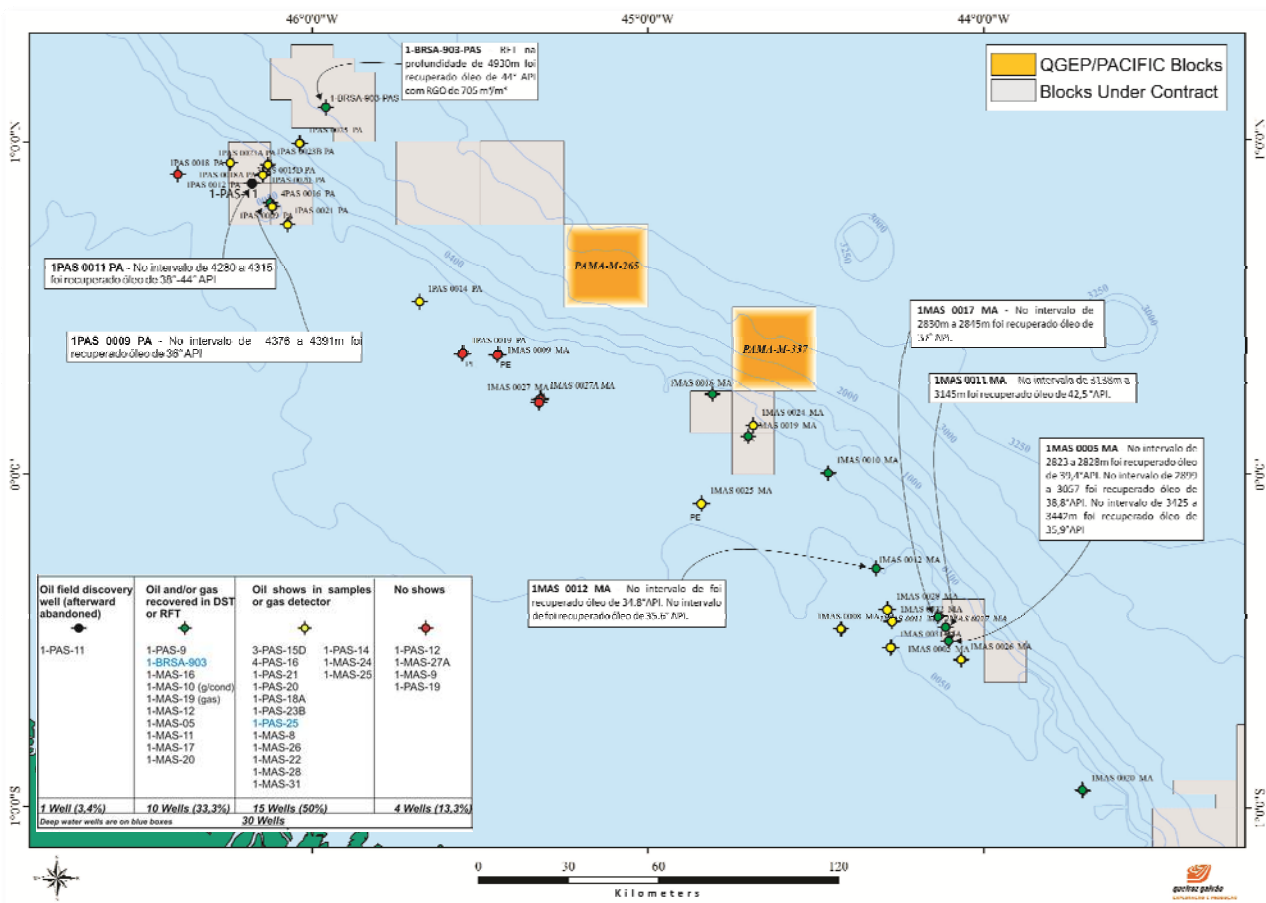


FIGURA II.5.1.2.31 - Mapa de localização dos blocos PAMA-M-265 e PAMA-M-337 com a distribuição dos poços exploratórios da área. Em destaque, sete (7) poços exploratórios que recuperaram óleo em teste com graus API variando de 34,8 a 44°API.

Fonte: QGEP (2015).

D) Fisiografia

As principais feições fisiográficas, interpretadas nas áreas dos blocos a partir da batimetria (pacote de dados *Multibeam*) adquiridos da empresa NIKO/SEASEEP, são cânions na quebra do talude, e possivelmente alguns escorregamentos. As áreas onde estão localizados os *leads* Gamela e Tembê caracterizam-se por uma região plana com batimetria de 2.965 m e 3036 m, respectivamente, formando um patamar ladeado por partes distais de dois cânions. Sendo assim as regiões dos *leads* não estariam sujeitas a efeitos de eventuais fluxos gravitacionais (**Figuras II.5.1.2.32 e II.5.1.2.33**).

