

II.5.1 - MEIO FÍSICO

II.5.1 - Meio Físico

II.5.1.1 - Meteorologia

Este item apresenta a caracterização climática da América do Sul e da Região Norte do Brasil e a análise dos aspectos meteorológicos mais relevantes da Bacia do Pará-Maranhão, mais precisamente, nas proximidades do Bloco BM-PAMA-8. No **item II.5.1.1.1 - Caracterização Climática**, a abordagem é geral, no âmbito da América do Sul e, como grande parte do continente está situado no Hemisfério Sul, todas as informações referentes às estações do ano referem-se a este hemisfério. Na análise meteorológica da área de influência do Bloco BM-PAMA-8 (**item II.5.1.1.2 - Caracterização Meteorológica**), entretanto, devido à sua localização no Hemisfério Norte, as informações sobre a sazonalidade estão referenciadas a este hemisfério. Sempre que possível, os comentários relacionados a um e outro hemisfério estão indicados no texto.

II.5.1.1.1 - Caracterização Climática

A região da América do Sul apresenta, em seu território, características climáticas distintas, principalmente quanto ao regime de chuvas e temperaturas, devido à sua extensão territorial, posicionamento geográfico e relevo. Essa variabilidade climática está diretamente relacionada com as condições atmosféricas decorrentes da interação entre fenômenos pertencentes a várias escalas de tempo e espaço, desde a escala planetária até a escala local.

A relação entre o padrão da circulação atmosférica sobre a América do Sul e a distribuição espacial e temporal dos sistemas meteorológicos apresenta características interessantes, tais como a Alta da Bolívia (AB), os Vórtices Ciclônicos (VCAS), a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), os Complexos Convectivos de Mesoescala (CCMs), a Baixa do Chaco (que no verão do Hemisfério Sul interage com os sistemas frontais) e ondas de frios, que surgem na região equatorial e são chamadas de friagens no inverno (Hemisfério Sul). No Oceano Atlântico tropical ocorre, ainda, a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), de extrema importância no regime de chuvas das regiões Norte e Nordeste do Brasil (RI PRO06, 2007).

Características adicionais e descrições destes sistemas podem ser encontradas em Satyamurty et al. (1998) e Lima (1996).

Particularmente sobre a América do Sul, a circulação atmosférica modifica-se significativamente da estação de verão (dezembro a fevereiro) para a estação de inverno (junho a agosto), principalmente nos altos níveis (200 hPa). Isto pode ser observado na **Figura II.5.1.1-1**, que compara os padrões de circulação troposféricos médios nessas duas estações. Na **Figura II.5.1.1-2** são apresentados os mesmos campos, para os baixos níveis (850 hPa) (RI PRO06, 2007).

Durante o verão (Hemisfério Sul), o clima da América do Sul é modulado por circulações quase-estacionárias. Na alta troposfera (aproximadamente 10 km de altura), observa-se um cavado sobre o Pacífico Leste e outro sobre o Atlântico, associado à Alta da Bolívia (AB), que eventualmente se fecha, sendo denominado Vórtice Ciclônico do Nordeste do Brasil (**Figura II.5.1.1-1-a**). No verão do Hemisfério Sul, a corrente de jato subtropical se desloca para latitudes mais altas, com máxima intensidade em aproximadamente 45° S (RI PRO06, 2007).

No inverno (Hemisfério Sul), na alta troposfera (**Figura II.5.1.1-1-b**), o padrão do escoamento é zonal e a corrente de jato de Oeste é bastante intensa, com centro de máxima intensidade localizado entre 20° S e 40° S (RI PRO06, 2007).

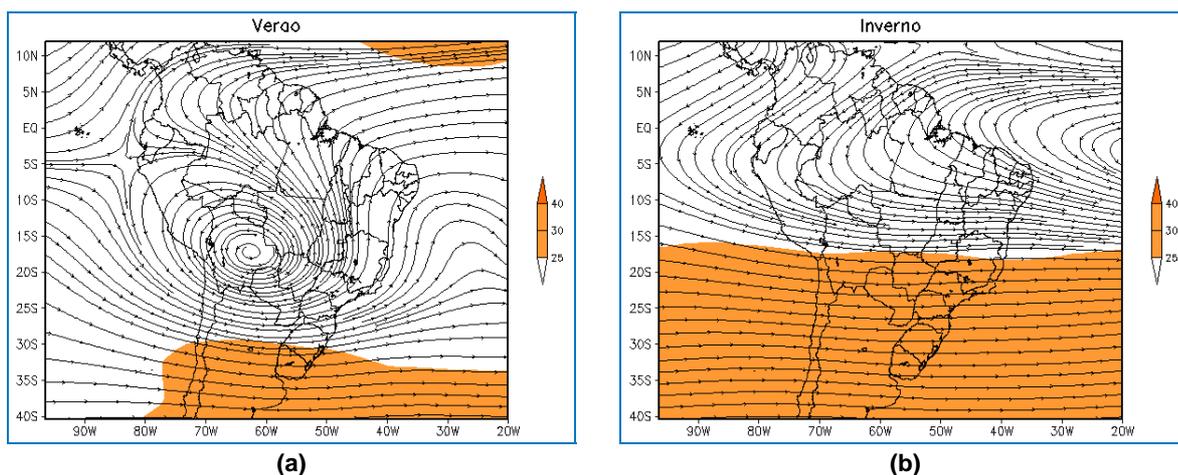


Figura II.5.1.1-1 - Campos médios sazonais do vento no nível de 200 hPa (m/s) referentes ao período de verão (a) e inverno (b), relativos ao Hemisfério Sul.

Em baixos níveis (850 hPa), o padrão do escoamento sobre a América do Sul, quando comparado ao de altos níveis, apresenta menor variação entre o verão e o inverno do Hemisfério Sul (**Figura II.5.1.1-2**). É importante destacar a presença do jato de baixos níveis abaixo de 850 hPa, que é responsável pelo transporte de vapor d'água e calor da Amazônia para a região Sul do Brasil, Paraguai e norte da Argentina (RI PRO06, 2007).

No inverno do Hemisfério Sul, observa-se os centros do Anticiclone Subtropical do Pacífico Sul (ASPS) e do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), mais fortes que no verão. Observa-se, também, um ligeiro deslocamento do ASPS para o Equador, em relação à sua posição no verão (Hemisfério Sul), e do ASAS para mais próximo do continente sul-americano (RI PRO06, 2007).

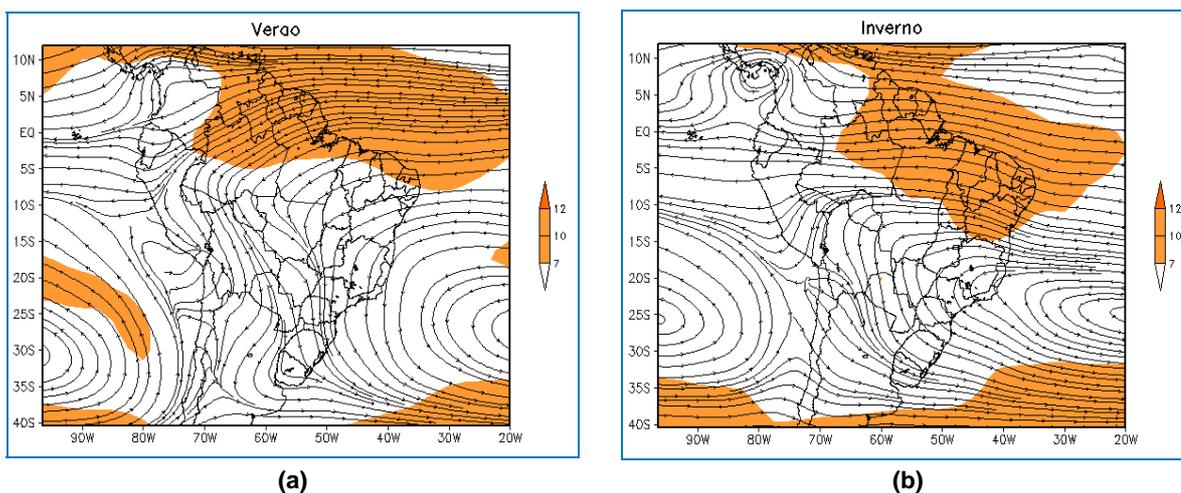


Figura II.5.1.1-2 - Campos médios sazonais do vento no nível de 850 hPa (m/s) referentes ao período de verão (a) e inverno (b), relativos ao Hemisfério Sul.

Durante o inverno (Hemisfério Sul), devido ao resfriamento do Hemisfério Sul e ao aquecimento do Hemisfério Norte, a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) ocupa a sua posição mais setentrional (MARTIN *et al.*, 1998).

No verão (Hemisfério Sul), o resfriamento do Hemisfério Norte e o aquecimento do Hemisfério Sul deslocam a ZCIT para uma posição mais ao sul, curvando-a em direção ao continente (MARTIN *et al.*, *op. cit.*). O deslocamento da ZCIT mais para sul favorece a predominância dos ventos alísios de Nordeste.

Cabe acrescentar que o posicionamento latitudinal da ZCIT sobre o Atlântico pode ser afetado por influência do fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENOS) (MARTIN *et al.*, *op. cit.*).

Outro sistema típico de verão no Hemisfério Sul é a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), fenômeno semi-estacionário caracterizado pela presença de uma banda de nebulosidade orientada de Noroeste-Sudeste, que se estende desde o sul da região Amazônica até a área central do Atlântico Sul. A **Figura II.5.1.1-3** apresenta um exemplo do posicionamento da ZCAS.

Outro fenômeno de grande escala associado à ZCAS é a oscilação de 30-60 dias, conhecida como Madden-Julian. Esta oscilação caracteriza-se pelo deslocamento para leste de uma célula zonal de número de onda 1, termicamente direta, que causa variações na convecção da região tropical (MADDEN & JULIAN, 1972), acarretando em variações na posição e velocidade da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) a qual, por sua vez, interfere na precipitação nas regiões Norte, Nordeste e Sudeste do Brasil.

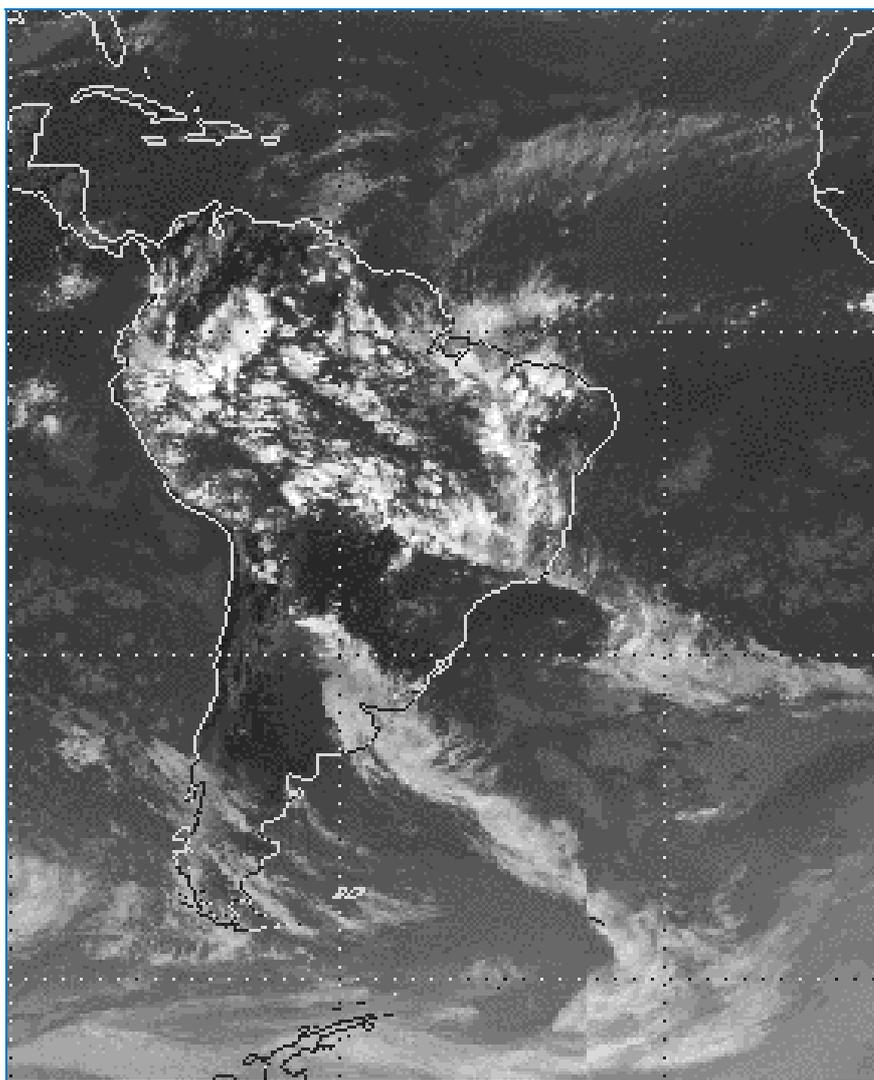


Figura II.5.1.1-3 - Imagem do satélite EUMETSAT/CPTEC, setorizada, no canal infravermelho, indicativa do posicionamento de uma ZCAS em 14/03/06 às 21Z.

Os mecanismos físicos envolvidos no acoplamento oceano-atmosfera sobre a região tropical ainda não são muito bem entendidos. O que se tem como consenso, por parte da comunidade científica, é que os padrões anormais observados no campo das anomalias de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) surgem da dinâmica interna do próprio oceano (TRENBERTH, 1997). Além disso, são forçados pelos processos dinâmicos e termodinâmicos que ocorrem na atmosfera, os quais agem mecanicamente sobre os oceanos tropicais redistribuindo as anomalias de TSM. Estas, por sua vez, através dos fluxos de calor (evaporação, processos convectivos, formação de nuvens, etc.) forçam,

simultaneamente, a atmosfera e provocam mudanças no campo de vento em baixos níveis. Tais mecanismos de realimentação, sob certas condições, produzem instabilidades no sistema acoplado (RI PRO06, 2007).

O fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENOS) é um exemplo da manifestação dessa instabilidade, podendo ser definido como um fenômeno de escala global, associado a um forte acoplamento oceano-atmosfera, que se manifesta sobre o Oceano Pacífico Tropical. Tal fenômeno consiste de uma componente oceânica - o El Niño ou La Niña - e uma componente atmosférica - a Oscilação Sul - representada pela diferença entre a pressão ao nível do mar entre o Pacífico Central (Taiti) e o Pacífico do Oeste (Darwin/Austrália) (RI PRO06, 2007).

Durante a ocorrência do fenômeno El Niño, as interações oceano-atmosfera de grande escala que se processam no Oceano Pacífico Tropical provocam modificações na circulação geral da atmosfera, isto é, na Célula de Walker, gerando mudanças nos padrões de circulação e precipitação, que podem desencadear adversidades climáticas (secas, enchentes, temperaturas altas, entre outras) em diversas regiões continentais ao redor do globo (RI PRO06, 2007).