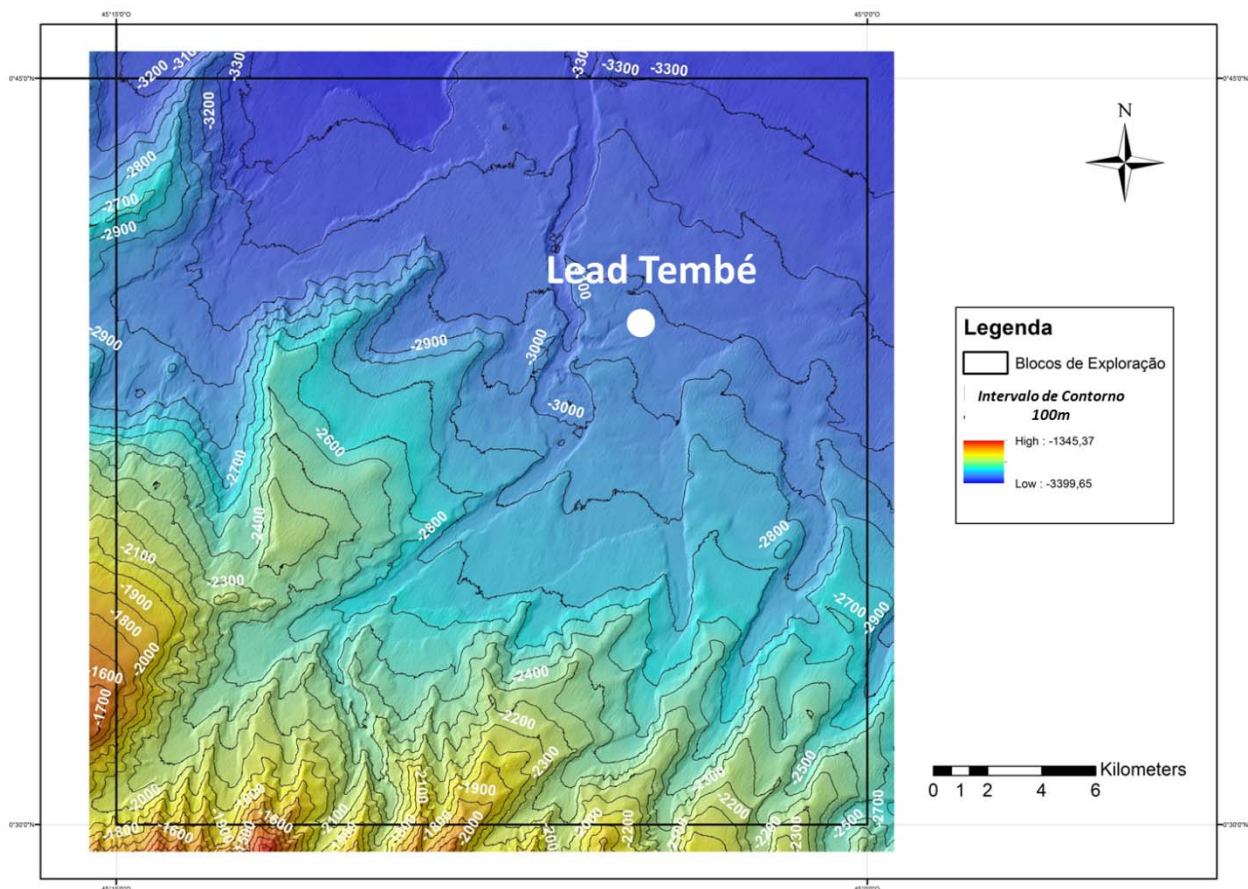


FIGURA II.5.1.2.32 - Mapa batimétrico do Bloco PAMA-M-265 com intervalo de contorno de 100m mostrando as principais feições fisiográficas representadas pelo talude na região sul do bloco, cânions na região intermediária e planície abissal na parte norte. A área onde está localizado o *lead* Tembê caracteriza-se por uma região plana em uma batimetria de 3036 m formando um patamar ladeado por partes distais de dois cânions.

Fonte: QGEP (2015).

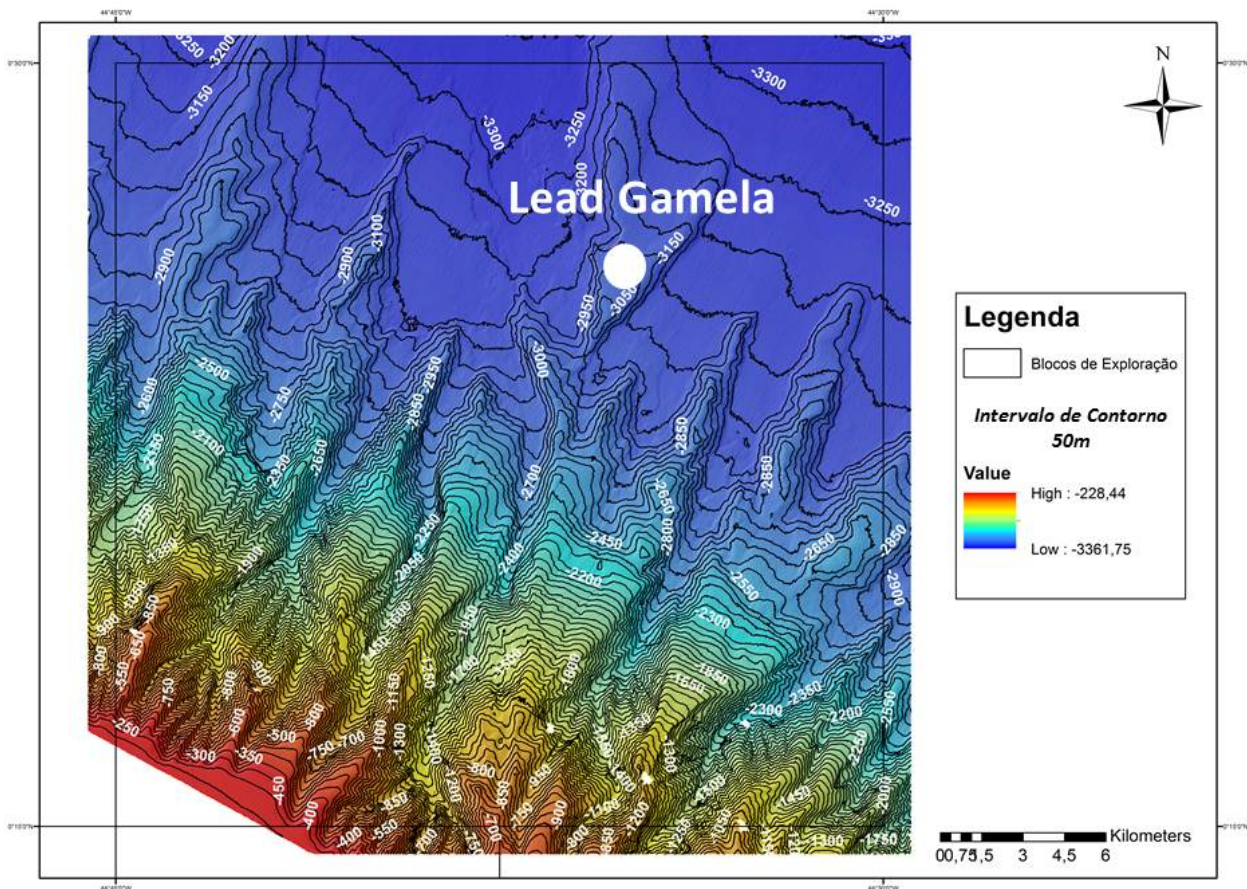


FIGURA II.5.1.2.33 - Mapa batimétrico do Bloco PAMA-M-337 com intervalo de contorno de 50m mostrando as principais feições fisiográficas representadas pelo talude na região sul do bloco, cânions na região intermediária e planície abissal na parte norte. A área onde está localizado o *lead* Gamela caracteriza-se por ser região plana em uma batimetria de 2.965 m formando um patamar ladeado por partes distais de dois cânions.

Fonte: QGEP (2015).

E) Faciologia

Os dados de sonar de alta resolução levantados pela NIKO/SEASEEP com navio MV TEKNIK PERDANA em 2013, indicam que as áreas dos prospectos são regiões suaves e planas, com valores de inclinação menores que $0,5^\circ$ e predomínio de sedimentos finos tipo argila e silte (**Figuras II.5.1.2.34 e II.5.1.2.35**). Nos blocos não foram adquiridos *piston cores*, tendo em vista a identificação de baixos valores de *backscattering* nesta área. Nas imediações dos blocos PAMA-M-265 e PAMA-M-337, foram coletados dois *piston cores* cuja litologia identificada foi lama cinza esverdeada. Considerando que nas áreas das locações ocorre um padrão de baixos valores *backscattering* à semelhança do local onde foram coletados os *piston cores*, interpreta-se que ocorra litologia semelhante nestas áreas (**Figuras II.5.1.2.36 e II.5.1.2.37**).

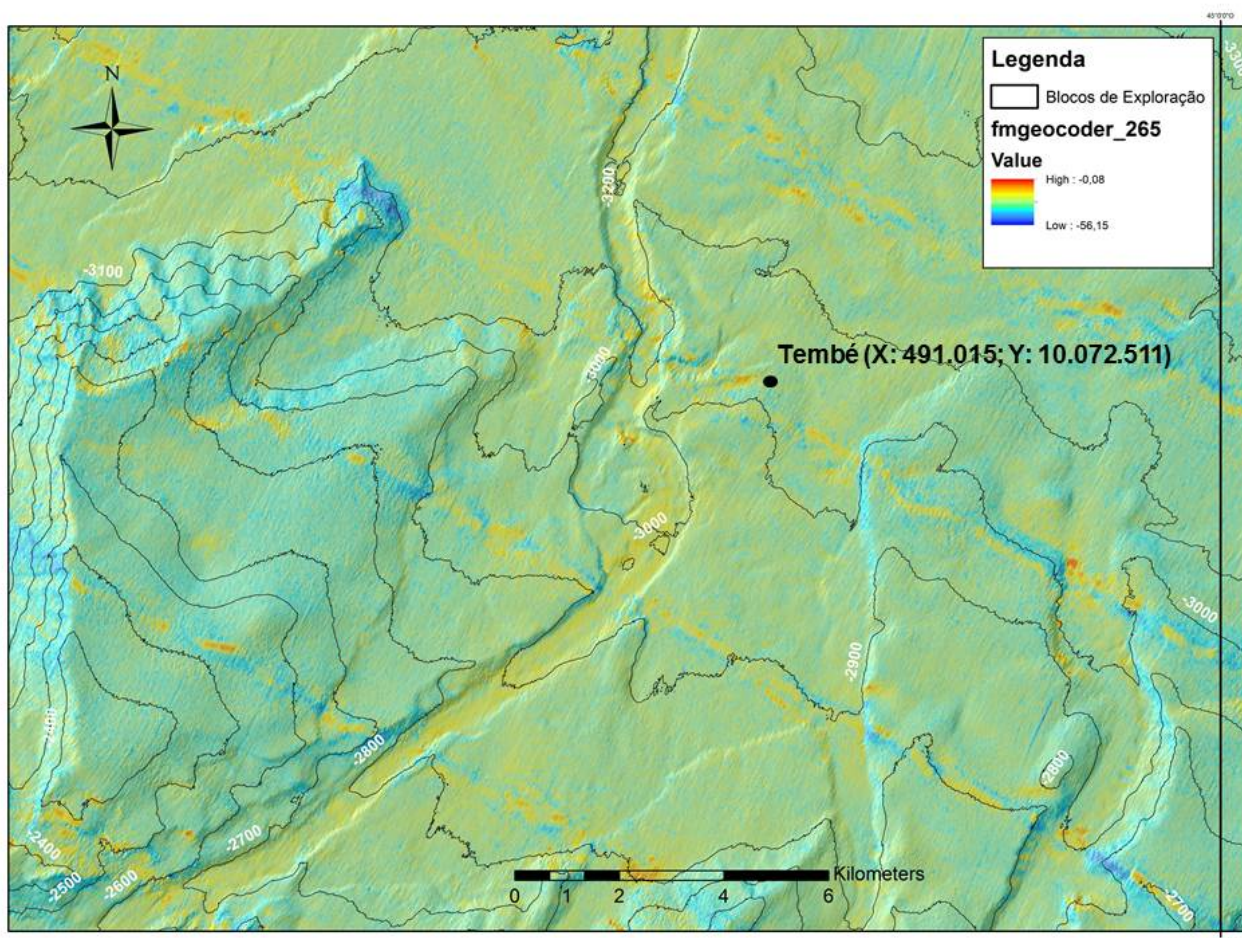


FIGURA II.5.1.2.34 - Mapa de *backscattering* de alta resolução (zoom dentro do Bloco PAMA-M-265). Observa-se a presença de um patamar plano ladeado por dois cânions. A maior parte da área apresenta valores baixos de *backscattering*, de cores mais azuladas, sugerindo sedimentos lamosos, enquanto as cores amareladas nos talweges dos cânions, possivelmente, representem sedimentos mais arenosos. A inclinação do substrato é muito baixa, apresentando valores menores que $0,5^\circ$.