Na região do Bloco BM-PAMA-8, os sistemas atmosféricos de grande escala que se destacam são: i) Zona de Convergência Intertropical (ZCIT); ii) El Niño-Oscilação Sul (ENSO); iii) Dipolo do Atlântico; iv) Alta da Bolívia (AB) e v) Linhas de Instabilidade (LI).

A ZCIT é uma feição meteorológica caracterizada por uma região de precipitação, que oscila entre as latitudes de 14° N até 2° S ao longo do ano (UVO & NOBRE, 1989; FERREIRA, 1996). Sua migração acompanha a zona de baixa pressão equatorial, conforme ilustrado na **Figura II.5.1.1-4**. Durante os meses de março e abril, a ZCIT atinge sua posição mais ao sul, provocando chuvas na região Norte do Brasil. Em anos chuvosos, a ZCIT desloca-se até 5° S e em anos de seca, permanece no Hemisfério Norte, inibindo a formação de chuvas no Nordeste brasileiro (RI PRO06, 2007).

O El Niño é um fenômeno global periódico do sistema acoplado oceano-atmosfera. Sua intensidade é variável e exerce grande influência sobre a região equatorial. O fenômeno ocorre devido ao aquecimento (anômalo) das águas

superficiais no Pacífico Tropical e conseqüentes mudanças na dinâmica atmosférica, como diminuição da pressão atmosférica, aumento da evaporação e mudança (enfraquecimento) dos ventos alíseos no Pacífico (ARAGÃO, 1997).

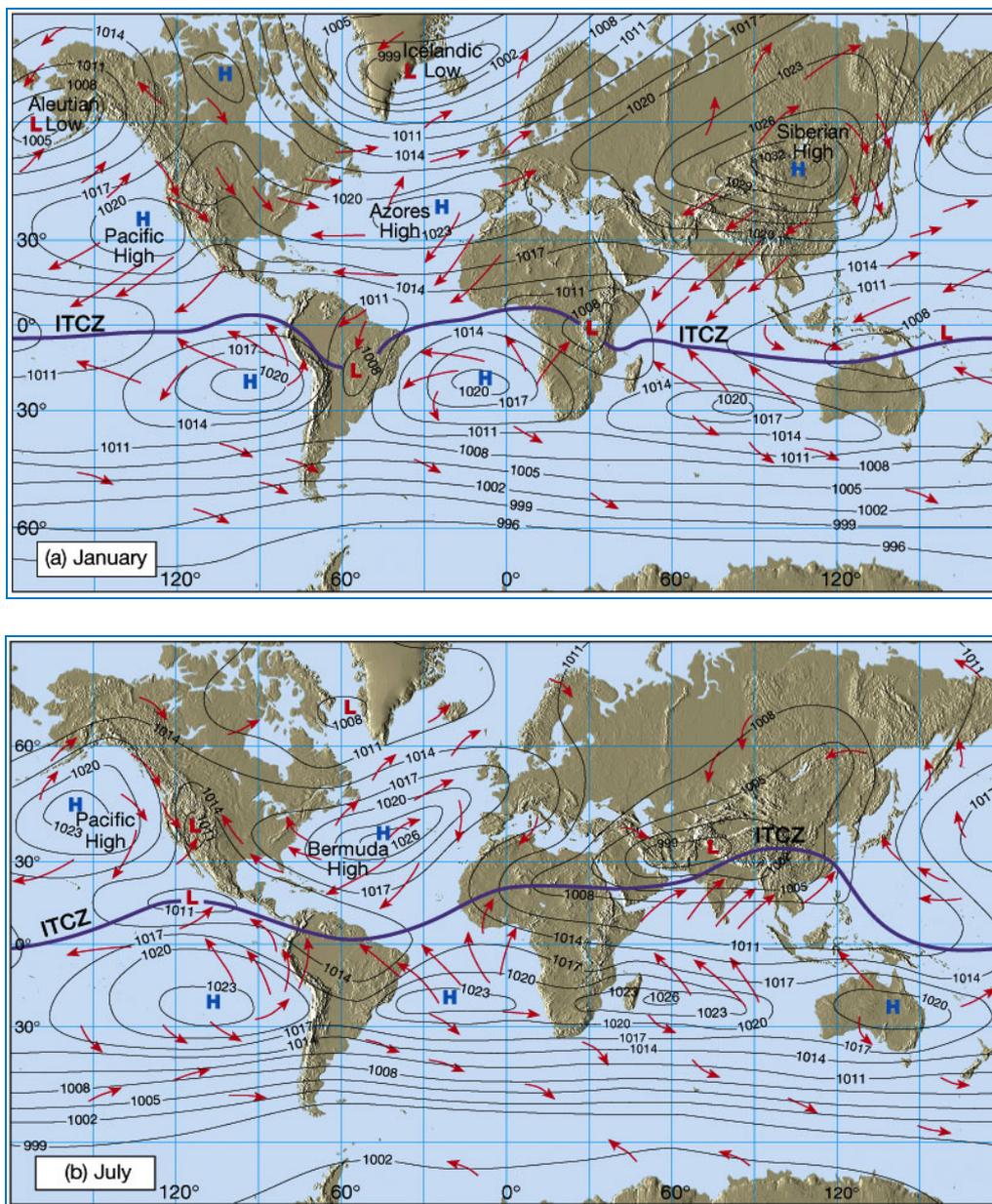


Figura II.5.1.1-4 - Posicionamento da ZCIT no verão do Hemisfério Sul (a) e no inverno do Hemisfério Sul (b).

Fonte: <http://www.ux1.eiu.edu/~cfjps/1400/circulation.html>. 11/02/2009.

As alterações sofridas no clima das regiões Norte e Nordeste do Brasil são, principalmente, devidas à modificação da célula de Walker, já que essas regiões ficam sob a ação do ramo descendente dessa célula (CAVALCANTI, 1996). O

ENSO causa movimentos descendentes anômalos, que inibem a formação de nuvens e reduzem a precipitação nessa região. Além disso, nos anos de atuação de El Niño, a ZCIT situa-se, anormalmente, mais ao norte da sua posição normal sobre o Atlântico Tropical. Conseqüentemente, os ventos alíseos de NE enfraquecem (FISCH, 1996).

De 1990 a 1994, a influência do ENSO provocou um extenso período de seca no Nordeste brasileiro. Em 1992, anomalias de precipitação na estação chuvosa na região norte do Nordeste brasileiro foram detectadas e associadas à fraca intensidade da ZCIT (FISCH, *op. cit.*). Nos anos de 1925-26, 1976-77 ou 1982-83, o El Niño foi intenso e a precipitação do verão (Hemisfério Sul) foi mais baixa que nos anos normais sobre o norte da Amazônia, resultando em baixos níveis de água dos rios Negro e Amazonas (FISCH, *op. cit.*).

A Alta da Bolívia (AB), um anticiclone que ocorre no verão (Hemisfério Sul) na alta troposfera (200 hPa) sobre a América do Sul, pode intensificar a convecção na região frontal, com a divergência em altitude ajudando nesse processo. Durante a época de inverno, ocorre a desintensificação da AB, com o seu completo desaparecimento (GUSMÃO, 1996). A localização geográfica da AB possui variação intrasazonal e interanual, associado com a convecção na Amazônia. FISCH (*op. cit.*) observou que, durante anos menos chuvosos na região Amazônica, os centros da AB eram menos intensos e, na ocorrência de El Niño, a AB localizava-se, em geral, à oeste de sua posição climatológica.

O Dipolo do Atlântico, causador de mudanças anômalas na temperatura da água do oceano Atlântico Tropical, tem influência na circulação de Hadley, diminuindo ou aumentando a precipitação no Nordeste do Brasil.

As Linhas de Instabilidade (LI) são caracterizadas por possuírem grandes conglomerados de nuvens cumulonimbus e são formadas devido à circulação de brisa marítima. As LI são um dos sistemas atmosféricos atuantes na área leste do Pará e que contribuem com 45% da chuva durante o período chuvoso. Posiciona-se ao sul da ZCIT, sendo que o período de maior ocorrência é a época em que a ZCIT encontra-se mais organizada, ou seja, em sua posição mais ao norte (FISCH, *op. cit.*).

II.5.1.1.2 - Caracterização Meteorológica

A caracterização meteorológica da região da Bacia do Pará-Maranhão, e também, mais especificamente, da locação do Bloco BM-PAMA-8, baseou-se na análise e interpretação dos dados das seguintes fontes:

- Normais climatológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) na estação de São Luis/MA;
- Dados de ventos, temperatura do ar, precipitação, pressão atmosférica e umidade relativa das Reanálises II do NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research);
- Cartas sinóticas do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais; e
- Dados bibliográficos existentes para a região.

As normais climatológicas obtidas no INMET fornecem médias mensais de parâmetros meteorológicos de um determinado local pelo período de 30 anos, caracterizando a distribuição dos dados dentro de uma faixa de incidência habitual. Conforme dito anteriormente, serão apresentadas as normais climatológicas obtidas na estação de São Luís (situada nas coordenadas 2° 31' 48" S e 44° 13' 12" W), para o período de 1931 a 1990, perfazendo um total de 60 anos.

Os dados do NCEP utilizados para as análises de ventos foram obtidos do ponto de grade da Reanálise-II mais próximo ao Bloco BM-PAMA-8, com observações a cada 6 horas, de janeiro de 1979 a dezembro de 2008, compreendendo 43.832 dados. Para análise de extremos, foram utilizados os dados da Reanálise de janeiro de 1958 a dezembro de 2007, novamente com observações de 6 em 6 horas.

As localizações da estação meteorológica do INMET, da posição do ponto de grade do NCEP utilizado para a análise pontual e para a análise espacial são apresentadas na **Figura II.5.1.1-5**.

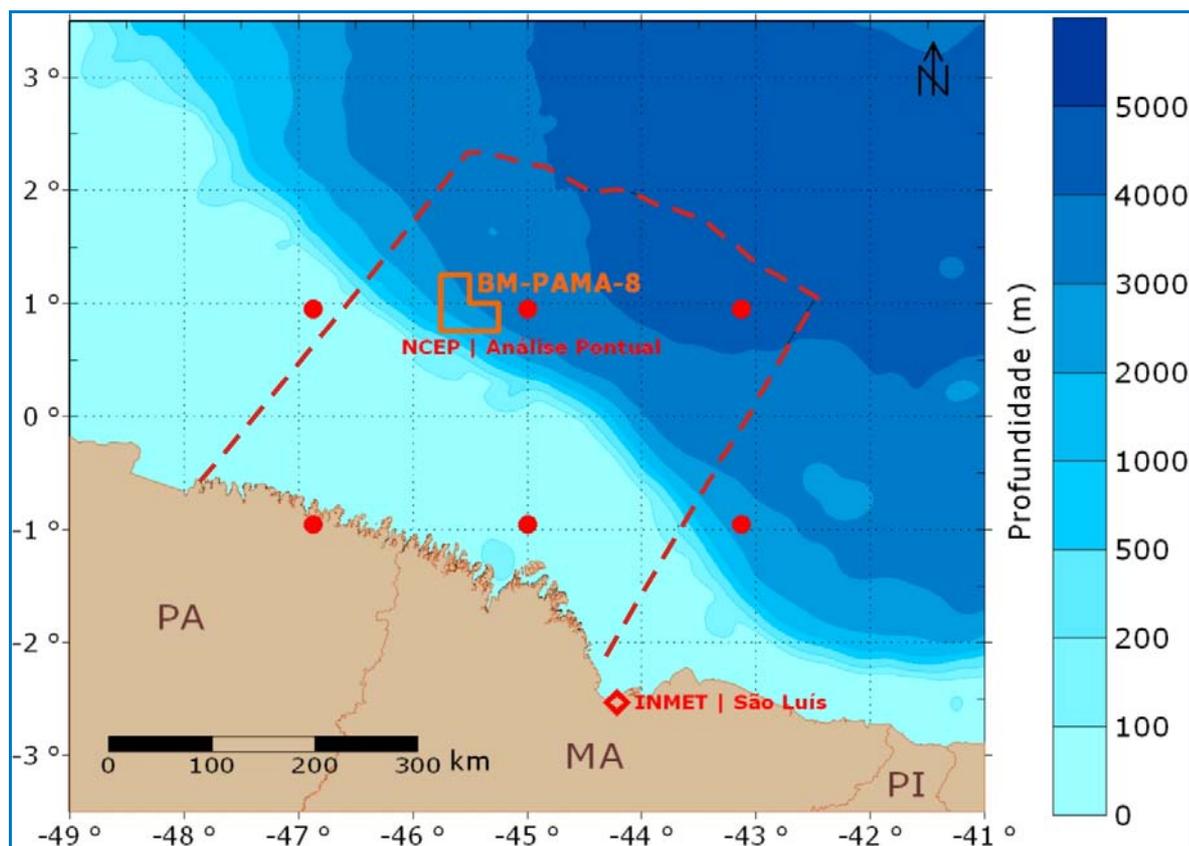


Figura II.5.1.1-5 - Localização da estação meteorológica do INMET de São Luís/MA e dos pontos de grade do NCEP para análises pontuais (pontos vermelhos) e espaciais. A região no interior do polígono tracejado de vermelho representa a área utilizada para análise dos parâmetros meteorológicos obtidos no NCEP.

Na **Quadro II.5.1.1-1** observa-se um resumo com as fontes de dados utilizadas no estudo, e as suas respectivas localizações.

Quadro II.5.1.1-1 - Localização das fontes de dados utilizadas.

| Fontes | Coordenadas | | Parâmetros |
|------------------|---------------------------|---------------|-------------------|
| | Latitude | Longitude | |
| INMET-São Luis | 2° 32' S | 44° 13' W | TA, P, E, UR e PA |
| NCEP-NCAR | 0° 57' S | 45° 00' W | V |
| NCEP-NCAR (área) | 2° 51' 26" - 4° 45' 43" N | 43° - 47° W | V |
| NCEP-NCAR (área) | 3° S - 3° N | 42° W - 48° W | TA, P, UR, PA |

Legenda: TA = Temperatura do Ar; P = Precipitação; E = Evaporação; UR = Umidade Relativa; PA = Pressão Atmosférica; I = Insolação; V = Ventos; SF = Passagem de Sistemas Frontais.

A - Temperatura

Na estação de São Luís, a média mensal de temperatura (**Figura II.5.1.1-6**) variou de 25,7 a 27,3 °C, no intervalo entre 1931 e 1990. A partir do mês de julho (mês de menor temperatura), a temperatura média eleva-se gradativamente até o ápice no mês de novembro (27,3 °C no período de 1931 a 1960 e 27 °C no período de 1961 a 1990). Nos meses seguintes, a temperatura volta a diminuir, e o período entre fevereiro e julho é de temperaturas mais baixas, cujo valor médio máximo é de 26,4 °C.

Considerando as normais de temperatura dos dois períodos, é possível observar que a temperatura máxima em São Luís apresenta uma curva semelhante à de temperatura média, porém com menores valores (29,4 °C) nos meses de fevereiro e março, e maiores entre setembro e dezembro (média das máximas maior que 31°C) (**Figura II.5.1.1-7**). Os valores mais baixos de temperatura mínima (**Figura II.5.1.1-8**) ocorreram em janeiro (22,3°C), julho (~22,7 °C) e dezembro (22,9°C). A temperatura máxima absoluta (**Figura II.5.1.1-9**) registrada nos 60 anos foi de 34,8 °C, em novembro, e a mínima absoluta (**Figura II.5.1.1-10**) de 17,9 °C foi registrada em março.

Os gráficos climatológicos de temperatura indicam que o período de 1931 a 1960 foi ligeiramente mais quente (~ 0,6 °C) que o período compreendido entre os anos de 1961 e 1990. Entretanto, não se pode afirmar sem um estudo aprofundado com esse objetivo que esta seja uma tendência de resfriamento devido aos fenômenos naturais, pois os métodos de aquisição de dados evoluíram bastante durante este período.

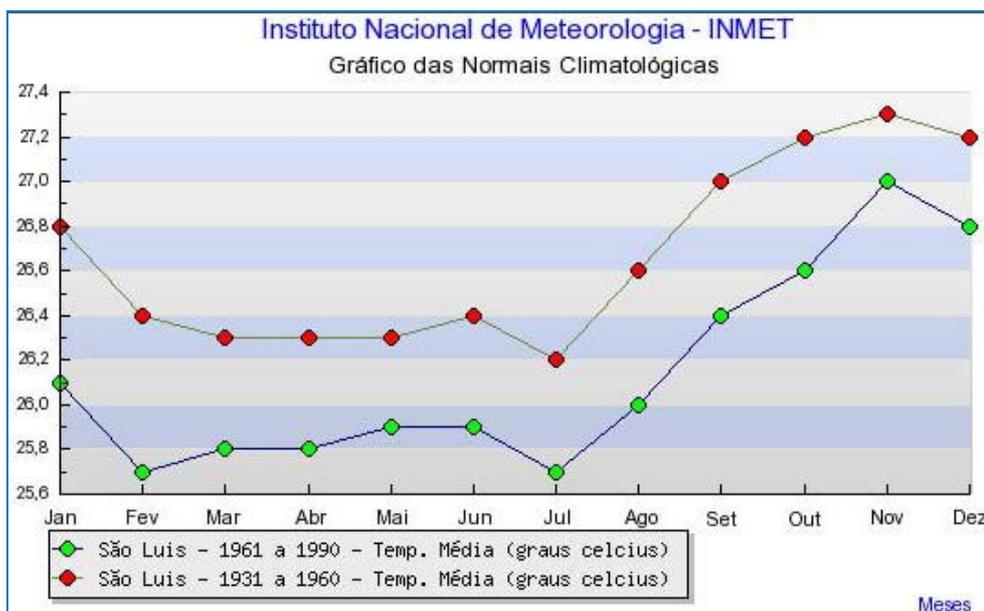


Figura II.5.1.1-6 - Temperatura média na estação de São Luís.

Fonte: INMET.

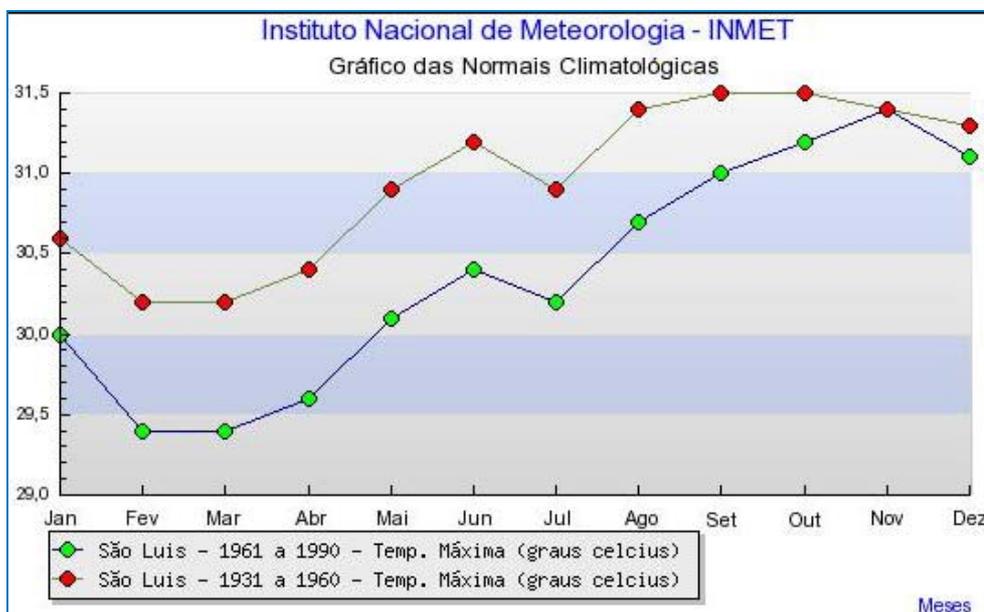


Figura II.5.1.1-7 - Temperatura máxima na estação de São Luís.

Fonte: INMET.

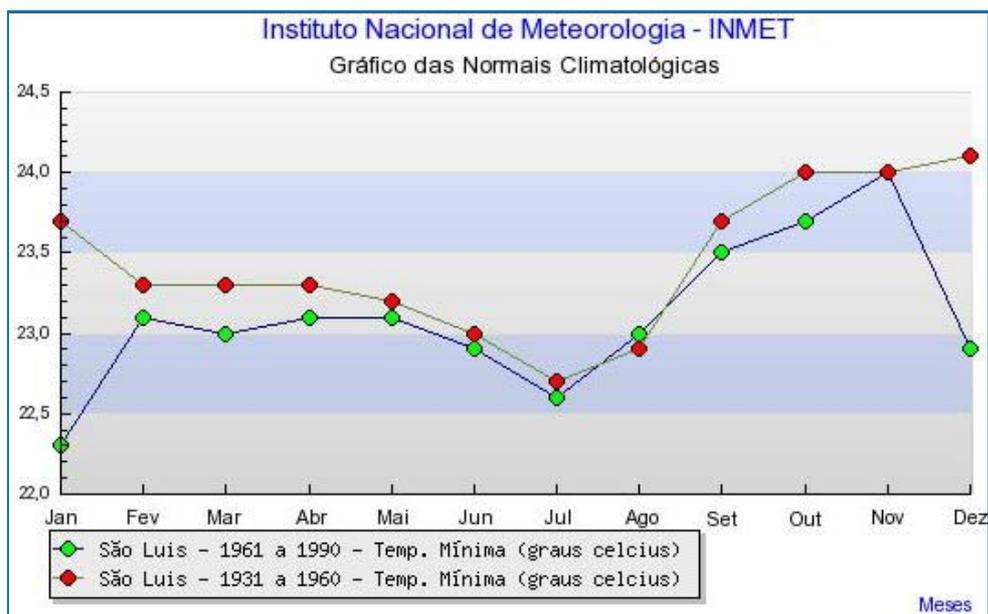


Figura II.5.1.1-8 - Temperatura mínima na estação de São Luís.

Fonte: INMET.

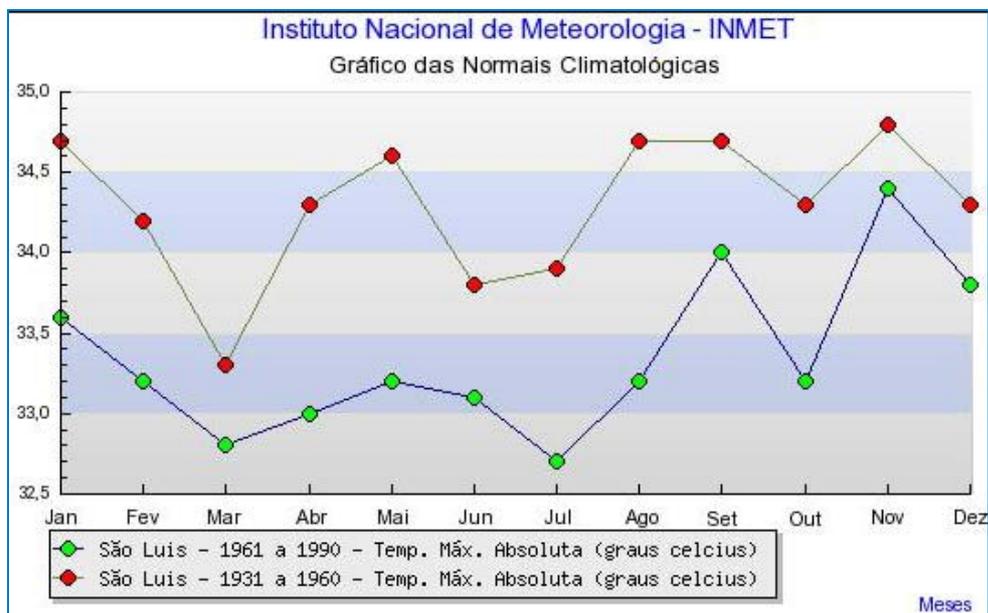


Figura II.5.1.1-9 - Temperatura máxima absoluta na estação de São Luís.

Fonte: INMET.

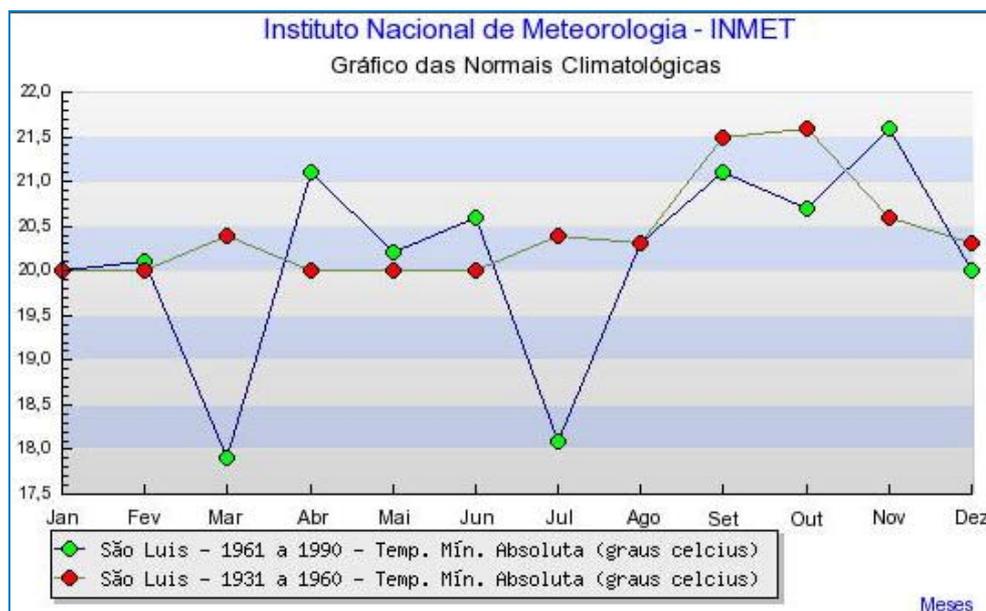


Figura II.5.1.1-10 - Temperatura mínima absoluta na estação de São Luís.

Fonte: INMET.

Para a avaliação das variações espaciais e sazonais da temperatura do ar na região da Bacia do Pará-Maranhão, são apresentadas, na **Figura II.5.1.1-11** e na **Figura II.5.1.1-12**, médias sazonais dos dados de temperatura do ar a 2 m de altitude, obtidos das Reanálises do NCEP.

A **Figura II.5.1.1-11** mostra que, durante o período chuvoso (janeiro a junho), a temperatura média na região do BM-PAMA-8 está entre ~26,5 e 27°C. Verifica-se que neste período há um aumento da temperatura de oeste para leste na Bacia do Pará-Maranhão. No período seco (**Figura II.5.1.1-12**), a temperatura na área do bloco se encontra entre 27,2 e 27,4°C e as maiores temperaturas são encontradas na porção sul da Bacia.

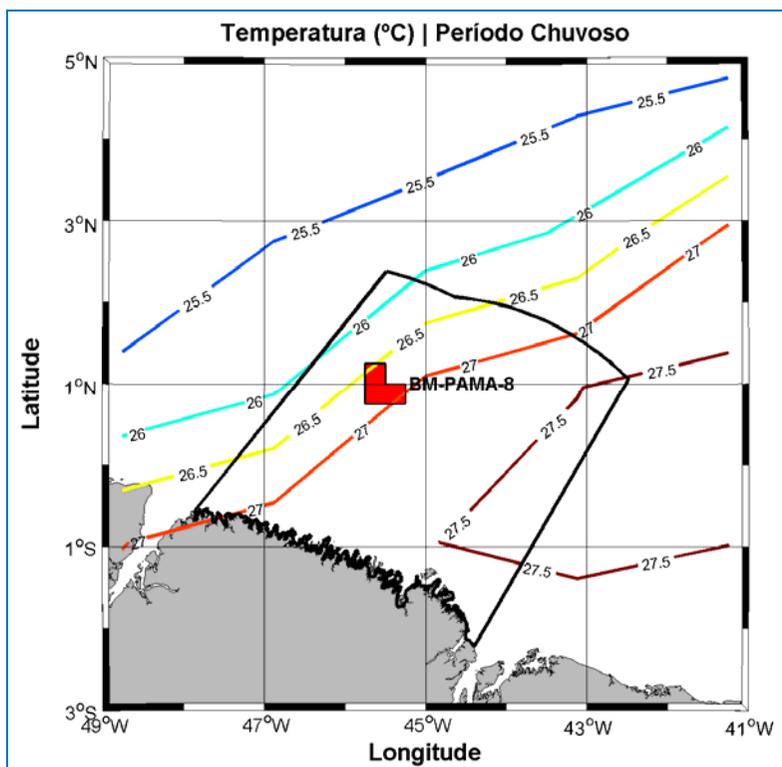


Figura II.5.1.1-11 - Temperatura do ar na Bacia do Pará-Maranhão, durante o período chuvoso (janeiro a junho).

Fonte: NCEP.