Fonte: QGEP (2015).

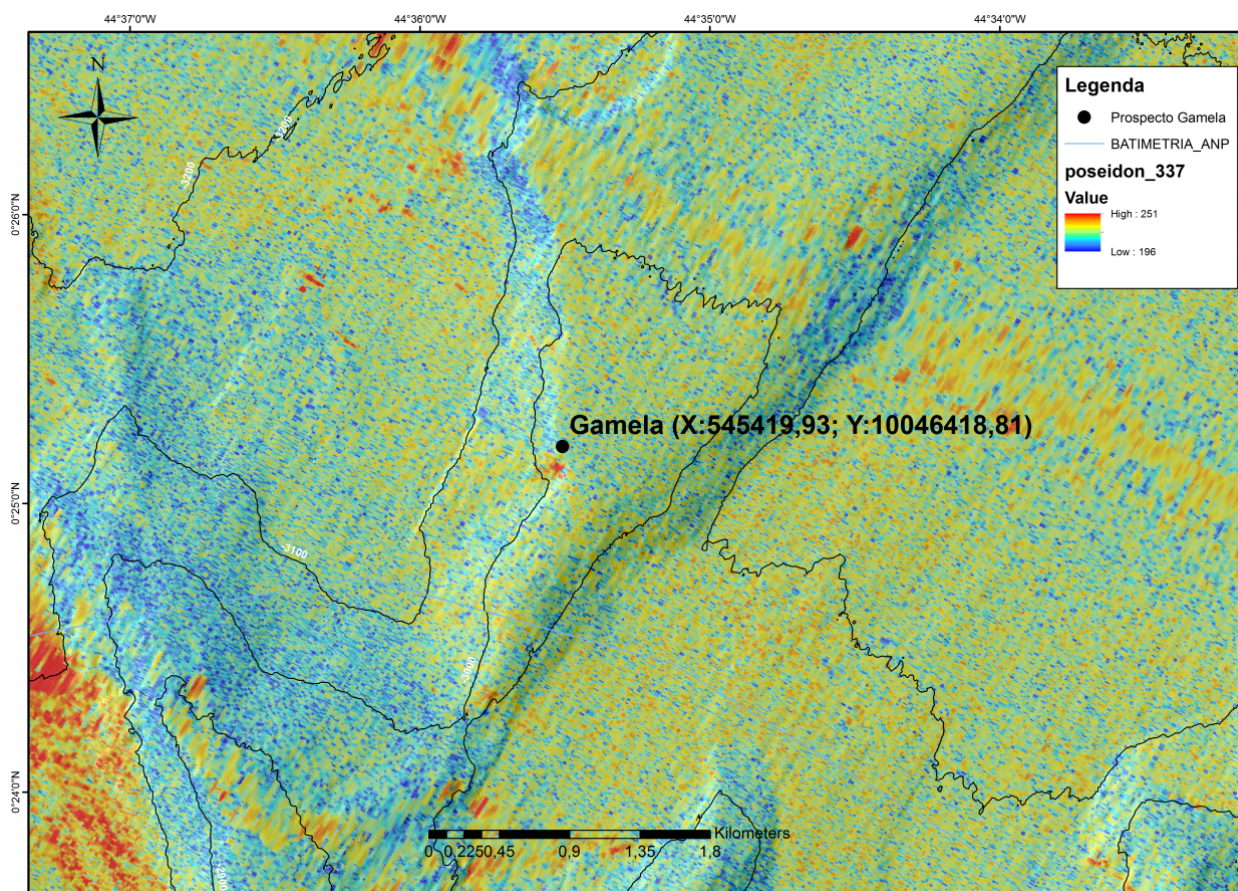


FIGURA II.5.1.2.35 - Mapa de *backscattering* de alta resolução (zoom dentro do Bloco PAMA-M-337). Observa-se a presença de um patamar plano ladeado por dois cânions. As regiões com mais altos valores de *backscattering*, em cores vermelhas, indicam maior reflectividade na parte do talvegue dos cânions, sugerindo ocorrência de sedimentos mais arenosos. A maior parte da área apresenta valores baixos de *backscattering*, de cores mais azuladas, sugerindo sedimentos lamosos. A inclinação do substrato é muito baixa, apresentando valores menores que $0,5^\circ$.

Fonte: QGEP (2015).