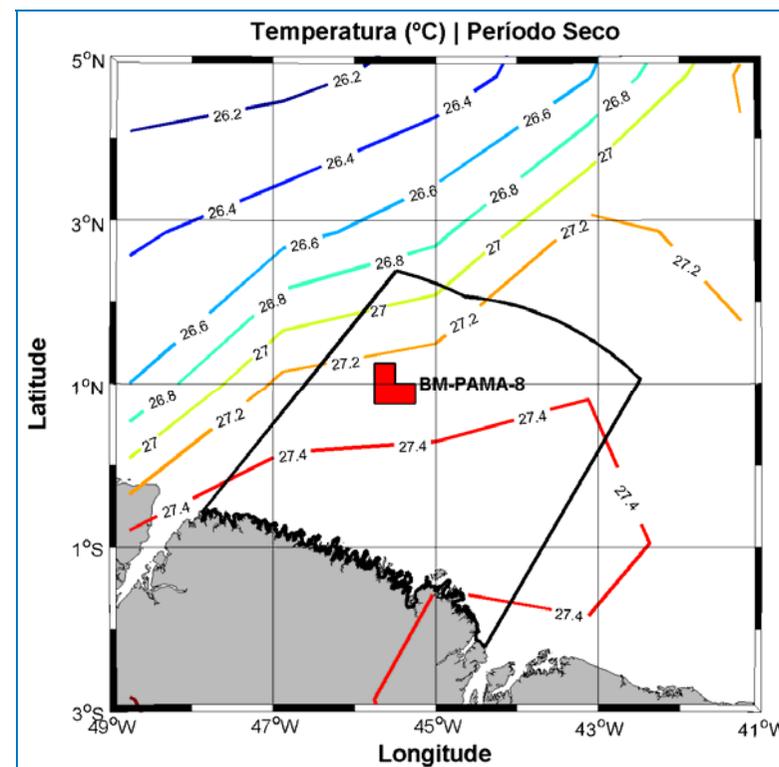


Figura II.5.1.1-12 - Temperatura do ar na Bacia do Pará-Maranhão, durante o período seco (julho a dezembro).

B - Precipitação

Na cidade de São Luís/MA, como pode ser observado na **Figura II.5.1.1-13**, o período de maior precipitação (chuvoso) ocorre entre janeiro e junho, com um pico de aproximadamente 475 mm registrado no mês de abril. Entre os meses de julho e dezembro (período seco), o nível de precipitação é mais baixo e estável, com valores entre 0 e 150 mm.

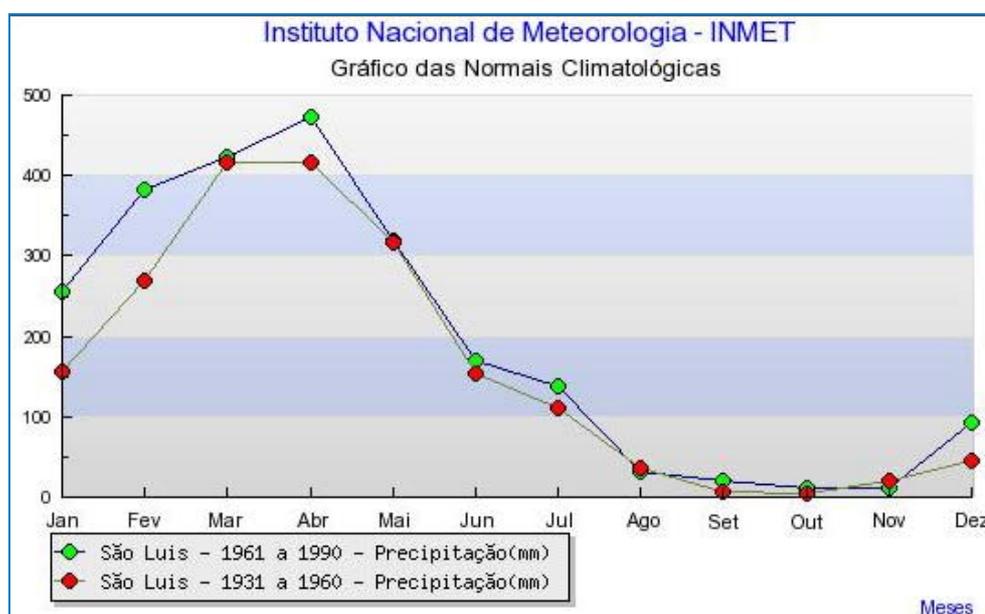


Figura II.5.1.1-13 - Precipitação na estação de São Luís.

Fonte: INMET

Os meses de março e abril apresentam os maiores índices de precipitação, pois a ZCIT atinge sua posição mais ao sul durante estes dois meses, provocando chuvas intensas na região Norte do Brasil. Um exemplo da migração da ZCIT na região pode ser observado através das cartas sinóticas do CPTEC/INPE. Na **Figura II.5.1.1-14-a**, é apresentada a carta sinótica para o dia 15 de abril de 2009 (período chuvoso), demonstrando o posicionamento da ZCIT sobre a região de estudo. No dia 15 de outubro de 2009 (**Figura II.5.1.1-14-b**) verifica-se que a ZCIT esta posicionada mais ao norte, característica do período seco na região.

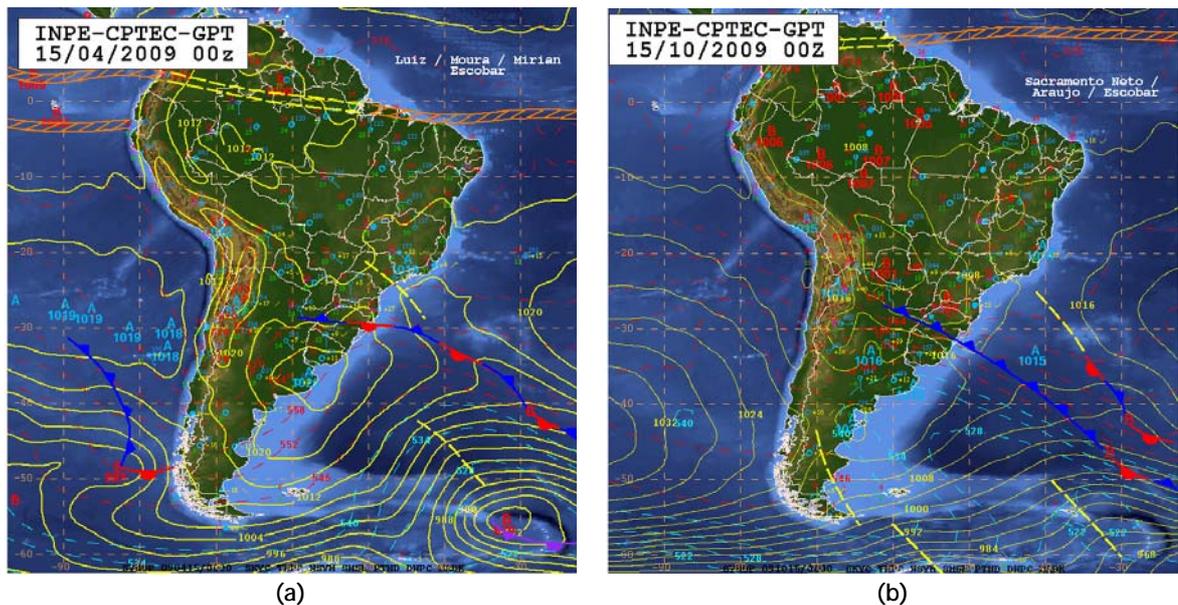


Figura II.5.1.1-14 - Cartas sinóticas para o período chuvoso (a) e seco (b) na Região Norte do Brasil.

Fonte: CPTEC/INPE

Para avaliação das variações espaciais e sazonais da precipitação na região da Bacia Pará-Maranhão, são apresentadas, na **Figura II.5.1.1-15** e na **Figura II.5.1.1-16**, médias sazonais dos dados de precipitação, obtidos a partir das Reanálises II do NCEP.

Assim como demonstrado pelas normais climatológicas do INMET, fica evidente a ocorrência de dois períodos bem marcados, um chuvoso e um seco. No período chuvoso (**Figura II.5.1.1-15**), que vai de janeiro a junho, a taxa de precipitação nas proximidades do BM-PAMA-8 é de $\sim 51 \text{ Kg/m}^2$. Na estação seca (**Figura II.5.1.1-16**), que vai de julho a dezembro, a precipitação nas vizinhanças do Bloco se encontra entre 44 e 43 Kg/m^2 .

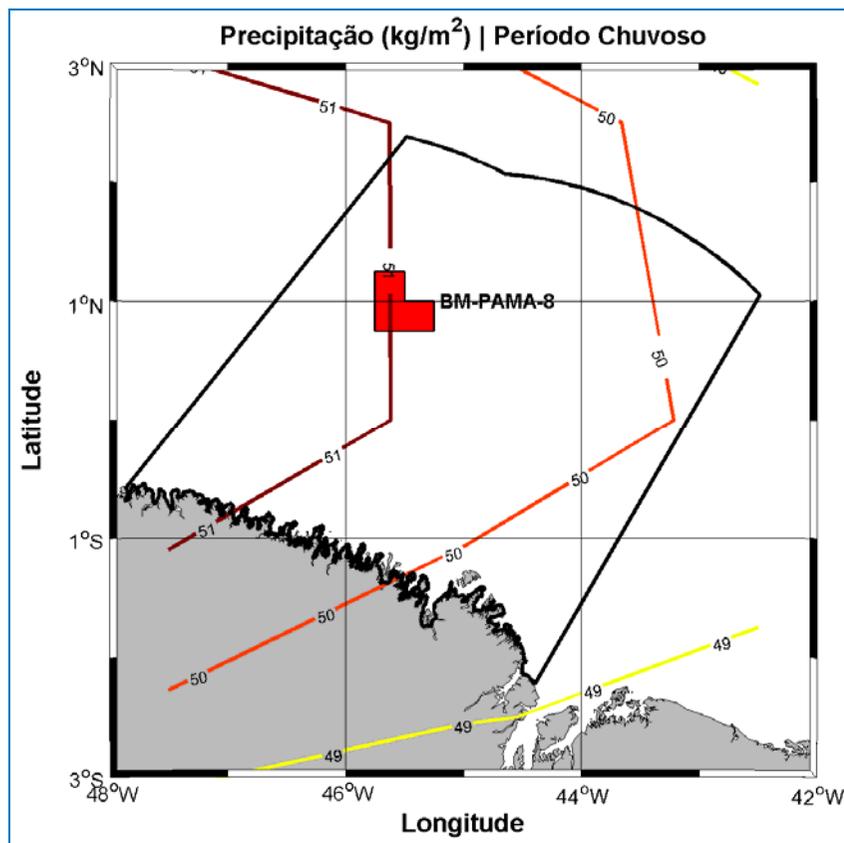


Figura II.5.1.1-15 - Precipitação (Kg/m²/s) na região da Bacia do Pará-Maranhão no período chuvoso (janeiro a junho).

Fonte: NCEP.

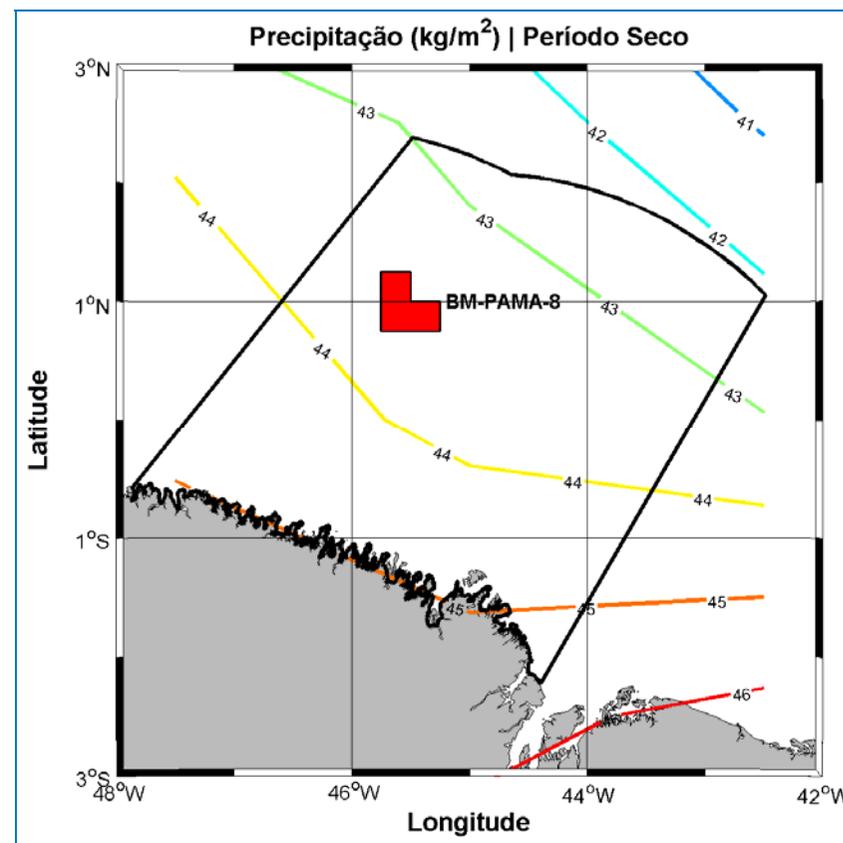


Figura II.5.1.1-16 - Precipitação (Kg/m²/s) na região da Bacia do Pará-Maranhão no período seco (julho a dezembro).

C - Evaporação

A evaporação em São Luís/MA (**Figura II.5.1.1-17**) apresenta comportamento inverso ao da precipitação. No período chuvoso, observam-se os valores mais baixos de evaporação, enquanto que no período seco, esta é bem mais significativa. O mínimo de evaporação ocorre no mês de abril (~42 mm), e o máximo (130 mm), no mês de outubro.

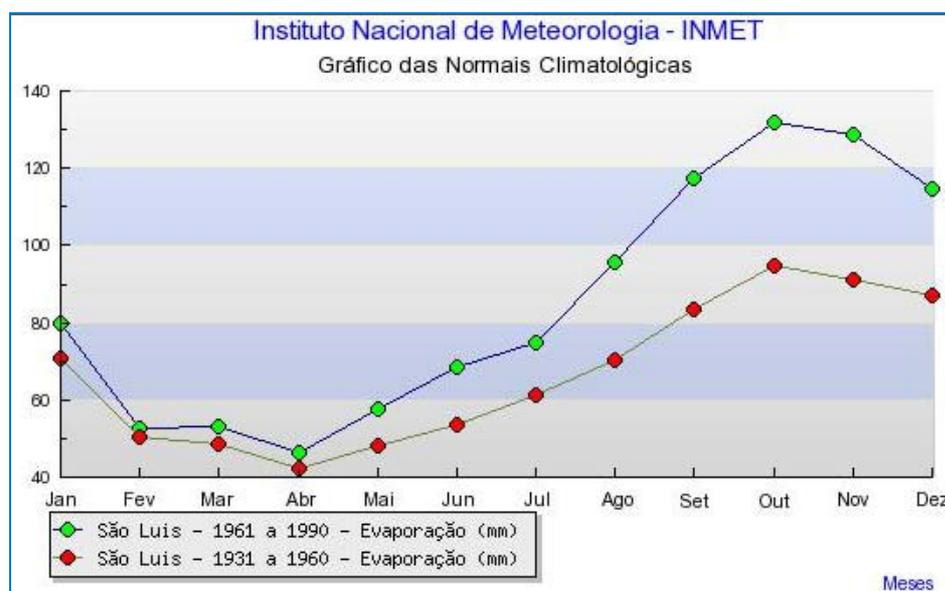


Figura II.5.1.1-17 - Evaporação na estação de São Luís.