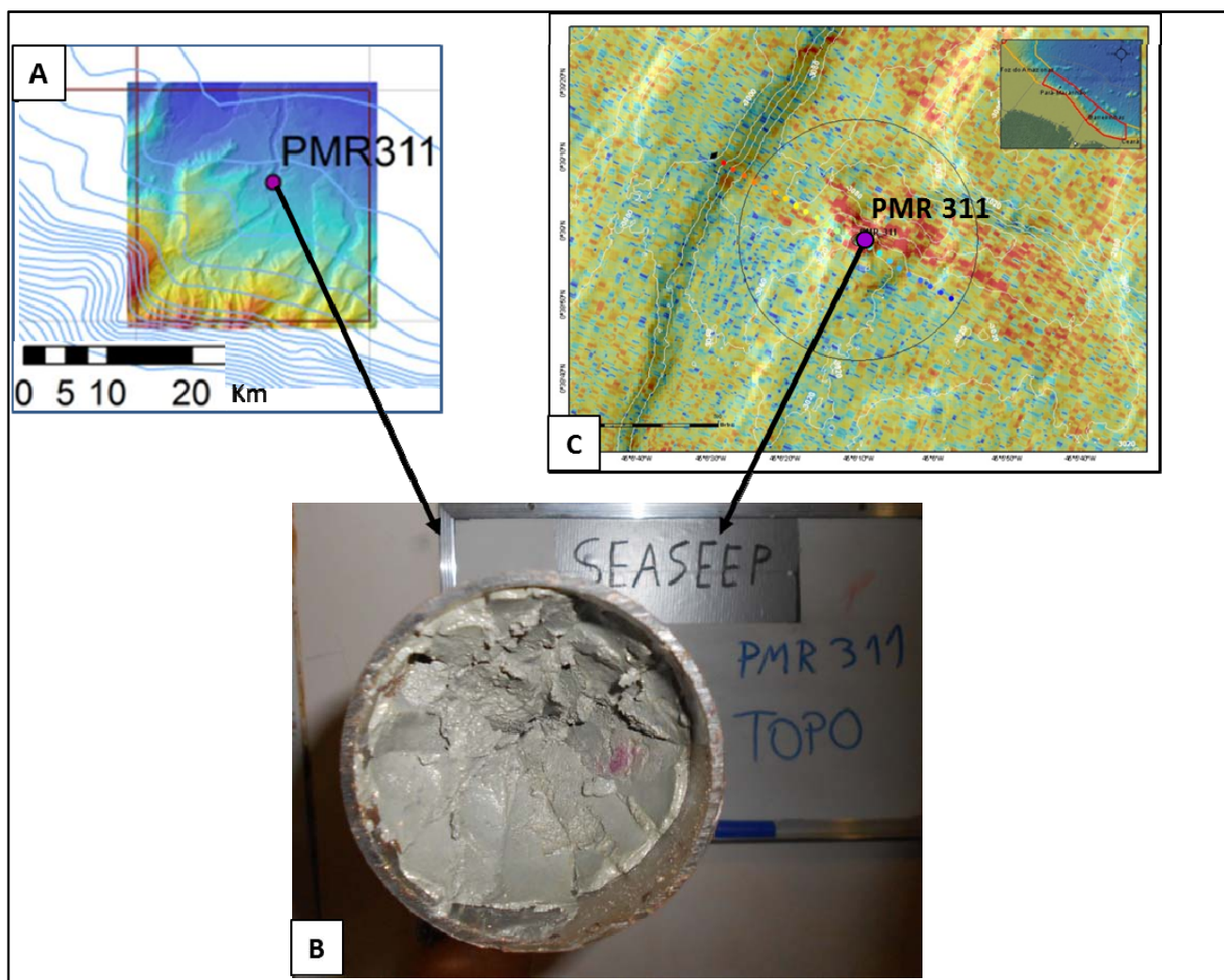


FIGURA II.5.1.2.36 – Piston core PMR-311 recuperado nas proximidades do Bloco PAMA-M-265, adquirido pela empresa NIKO/SEASEEP (A). A litologia foi identificada como sendo exclusivamente de lama cinza esverdeada (B). Observa-se na figura (C) um padrão de baixos valores de *backscattering* onde foi coletado o *piston core* PMR-311, semelhante aos valores encontrados na área da locação (FIGURA II.5.1.2.30).

Fonte: QGEP (2015).

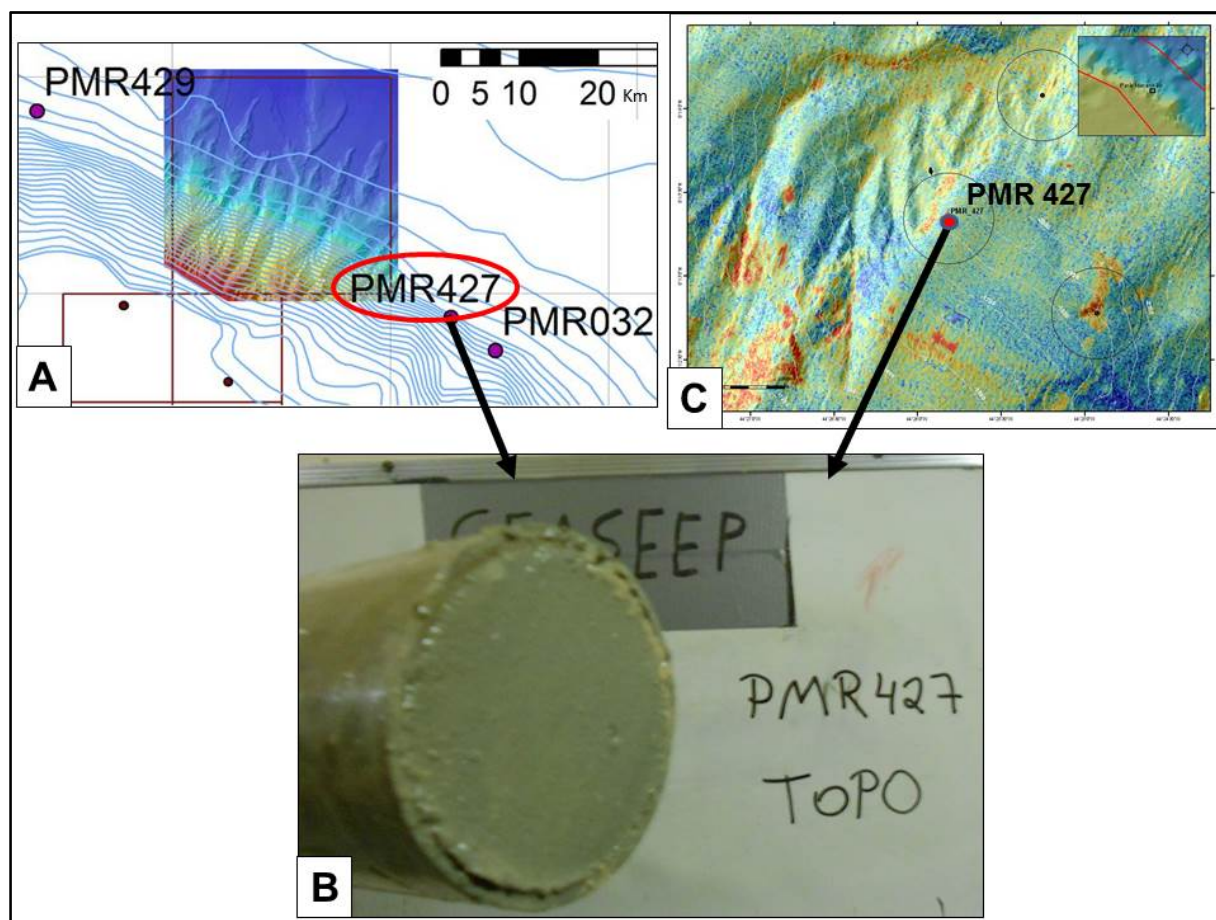


FIGURA II.5.1.2.37 – Piston core PMR-427 recuperado nas proximidades do Bloco PAMA-M-337, adquirido pela empresa NIKO/SEASEEP (A). A litologia foi identificada como sendo exclusivamente de lama cinza esverdeada (B). Observa-se na figura (C) um padrão de baixos valores de *backscattering* onde foi coletado o *piston core* PMR-427, semelhante aos valores encontrados na área da locação (FIGURA II.5.1.2.30).

Fonte: QGEP (2015).

F) Caracterização geotécnica com ênfase em fatores de risco geológico

As avaliações feitas a seguir nas áreas dos blocos PAMA-M-265 e PAMA-M-337, quando oriundas da sísmica, são de caráter preliminar dada a existência apenas de levantamento 2D.

- **Possibilidade de ocorrência de movimentos gravitacionais de massa;**

Uma vez que a região das locações não apresenta variações significativas do relevo marinho (com base na batimetria de alta resolução), bem como a partir da análise de dados sísmicos convencionais (não apresentaram estruturas superficiais ativas que possam indicar a ocorrência de feições de fluxos de sedimentos), considera-se que a área possui, em princípio, baixo risco para a ocorrência de deslizamentos de massa (**Figuras II.5.1.2.34 e II.5.1.2.35**).

- **Presença de gás raso e/ou água rasa sobreprensada e de hidratos;**

Com base nos dados *multibeam* de alta resolução levantados e nos sísmicos existentes, não se observa evidências sísmicas de hidratos de gás, bem como de gás raso ou água sobreprensada (**Figuras II.5.1.2.34 e II.5.1.2.35**). Será feita uma melhor avaliação a respeito da existência dessas feições quando os dados de sísmica 3D forem adquiridos e processados.

- **Presença de falhamentos potencialmente reativáveis;**

Com base nos dados sísmicos (convencionais) existentes não se observa evidências de reativação de falhas próximas à superfície (**Figuras II.5.1.2.24 e II.5.1.2.25**). Será feita uma melhor avaliação a respeito da existência dessas feições quando os dados de sísmica 3D forem adquiridos e processados.

- **Possibilidades de danos ao reservatório;**

Dado a ser analisado e avaliado de forma mais completa quando de posse dos dados sísmicos 3D processados na região dos blocos PAMA-M-265 e PAMA-M-337, os quais possibilitarão estudos mais acurados visando a definição dos gradientes de pressões no ponto a ser perfurado.

- **Sismos tectônicos**

A região da Bacia do Pará-Maranhão (PAMA) não apresenta eventos significativos de sismicidade, de acordo com os registros divulgados pelo grupo de sismologia IAG-USP. Na **Figura II.5.1.2.38**, é apresentado o mapa de Anomalia *Free Air*, relevo da tomografia sísmica a 150 km e sismicidade do Brasil, onde se percebe uma ausência de eventos sísmicos na região do PAMA, marcada em um círculo vermelho.