Fonte: INMET.

D - Umidade Relativa

A umidade (**Figura II.5.1.1-18**) na cidade de São Luís/MA segue o comportamento da precipitação, conforme previsto. Na estação chuvosa (janeiro a junho), a umidade relativa é bastante significativa, com média de 90% no mês de abril. No período seco (julho a dezembro), a umidade apresenta seu mínimo (79%) no mês de novembro, valor este relativo ao período mais recente (1961 a 1990).

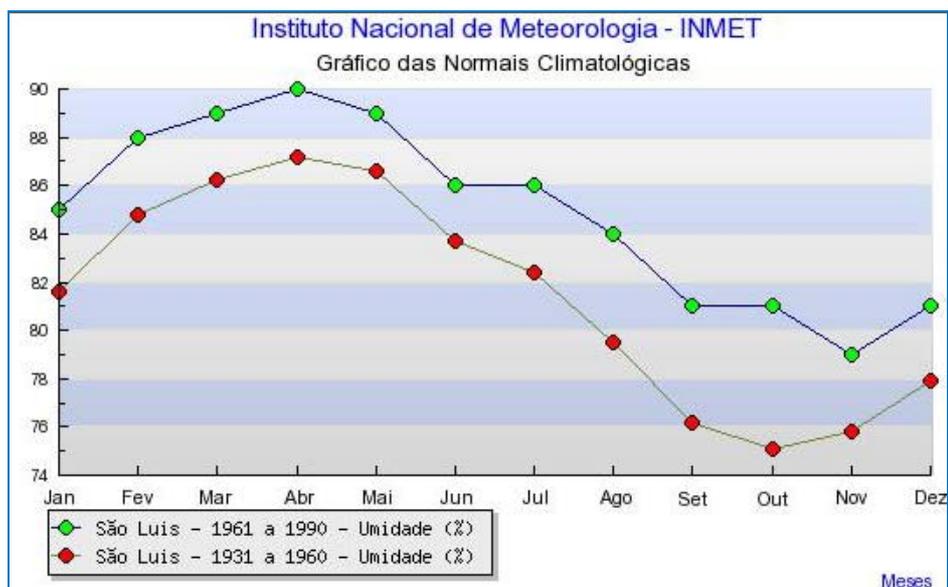


Figura II.5.1.1-18 - Umidade relativa na estação de São Luís.

Fonte: INMET.

Para avaliação das variações espaciais e sazonais da umidade relativa do ar na região da Bacia do Pará-Maranhão, são apresentadas, na **Figura II.5.1.1-19** e na **Figura II.5.1.1-20**, médias sazonais dos dados de umidade relativa do ar a 2 m, obtidos a partir das Reanálises II do NCEP. Durante o período chuvoso (janeiro a junho), a umidade na Bacia do Pará-Maranhão varia de ~82 % na porção leste, a 88 % à oeste da Bacia. Na estação seca (julho a dezembro), praticamente toda Bacia se encontra com umidades entre 75 e 78 %.

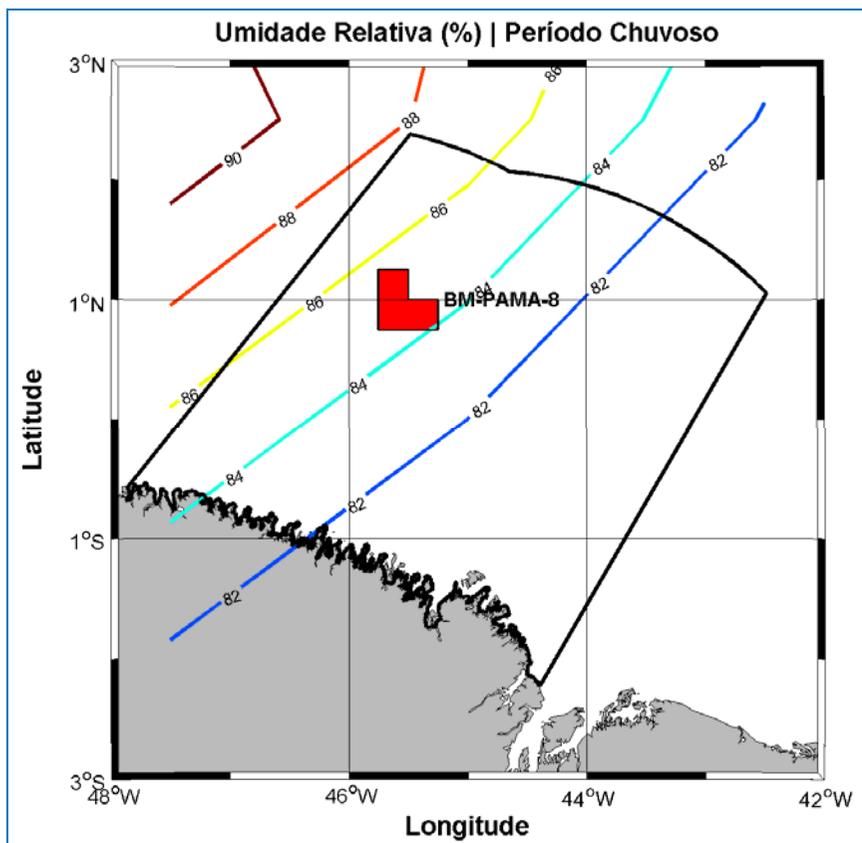


Figura II.5.1.1-19 - Umidade relativa do ar (%) na região da Bacia do Pará-Maranhão no período chuvoso (janeiro a junho).

Fonte: NCEP.

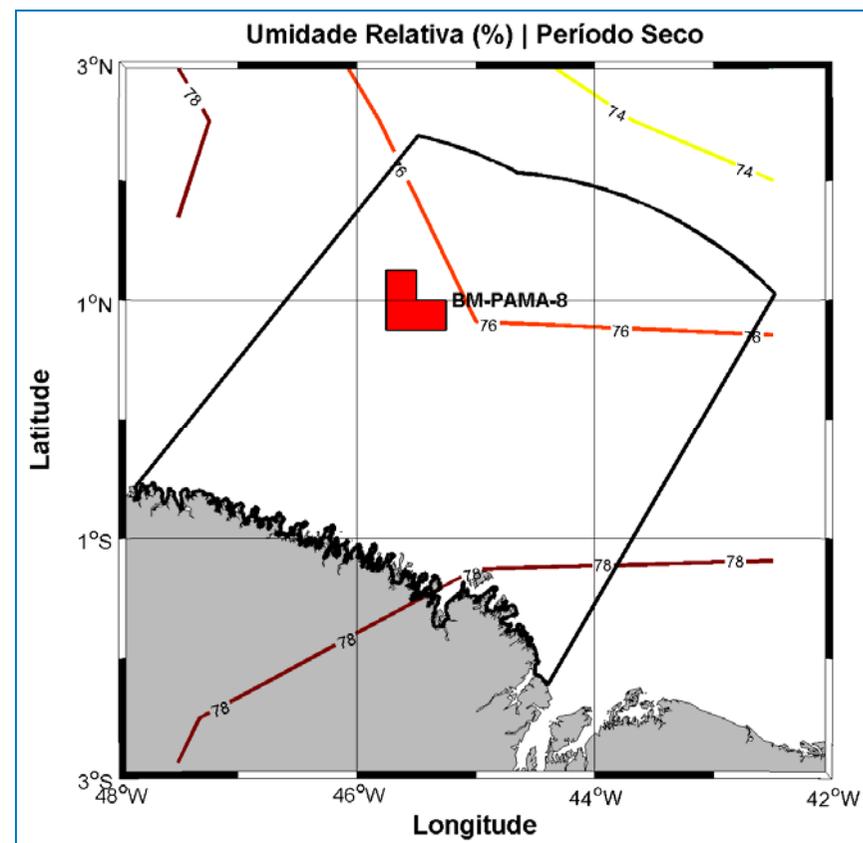


Figura II.5.1.1-20 - Umidade relativa do ar (%) na região da Bacia do Pará-Maranhão no período seco (julho a dezembro).

E - Pressão Atmosférica

Na estação de São Luís/MA, a pressão atmosférica (**Figura II.5.1.1-21**) é maior no período de verão, e menor no de inverno, ambos relativos ao Hemisfério Norte. Durante os sessenta anos analisados, o valor médio máximo foi da ordem de 1010 hPa, em julho; e o mínimo, 1004 hPa, em dezembro.

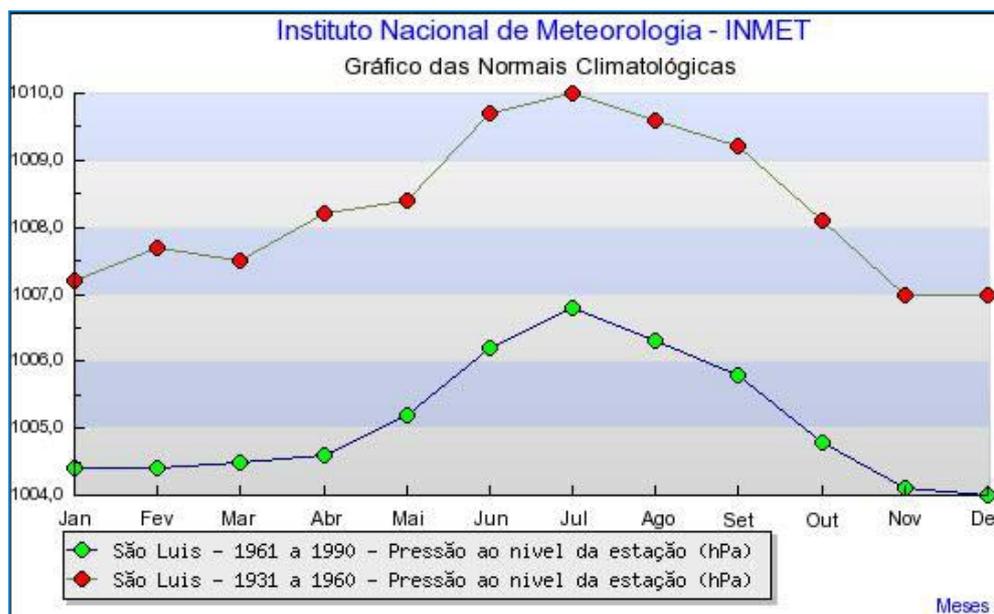


Figura II.5.1.1-21 – Pressão atmosférica na estação de São Luís.

Fonte: INMET.

Para avaliação das variações espaciais e sazonais da pressão atmosférica na região da Bacia do Pará-Maranhão, são apresentadas, na **Figura II.5.1.1-22** e na **Figura II.5.1.1-23**, médias sazonais dos dados de pressão atmosférica, obtidos a partir das Reanálises do NCEP.

Como poderá ser verificado nas figuras apresentadas a seguir, tanto para o período chuvoso (**Figura II.5.1.1-22**) quanto para o período seco (**Figura II.5.1.1-23**), o padrão espacial apresentado pelo parâmetro é praticamente o mesmo.

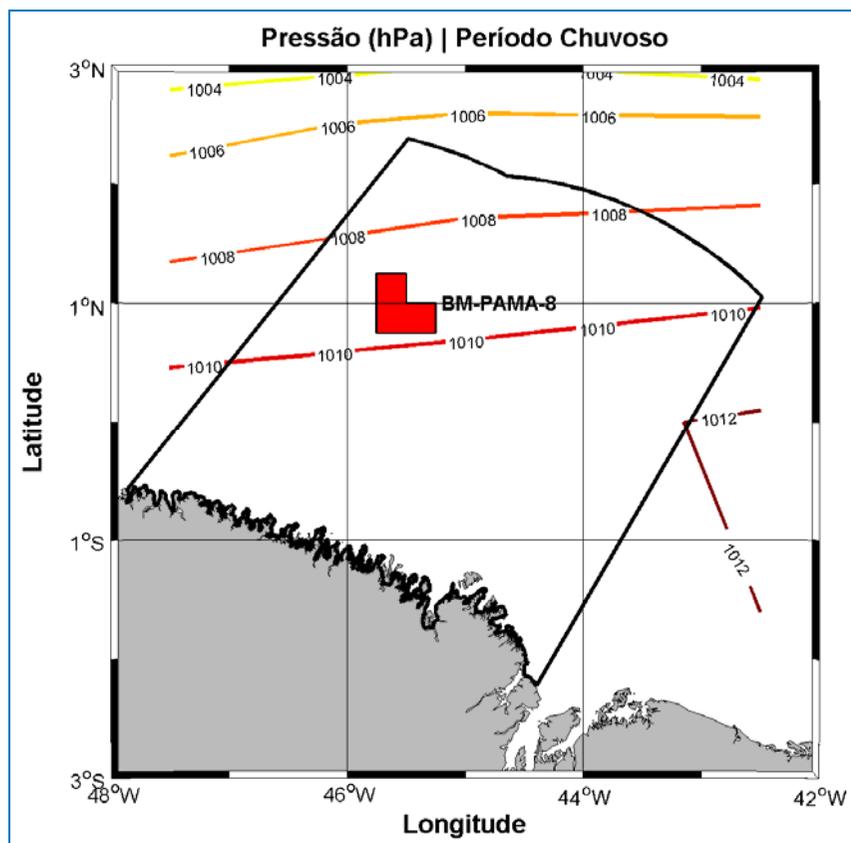


Figura II.5.1.1-22 - Pressão atmosférica (hPa) na região da Bacia do Pará-Maranhão no período chuvoso (janeiro a junho).

Fonte: NCEP.

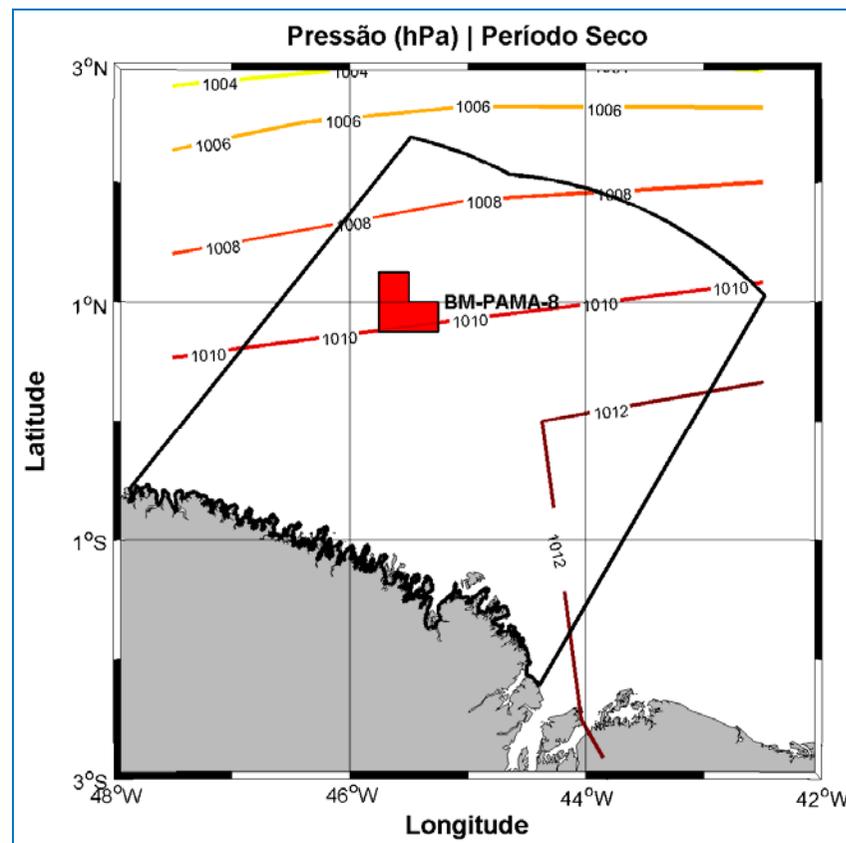


Figura II.5.1.1-23 - Pressão atmosférica (hPa) na região da Bacia do Pará-Maranhão no período seco (julho a dezembro).

F - Ventos

A caracterização dos ventos na região da Bacia do Pará-Maranhão e do Bloco BM-PAMA-8 baseou-se nos dados da Reanálise II (R-2) do NCEP, a 10 metros de altitude, do ponto de grade mais próximo ao ponto médio do Bloco (ver **Figura II.5.1.1-2**), obtidos a cada 6 horas, de janeiro de 1979 a dezembro de 2008, compreendendo 43.832 dados.

Com relação ao projeto R-2 (NCEP - DOE AMIP-II Reanalysis), trata-se de uma série global atualizada, de 1979 até 2008, que corrige os erros de processamento da Reanálise, utilizando um modelo de previsão e um sistema de assimilação de dados mais robustos. Assim, é gerada uma reanálise mais consistente e recomendada para usuários que eram afetados por alguns erros presentes anteriormente. Dentre estes erros, podemos citar as análises de transientes no Hemisfério Sul; o uso de temperaturas próximas à superfície e cobertura de neve sobre os continentes no Hemisfério Norte durante o inverno; análise da umidade dos solos; análises do balanço de neve; e sensibilidade das análises à mudanças no modelo de assimilação (KANAMITSU *et al.*, 2002).

Considerando a média ao longo de todo o período de 1979 a 2008, verifica-se que os ventos de E e NE são predominantes em toda região da Bacia do Pará-Maranhão, como pode ser observado na **Figura II.5.1.1-24**. Destaca-se apenas que nos pontos mais próximos ao continente, a intensidade dos ventos é menor, e que há uma maior contribuição dos ventos de nordeste na região oeste da Bacia do Pará-Maranhão.

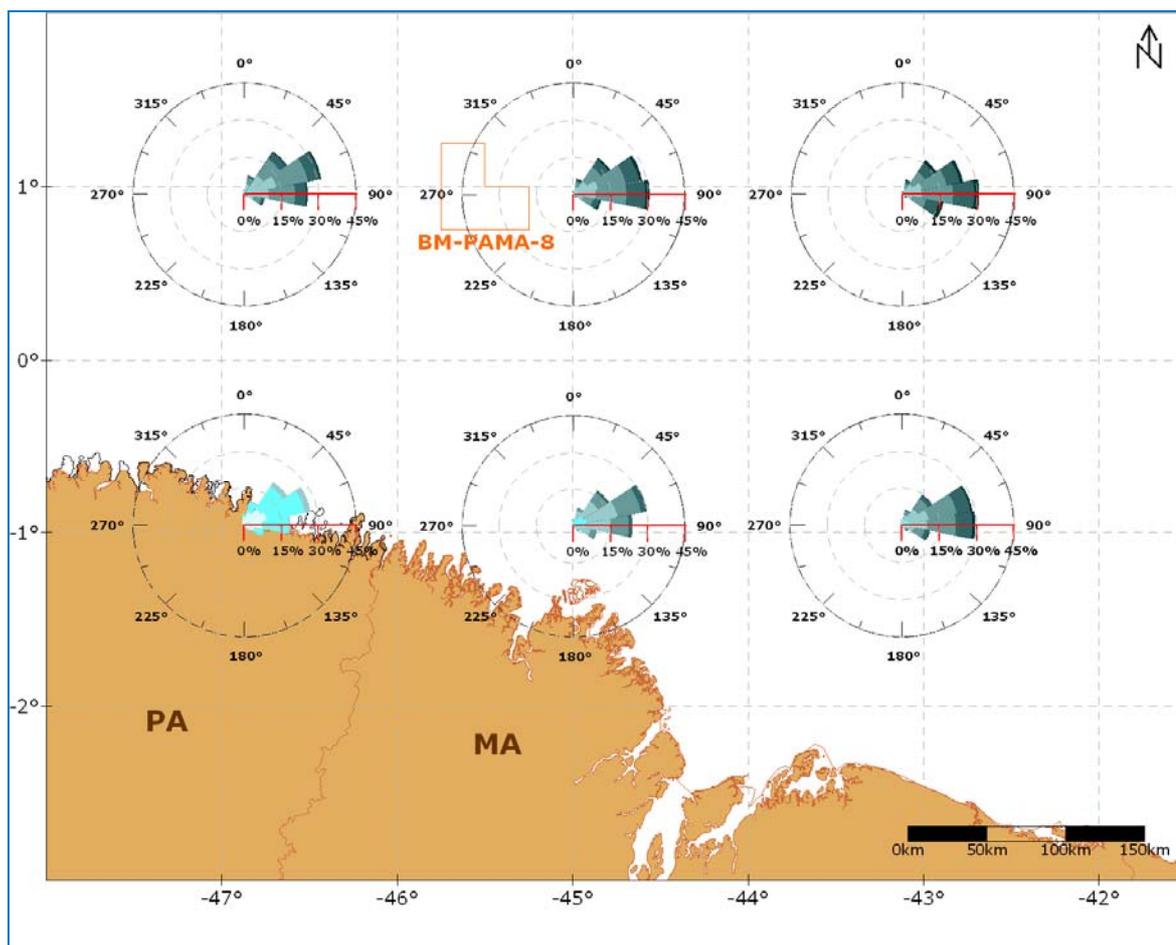


Figura II.5.1.1-24 - Histograma direcional dos ventos na região próxima ao BM-PAMA-8. Dados de 1979 a 2008 obtidos a partir das Reanálises II do NCEP.

Fonte: NCEP.

Na **Figura II.5.1.1-25** e **Figura II.5.1.1-26** são apresentadas as rosas dos ventos mensais para o ponto de grade do NCEP mais próximo ao BM-PAMA-8 (0° 57' S 45° 00' W).

Observa-se a predominância total dos ventos de leste e nordeste, em todos os meses. No período de dezembro a junho, ocorre uma maior contribuição de ventos de NE devido ao posicionamento mais ao sul da ZCIT neste período. No período de julho a novembro, a ZCIT encontra-se mais ao norte, favorecendo a ocorrência de ventos de E.

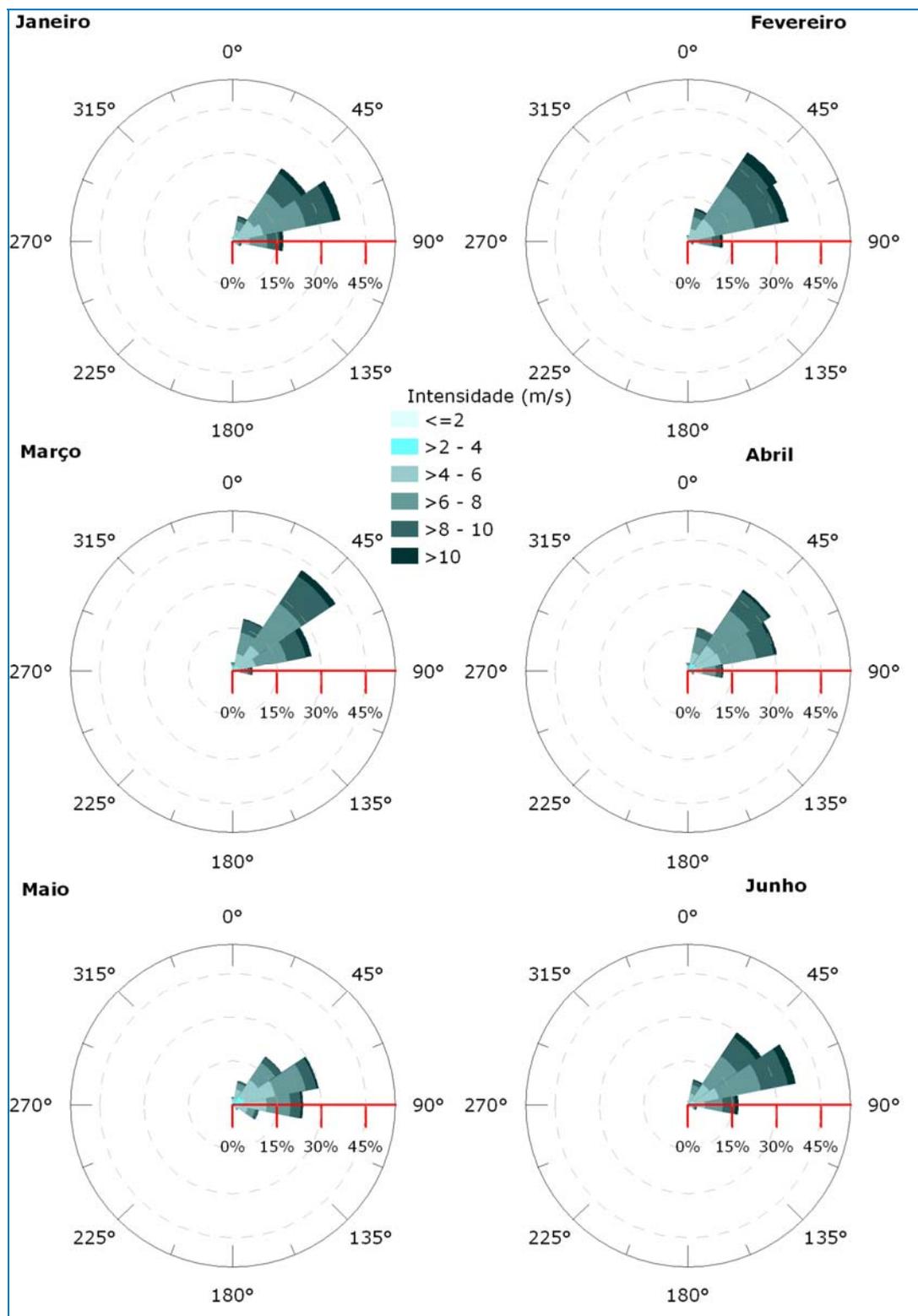


Figura II.5.1.1-25 - Rosas dos Ventos (m/s) elaboradas com os dados da Reanálise II do NCEP para os meses de janeiro a junho.

Fonte: NCEP.

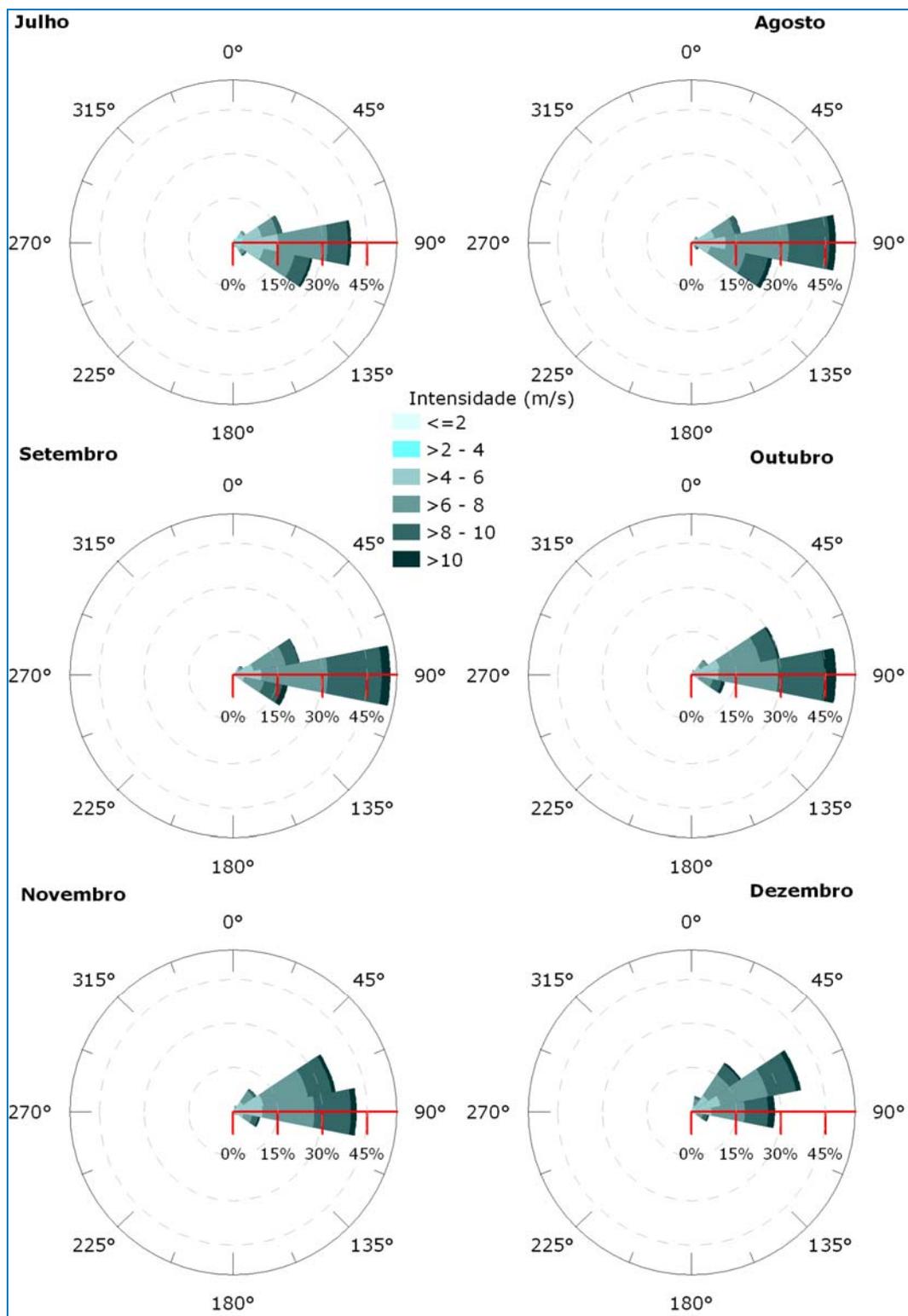


Figura II.5.1.1-26 - Rosas dos Ventos (m/s) elaboradas com os dados da Reanálise II do NCEP para os meses de julho a dezembro.