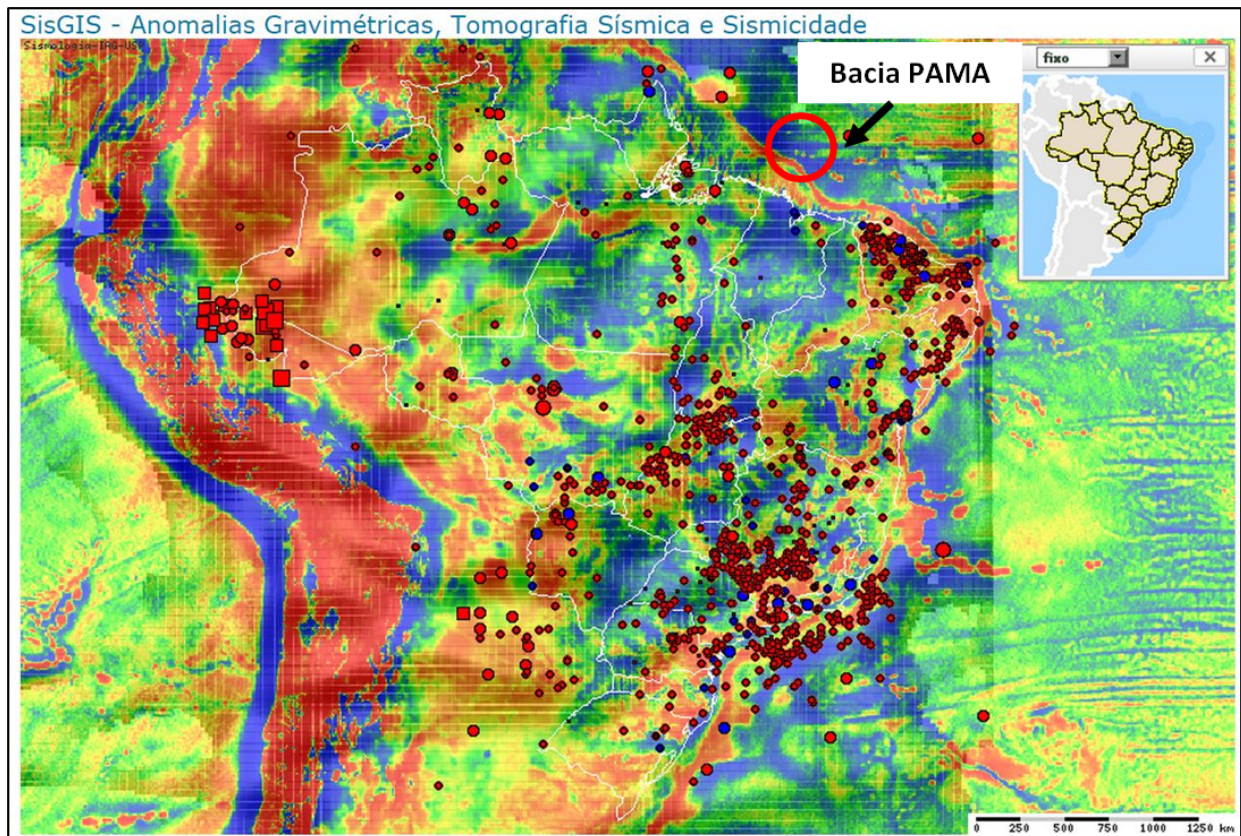


FIGURA II.5.1.2.38 - Anomalia *Free Air* + relevo da tomografia sísmica a 150 km + sismicidade do Brasil. Fonte de dados gravimétricos: grupo de Geodésia do IAG-USP.

Fonte: QGEP (2015), modificado de IAG/USP.

- **Presença de rugosidades no leito oceânico e eventuais problemas de cravação e fixação de âncoras**

Os dados sísmicos utilizados nas avaliações dos *leads* Gamela e Tembê não indicam ocorrências de falhamentos superficiais. Além disso, a fisiografia, relevo e faciologia nas áreas das locações apontam para condições favoráveis no que diz respeito a este tópico, conforme dados de *multibeam* de alta resolução.

- **Presença de estruturas de escape de fluidos.**

Os dados de *multibeam* de alta resolução utilizados não indicaram a ocorrência de estruturas típicas de escapes de fluidos como *seeps*, *pockmarks*, *mounds* ou vulcões de lama nas áreas dos blocos (**Figuras II.5.1.2.34 e II.5.1.2.35**).

Como já assinalado no início desta abordagem (**item F**), a mesma é de caráter preliminar. Unicamente a posse do dado processado do futuro levantamento 3D nos blocos PAMA-M-265 e PAMA-M-337 possibilitará uma análise mais detalhada. Contudo estes dados somente estarão disponíveis no final do primeiro semestre de 2016, quando após análise e interpretação, os resultados serão prontamente encaminhados para a avaliação do órgão ambiental. Ressaltamos também que tal caracterização já faz parte do planejamento prévio das atividades de perfuração da empresa, de forma a evitar que ocorram riscos desnecessários durante a execução do empreendimento em licenciamento.

G) Análise da possibilidade de ocorrência de zonas de alta pressão no decorrer da perfuração

Os dados de pressão existentes nas pastas dos 30 poços perfurados na bacia evidenciaram a existência de pressões anormalmente altas em pelo menos nove poços em águas rasas e um poço em água profunda (**Figura II.5.1.2.39**). Na grande maioria destes poços, a pressão anormal é indicada pelo registro através de testes de formação. Paralelamente, aumentos singulares no peso da lama para controlar devidamente as pressões anormais também estão frequentemente registrados. Em alguns casos também se observa evidências de pressão anormal mediante quebra e inversão nos gradientes dos perfis de resistividade, sônico e/ou densidade/neutrão.

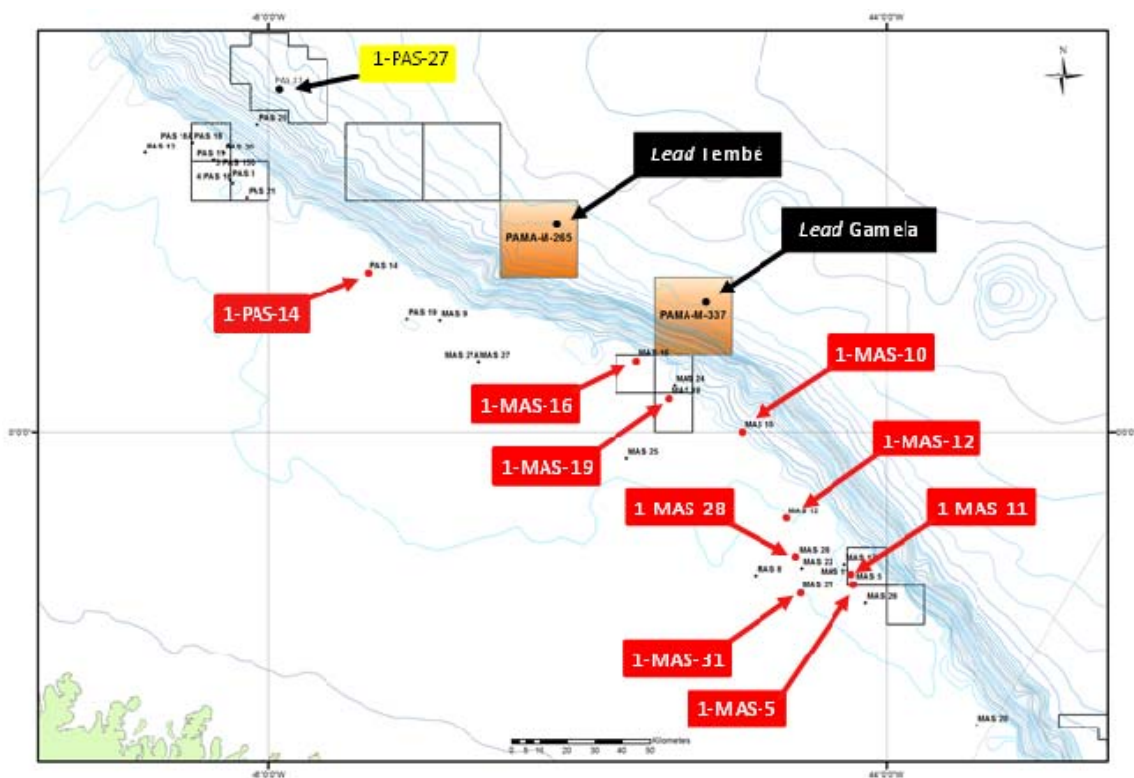


FIGURA II.5.1.2.39 - Mapa de localização dos poços perfurados (totalizando 30 poços) e dos leads na Bacia de PAMA. Destaca-se em vermelho e amarelo os onze poços nos quais foram caracterizadas zonas com pressão anormal. A maioria dos poços está localizada em água rasa, apenas um deles, em amarelo, está localizado em águas profundas, 1-PAS-27 (2.060 m de lâmina d'água).