Fonte: NCEP.

Na **Tabela II.5.1.1-1**, é apresentada a ocorrência conjunta de intensidade e direção dos ventos, na área do Bloco BM-PAMA-8, usando como base os dados da Reanálise II do NCEP para o período de 1979 a 2008. Nesta, estão representadas as seguintes faixas de direções: N ($337,5^{\circ}$ - $22,5^{\circ}$), NE ($22,5^{\circ}$ - $67,5^{\circ}$), E ($67,5^{\circ}$ - $112,5^{\circ}$), SE ($112,5^{\circ}$ - $157,5^{\circ}$), S ($157,5^{\circ}$ - $202,5^{\circ}$), SW ($202,5^{\circ}$ - $247,5^{\circ}$), W ($247,5^{\circ}$ - $292,5^{\circ}$) e NW ($292,5^{\circ}$ - $337,5^{\circ}$).

Tabela II.5.1.1-1 - Ocorrência conjunta de intensidade e direção dos ventos na área do Bloco BM-PAMA-8 para o período de 1979 a 2008.

| Direção -> | | N | NE | E | SE | S | SW | W | NW | Total | Freq (%) |
|-------------------|-------|------|-------|-------|------|------|------|------|------|-------|----------|
| Intensidade (m/s) | | | | | | | | | | | |
| 0,50 | 3,00 | 292 | 584 | 623 | 260 | 108 | 64 | 71 | 94 | 2096 | 4,78 |
| 3,00 | 5,50 | 583 | 3857 | 4843 | 776 | 72 | 28 | 31 | 78 | 10268 | 23,43 |
| 5,50 | 8,00 | 535 | 7238 | 11524 | 955 | 20 | 2 | 2 | 14 | 20290 | 46,29 |
| 8,00 | 10,50 | 157 | 3420 | 6070 | 415 | 3 | 4 | 0 | 1 | 10070 | 22,97 |
| 10,50 | 13,00 | 9 | 378 | 622 | 50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1059 | 2,42 |
| > 13,0 | | 0 | 17 | 29 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 49 | 0,11 |
| Total | | 1576 | 15494 | 23711 | 2459 | 203 | 98 | 104 | 187 | 43832 | |
| Freq (%) | | 3,60 | 35,35 | 54,10 | 5,61 | 0,46 | 0,22 | 0,24 | 0,43 | | |

Fonte: NCEP.

Nos 30 anos analisados, pode-se destacar que das 43.832 observações, a maior incidência foi de ventos de E, com 23.711 ocorrências (54,10%) e NE, com 15.494 ocorrências (35,35%). Quanto à intensidade, em 46,29% das observações estiveram situadas entre 5,50 e 8,0 m/s. Os eventos com intensidades acima de 13 m/s representaram 0,11 % do total de ocorrências.

A estatística mensal, apresentada na **Tabela II.5.1.1-2**, permite identificar a variabilidade apresentada pelo vento ao longo do ano.

Tabela II.5.1.1-2 - Estatística mensal dos ventos na área do Bloco BM-PAMA-8.

| Meses | Direção (°) | Intensidade (m/s) | Desvio Padrão | Máxima Absoluta (m/s) | Média das Máximas (m/s) | Desvio Padrão |
|-------|-------------|-------------------|---------------|-----------------------|-------------------------|---------------|
| Jan | NE | 6,85 | 2,16 | 14,72 | 11,90 | 1,46 |
| Fev | NE | 7,07 | 2,14 | 15,78 | 12,04 | 1,77 |
| Mar | NE | 6,88 | 2,02 | 15,41 | 11,81 | 1,35 |
| Abr | NE | 6,35 | 2,05 | 14,87 | 11,11 | 1,18 |
| Mai | E | 5,73 | 2,11 | 14,86 | 10,76 | 1,33 |
| Jun | E | 5,52 | 2,08 | 13,99 | 10,42 | 1,49 |
| Jul | E | 6,04 | 2,02 | 12,58 | 10,54 | 1,03 |
| Ago | E | 6,91 | 1,81 | 13,73 | 11,00 | 1,04 |
| Set | E | 7,22 | 1,78 | 14,39 | 11,27 | 0,99 |
| Out | E | 7,06 | 1,86 | 13,04 | 11,21 | 0,85 |
| Nov | E | 6,86 | 1,88 | 12,58 | 11,38 | 0,93 |
| Dez | E | 7,00 | 1,95 | 14,36 | 11,63 | 1,10 |

Fonte: NCEP.

Observa-se que, em média, os ventos variam entre NE e E ao longo de todo o ano. Setembro aparece como o mês de maior intensidade média, 7,22 m/s, enquanto que fevereiro apresentou a maior média das máximas (12,04 m/s), e a maior máxima absoluta, com ventos de 15,78 m/s. O período compreendido entre janeiro e abril apresenta direção predominante NE, e no período entre maio e novembro, os ventos predominantes são de E.

De forma complementar, a **Figura II.5.1.1-27** apresenta a climatologia mensal de intensidade máxima por direção associada. Em geral, são verificados ventos de maior intensidade no primeiro semestre, e em quase todos os meses, a direção associada à intensidade máxima está entre 40 e 100° (NE e E), exceto para fevereiro e outubro, onde é a direção N a associada às intensidades máximas.

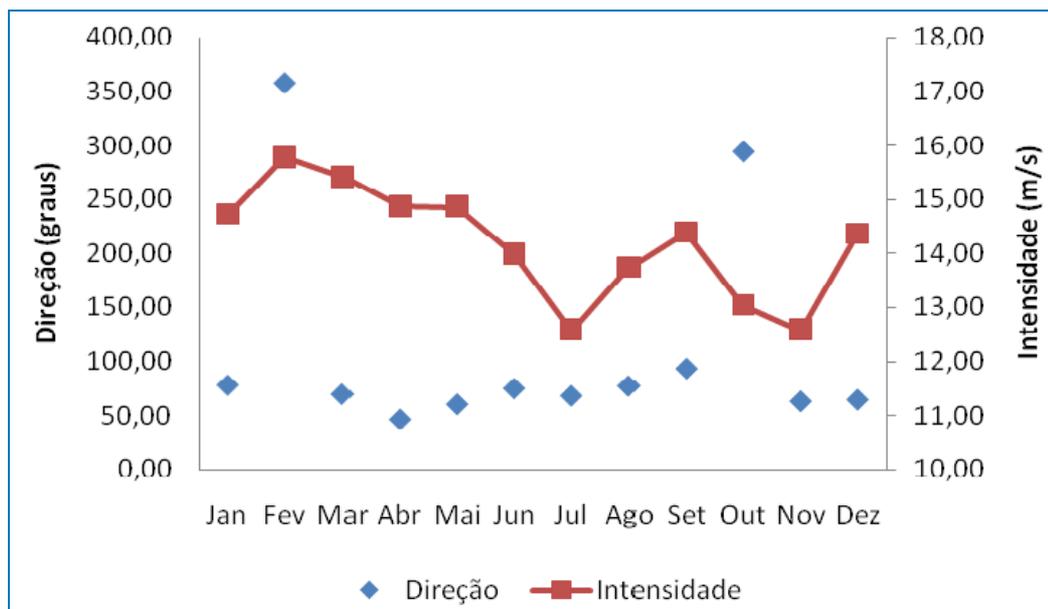


Figura II.5.1.1-27 - Intensidade máxima por direção associada.

Fonte: NCEP.

G - Condições Extremas

A partir dos 30 anos de dados obtidos da Reanálise II do NCEP, pode-se avaliar que o período chuvoso (janeiro a junho) é o mais propício à ocorrência de eventos extremos de ventos na Bacia do Pará-Maranhão. Entretanto, em média, esperam-se ventos mais intensos no mês de setembro (média de 7,22 m/s), associados à direção média de E (ver **Tabela II.5.1.1-2**). Apenas 0,11 % do total

de dados analisados apresentaram intensidade acima de 13 m/s. Na **Tabela II.5.1.1-3** e na **Tabela II.5.1.1-5** são apresentadas a estatística mensal e a tabela de ocorrência conjunta elaboradas com os dados da Reanálise II.

Os eventos extremos no período de 50 anos (1958 a 2007) também foram identificados a partir dos dados da Reanálise do NCEP/NCAR. Observa-se a estatística mensal desse período na **Tabela II.5.1.1-4** e a ocorrência conjunta, na **Tabela II.5.1.1-6**.

Tabela II.5.1.1-3 - Estatística mensal dos ventos na área do Bloco BM-PAMA-8, para o período de 1979 a 2008.

| Meses | Direção (°) | Intensidade (m/s) | Desvio Padrão | Máxima Absoluta (m/s) | Média das Máximas (m/s) | Desvio Padrão |
|-------|-------------|-------------------|---------------|-----------------------|-------------------------|---------------|
| Jan | NE | 6,85 | 2,16 | 14,72 | 11,90 | 1,46 |
| Fev | NE | 7,07 | 2,14 | 15,78 | 12,04 | 1,77 |
| Mar | NE | 6,88 | 2,02 | 15,41 | 11,81 | 1,35 |
| Abr | NE | 6,35 | 2,05 | 14,87 | 11,11 | 1,18 |
| Mai | E | 5,73 | 2,11 | 14,86 | 10,76 | 1,33 |
| Jun | E | 5,52 | 2,08 | 13,99 | 10,42 | 1,49 |
| Jul | E | 6,04 | 2,02 | 12,58 | 10,54 | 1,03 |
| Ago | E | 6,91 | 1,81 | 13,73 | 11,00 | 1,04 |
| Set | E | 7,22 | 1,78 | 14,39 | 11,27 | 0,99 |
| Out | E | 7,06 | 1,86 | 13,04 | 11,21 | 0,85 |
| Nov | E | 6,86 | 1,88 | 12,58 | 11,38 | 0,93 |
| Dez | E | 7,00 | 1,95 | 14,36 | 11,63 | 1,10 |

Fonte: Reanálise II NCEP/NCAR

Tabela II.5.1.1-4 - Estatística mensal dos ventos na região do BM-PAMA-8, para o período de 1958 a 2007.

| Meses | Direção (°) | Intensidade (m/s) | Desvio Padrão | Máxima Absoluta (m/s) | Média das Máximas (m/s) | Desvio Padrão |
|-------|-------------|-------------------|---------------|-----------------------|-------------------------|---------------|
| Jan | NE | 5,44 | 1,87 | 13,20 | 9,89 | 1,16 |
| Fev | NE | 5,23 | 1,79 | 11,39 | 9,26 | 1,01 |
| Mar | NE | 4,92 | 1,67 | 11,73 | 9,08 | 0,99 |
| Abr | NE | 4,69 | 1,74 | 11,89 | 8,76 | 1,16 |
| Mai | E | 4,77 | 1,79 | 12,40 | 8,95 | 1,09 |
| Jun | E | 5,29 | 1,85 | 13,30 | 9,82 | 1,38 |
| Jul | E | 6,16 | 2,00 | 12,93 | 10,50 | 1,17 |
| Ago | E | 7,54 | 1,88 | 14,77 | 12,13 | 1,07 |
| Set | E | 8,18 | 1,85 | 15,53 | 12,55 | 1,00 |
| Out | E | 7,98 | 1,97 | 15,46 | 12,60 | 1,02 |
| Nov | E | 7,09 | 2,01 | 14,20 | 11,56 | 1,12 |
| Dez | E | 6,22 | 1,96 | 13,95 | 10,69 | 1,31 |

Fonte: Reanálise NCEP/NCAR

Tabela II.5.1.1-5 - Ocorrência conjunta de direção (°) e intensidade (m/s) dos ventos na região do BM-PAMA-8 para o período de 1979 a 2008.

| Direção -> | | N | NE | E | SE | S | SW | W | NW | Total | Freq (%) |
|-------------------|-------|-------|--------|--------|-------|------|------|------|------|--------|----------|
| Intensidade (m/s) | | | | | | | | | | | |
| 0,50 | 3,00 | 292 | 584 | 623 | 260 | 108 | 64 | 71 | 94 | 2.096 | 4,78 |
| 3,00 | 5,50 | 583 | 3.857 | 4.843 | 776 | 72 | 28 | 31 | 78 | 10.268 | 23,43 |
| 5,50 | 8,00 | 535 | 7.238 | 11.524 | 955 | 20 | 2 | 2 | 14 | 20.290 | 46,29 |
| 8,00 | 10,50 | 157 | 3.420 | 6.070 | 415 | 3 | 4 | 0 | 1 | 10.070 | 22,97 |
| 10,50 | 13,00 | 9 | 378 | 622 | 50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.059 | 2,42 |
| > 13,0 | | 0 | 17 | 29 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 49 | 0,11 |
| Total | | 1.576 | 15.494 | 23.711 | 2.459 | 203 | 98 | 104 | 187 | 43.832 | |
| Freq (%) | | 3,60 | 35,35 | 54,10 | 5,61 | 0,46 | 0,22 | 0,24 | 0,43 | | |

Fonte: Reanálise II NCEP/NCAR

Tabela II.5.1.1-6 - Ocorrência conjunta de direção (°) e intensidade (m/s) dos ventos na região do BM-PAMA-8 para o período de 1958 a 2007.

| Direção -> | | N | NE | E | SE | S | SW | W | NW | Total | Freq (%) |
|-------------------|-------|-------|--------|--------|------|------|------|------|------|--------|----------|
| Intensidade (m/s) | | | | | | | | | | | |
| 0,50 | 3,00 | 585 | 1.960 | 2.010 | 558 | 125 | 80 | 75 | 141 | 5.534 | 7,58 |
| 3,00 | 5,50 | 701 | 10.096 | 12.104 | 987 | 30 | 4 | 14 | 37 | 23.973 | 32,82 |
| 5,50 | 8,00 | 112 | 9.534 | 18.210 | 490 | 0 | 0 | 1 | 0 | 28.347 | 38,81 |
| 8,00 | 10,50 | 3 | 2.554 | 10.417 | 107 | 0 | 0 | 0 | 0 | 13.081 | 17,91 |
| 10,50 | 13,00 | 0 | 200 | 1.823 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2.032 | 2,78 |
| > 13,0 | | 0 | 2 | 79 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 81 | 0,11 |
| Total | | 1.401 | 24.346 | 44.643 | 2151 | 155 | 84 | 90 | 178 | 73.048 | |
| Freq (%) | | 1,92 | 33,33 | 61,11 | 2,94 | 0,21 | 0,11 | 0,12 | 0,24 | | |

Fonte: Reanálise NCEP/NCAR

Os resultados obtidos a partir dos 50 anos de dados da Reanálise (**Tabela II.5.1.1-4** e **Tabela II.5.1.1-6**), apresentaram valores mais altos em relação aos obtidos com a Reanálise II (**Tabela II.5.1.1-3** e **Tabela II.5.1.1-5**). Entretanto, deve-se levar em consideração o fato de que são produtos que utilizam diferentes sistemas de assimilação, e que os períodos de análise são diferentes, dificultando as comparações. O evento extremo observado, com velocidades de 15,53 m/s ocorreu em 16 de setembro de 1981. O percentual de ventos com velocidades maiores que 13 m/s observados a partir dos 50 anos de dados da Reanálise, foi o mesmo verificado nos 30 anos de dados da Reanálise II, 0,11%. O mês de outubro aparece agora como o mês de ventos mais intensos, com média das máximas de 12,60 m/s, diferentemente da análise de 30 anos obtida com a Reanálise II, na qual o mês de fevereiro é o que possui a maior média das máximas velocidades.