Fonte: QGEP (2015).

Não obstante a presença destas pressões anormais, na perfuração de todos estes poços se logrou conviver sem maiores problemas com o fato. Assim, não existem registros de acidentes ou outras consequências relacionadas às mesmas. O grande recurso para conviver com este problema durante a perfuração consiste, dentre outras coisas, na previsão de revestimentos contingentes os quais constarão na nossa programação.

Dados de sísmica 3D serão fundamentais para análise de possibilidades de alta pressão no ponto a ser testado, uma vez que estes contemplam dados de velocidade mais confiável comparado com o 2D atual. O

dado sísmico 3D está previsto para o primeiro semestre de 2016 e, a partir daí, uma análise mais confiável de ocorrência de alta pressão poderá ser obtida. Desta forma, ainda não há um gráfico de pressão estimado para o prospecto, no entanto, hoje, o atual projeto base contempla, para superar esta lacuna atual, procedimentos de segurança amplamente abordados e discutidos pela área de perfuração em parte específica deste estudo ambiental.

H) Dados de Temperatura

No que diz respeito à temperatura, a estimativa do gradiente geotérmico esperado para os blocos PAMA-M-265 e PAMA-M-337 foi obtida mediante interpolações de dados registrados principalmente em poços das bacias da Foz do Amazonas (vários poços em águas profundas), Pará-Maranhão (1-PAS-27-PAS) e Ceará (*hot case*), conforme gráfico abaixo (**Figura II.5.1.2.40**). Optou-se por um gradiente médio de 30 °C/km a prevalecer na área do bloco.

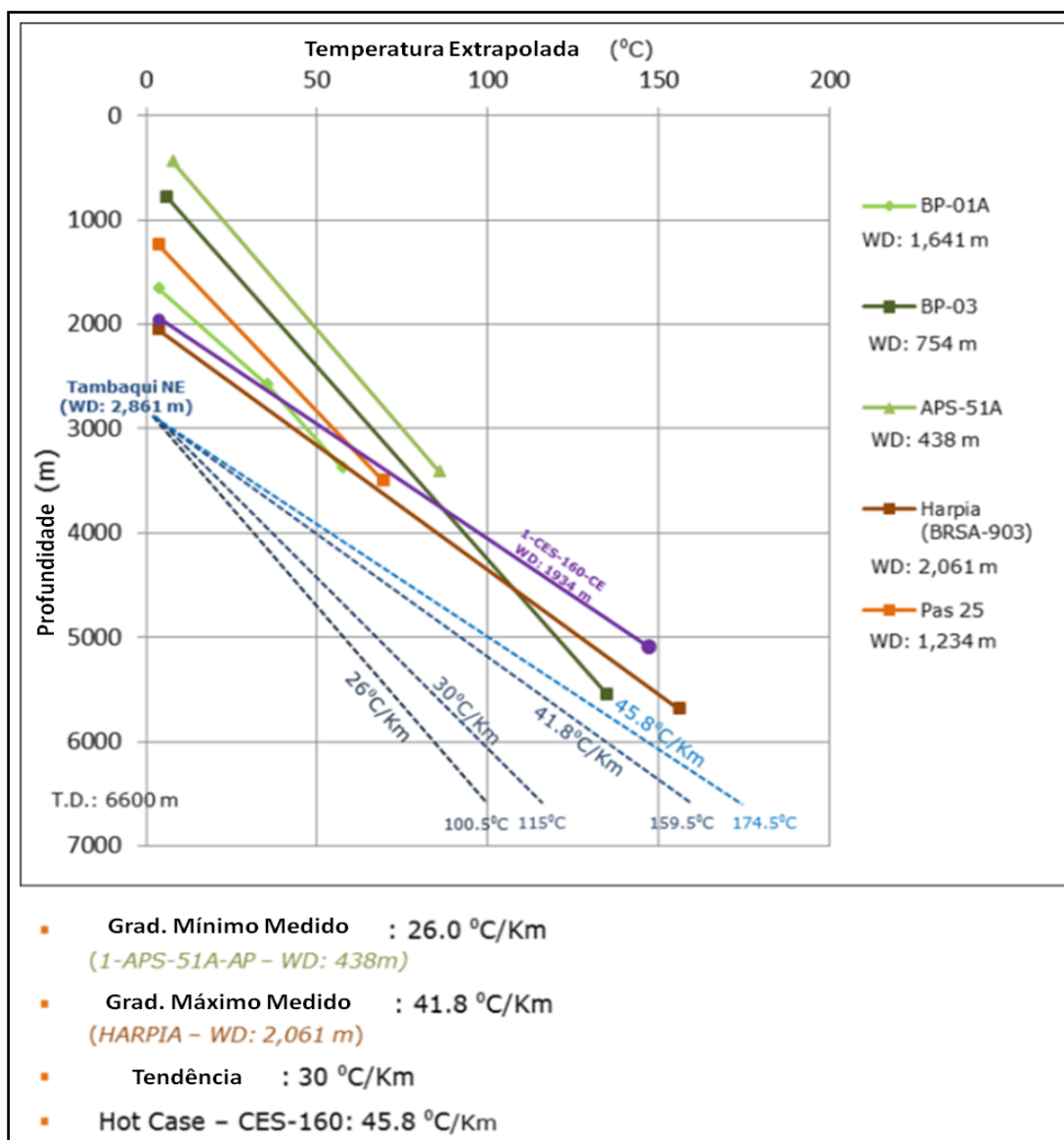


FIGURA II.5.1.2.40 - Gráfico de temperatura vs. profundidade de poços perfurados nas bacias do Pará-Maranhão, Foz do Amazonas e Ceará.

Fonte: QGEP (2015).