II.5.1.1.3 - Síntese Conclusiva

A análise dos parâmetros meteorológicos na estação de São Luís e dos dados de ventos do NCEP demonstram a ocorrência de dois períodos bem marcados. O período chuvoso (janeiro a junho) é caracterizado por altas taxas de precipitação, temperaturas mais amenas, menor evaporação e alta umidade. O período seco (julho a dezembro) caracteriza-se por menores precipitações, temperaturas mais elevadas, maior evaporação e menor umidade. A temperatura média na região variou de ~25,7 °C, no mês de julho (mês de temperaturas mais baixas), a 27,3 °C no mês de novembro (mês mais quente na região). No mês de abril, mais chuvoso na região, a precipitação média é de ~475 mm. A Bacia do Pará-Maranhão apresenta ventos predominantes de Leste e Nordeste, totalizando aproximadamente 89% das ocorrências. Ventos com intensidades maiores que 13 m/s representaram 0,11% do total, e o evento de maior intensidade de ventos foi registrado em setembro, com intensidade de 15,53 m/s associada à direção E.

II.5.1.2 - Geologia e Geomorfologia

Nesse item estão caracterizadas a geologia e geomorfologia da Bacia Pará-Maranhão. Aspectos estruturais, estratigráficos e fisiográficos encontram-se descritos principalmente em escala regional. As informações aqui apresentadas foram sintetizadas, predominantemente, a partir de dados bibliográficos pesquisados em diversos trabalhos e em estudos realizados na costa norte brasileira, tanto pela PETROBRAS quanto por outras instituições, através de projetos que envolvem universidades, empresas e governo. Dentre estes, destacam-se projetos como o REMAC, o SIGEO/BR e PIATAM.

II.5.1.2.1 - Características Regionais

A Bacia do Pará-Maranhão está situada na margem equatorial atlântica brasileira, na porção marinha dos Estados do Pará e Maranhão. A bacia abrange uma área total de 95.875 km², sendo 81.265 km² até a isóbata de 400 m, e 14.610 km² entre 400 m e 3.000 m (ANP, 2009).

Está localizada entre os paralelos 1°15' S e 1°30' N e meridianos 43°30' W e 47°W, sendo limitada a sudeste pela Bacia de Barreirinhas; a nordeste pelo talude continental; a noroeste pela Bacia da Foz do Amazonas, e pela plataforma rasa denominada de Ilha de Santana ou Plataforma do Pará-Maranhão a sudoeste.

Ela se desenvolve na porção adjacente à Plataforma de Ilha de Santana, correspondendo a um dos maiores depocentros da Margem Norte Equatorial Brasileira, atingindo cerca de 12 km de espessura sedimentar máxima (Azevedo, 1991).

O Bloco PAMA-8 situam-se a sudeste do Cone do Amazonas, respectivamente, sendo a área atual de 2306 km², estando localizado entre as coordenadas 0° 45' e 1° 15' Norte e 45° 45' e 45° 15' Oeste (Datum SAD 69).

A - Geologia Estrutural

Estruturalmente, esta Bacia do Pará-Maranhão é formada por dois depocentros separados por um horste. A leste ocorre um depocentro de geometria alongada na direção NW-SE de caráter distensivo, possuindo dois sistemas de falha, um de direção NW-SE e outro de direção NNE-SSE. A oeste, separado pelo Alto Estrutural do Gurupi, ocorre o depocentro denominado de Gráben de Ilha de Santana. Este depocentro também possui dois sistemas de falhas normais com direções E-W e NNW-SSE.

A Bacia é composta por um sistema de blocos basculados formando uma série de meio-grábens falhados de modo sintético de direção noroeste-sudeste. Com o contínuo afastamento das placas sul-americana e africana, a bacia começa a experimentar no Albiano um processo de subsidência termal. Cessam os falhamentos com blocos basculados da fase anterior e passam a ocorrer somente a compensação de blocos por ajuste isostático, com possíveis reativações de falhas e movimentos adiastróficos associados a fluxo de massa.

A arquitetura da bacia é complicada por eventos mais recentes, ligados à tectônica gravitacional na fase de deriva continental manifestada em fluxos de massa nas regiões mais distais da margem continental. Tem um estilo de

deformação característico, denominado por Zalán (2001) de cinturão gravitacional de dobras e empurrões (*gravitational fold-and-thrust belts*). O fenômeno foi estudado em detalhe por esse autor na região do Pará-Maranhão e corresponde a um domínio com grande incidência de falhas de empurrão e dobras associadas, similares em geometria e dimensões aos clássicos cinturões orogênicos das áreas compressionais.

B - Estratigrafia

O preenchimento sedimentar da bacia Inicia-se com depósitos basais Paleozóicos, parte de seqüências intracratônicas pretéritas que se estendem sobre as plataformas précambrianas do Gondwana, depositados no interior dos grábens iniciais da bacia. Esta seqüência foi sobreposta por depósitos sin-rifte (transtensionais) e inter-rifte de idades aptiana e albiana; cobertos por Seqüências Drifte (Neo-Albiano ao Recente) típicas de subsidência termal de margem passiva.

A Seqüência Intracratônica corresponderiam ao Grupo Canindé, constituído da base para o topo pelos arenitos da Formação Itaim, que é recoberto pelos folhelhos da Formação Pimenteiras e pelos arenitos da Formação Cabeças.

A seqüência *sin-rifte* constituídos de arenitos e folhelhos de idade aptiana, corresponde a sedimentos continentais, com visíveis acunhamentos e espessamentos em seções sísmicas. Depocentros pouco desenvolvidos que apresentam espessamento em direção NE ocorrem em direção às falhas de borda de grábens com direção NW-SE. Soares *et al.* (2007) classificam esta seqüência como unidade litoestratigráfica sem denominação formal, pois a mesma careca uma maior quantidade de descrições litológicas e datações paleontológicas para sua melhor definição.

A seqüência inter-rifte é caracterizada por sedimentos marinhos constituídos de calcilutitos e folhelhos lagunares da Formação Codó. Essa seqüência depositada em ambiente evaporítico anóxico é sobrepostos por uma seqüência siliciclástica constituída de arenito lítico, siltito cinza a castanho-avermelhado e folhelhos esverdeados interpretadas como leques deltaicos depositados em ambiente marinho, correlacionada segundo Soares *et al.* (*op. cit.*) ao Grupo Canárias.

A seqüência drifte é formada pelos sedimentos dos grupos Cajú e Humberto de Campos. Esta seqüência foi depositada em ambiente marinho variando de costeiro a talude/profundo. O Grupo Cajú tem idade neoalbiana, sendo formado por arenito quartzoso, constituído por sedimentos médio a grosso, folhelho e, localmente, com presença de calcarenito bioclástico e oncolítico. A deposição desta unidade deu-se em ambiente nerítico de alta e baixa energia. Igualmente ao Grupo Canárias, o Grupo Cajú não possui subdivisão.

O Grupo Humberto de Campos possui idade entre o Cenomaniano e o Recente. Este Grupo é subdividido nas Formações Areinhas, Ilha de Santana e Travossas. A Formação Areinhas, situada na porção mais proximal da bacia, apresenta idade que abrange do Cenomaniano ao Recente, sendo constituída por arenito quartzoso grosso.

A Formação Ilha de Santana, embora seja contemporânea a Formação Areinhas, encontra-se, em relação a ela, numa porção mais distal. Nas áreas de plataforma rasa essa Formação é representada por um pacote carbonático espesso e extenso, constituído por grande variedade de biocalcarenitos e biocalcirruditos. Na plataforma externa é composta por calcarenitos finos e calcilutitos. Na área do talude constitui-se de margas, folhelhos, lamitos seixosos e, por vezes, de turbiditos.

A Formação Travossas se encontra em posição mais distal em relação às demais, sendo constituída por folhelhos e siltitos, podendo aparecer intercalados arenitos quartzoso finos.

A Carta Estratigráfica da Bacia Pará–Maranhão, conforme redefinida por Soares *et al.* (2007) pode ser visualizada na **Figura II.5.1.2-1**, com seus elementos litoestratigráficos, bioestratigráficos e geocronológicos.

C - Sistema Petrolífero

O sistema petrolífero na Bacia Pará–Maranhão apresenta trapas do tipo estruturais, estratigráficas, mistas ou paleogeomórficas (DUARTE, 2007). As principais rochas geradoras se encontram na Formação Travossas (folhelhos da fase transgressiva), Grupo Caju (Folhelhos negros da seqüência de transição) e Grupo Canárias (folhelhos da fase rifte). A migração está associada às falhas lítricas das seções transicional e margem passiva; Falhas planares da fase rifte; e Contato direto gerador/reservatório (DUARTE, *op. cit.*). As principais rochas reservatórios são os arenitos turbidíticos terciários (distal) e Neocretáceos (proximal) da Formação Travossas, os calcários fraturados, bancos, recifes, depósitos de tálus e calci-turbiditos terciários da Formação Ilha de Santana e os arenitos flúvio-deltáicos da fase rifte da Grupo Canárias. Os calcilutitos, folhelhos e margas constituem os principais selantes da bacia (DUARTE, *op. cit.*).

Os principais *plays* estariam nos calcários fraturados e bancos de recifes desenvolvidos sobre paleoaltos tectônicos ou posicionais da Formação (DUARTE, *op. cit.*). Ilha de Santana, os depósitos gravitacionais indistintos e turbiditos oriundos da Formação Ilha de Santana e as estruturas rollover associadas à falhas lítricas, afetando depósitos da Formação Ilha de Santana (Figura II.5.1.2-2).

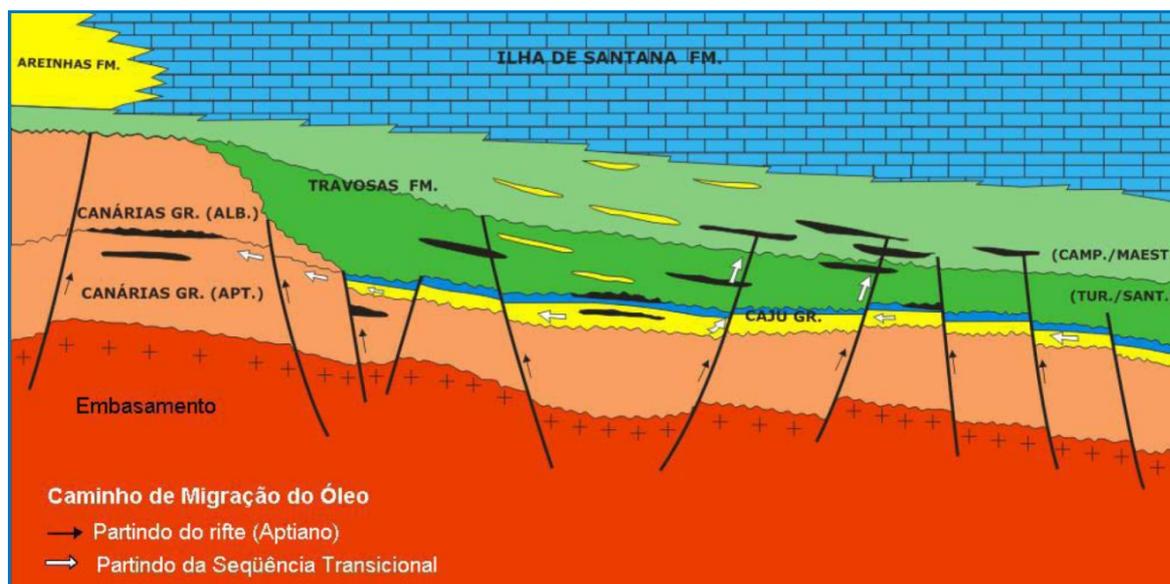


Figura II.5.1.2-2- Sistema petrolífero da Bacia-Maranhão.

Fonte: Duarte, 2007.

D - Características Fisiográficas

A plataforma continental apresenta largura de 133 km na altura do cabo Orange, 69 km na baía do Tubarão e 330 km diante a ilha de Marajó, conforme pode ser observado no **Mapa Fisiográfico (Mapa II.5.1.2-1)**. A declividade da plataforma diminui com o aumento da largura, apresentando, no cabo Orange, gradiente de 1:267, 1:3.100-3.200 diante do Golfão Maranhense e 1:1.150 na baía do Tubarão.

A quebra da plataforma continental ocorre entre as profundidades de 105 a 115 m na área a noroeste da foz do rio Amazonas. Na área próxima à porção superior do cone do Amazonas, as quebras estão entre 140 e 150 m de profundidade. Na direção sudeste, a quebra ocorre entre 70 e 80 m, sendo que profundidades menores estariam relacionadas aos terraços de escarpas de antigas linhas de costa, nas profundidades de 55 e 65 m (PALMA, 1979) (ver **Mapa II.5.1.2-1**).

Os padrões de relevo na área costeira e plataforma continental têm uma relação de continuidade, respondendo à interação entre a descarga fluvial do rio Amazonas e as Correntes das Guianas, Norte Brasileira, litorâneas e de marés. O

predomínio de um desses fatores desenvolve características específicas a cada trecho marinho da costa Norte.

No trecho entre o cabo Orange e o rio Pará, a plataforma continental interna adjacente ao litoral do Amapá é recoberta por uma camada sedimentar que se constitui num terraço de agradação flúvio-marinha, dando continuidade à planície litorânea (ver **Mapa II.5.1.2-1**). Esse terraço possui uma superfície suavemente inclinada, com ondulações que atingem quilômetros de comprimento e pequenas amplitudes. Esse terraço representaria um delta submarino e a sua “encosta de transição”, a área prodeltaica (FIGUEIREDO *et al.*, 1972).

A influência da drenagem da região é preponderante sobre os demais fatores oceanográficos. A descarga do rio Amazonas altera a circulação oceânica na plataforma continental adjacente, contribuindo com cerca de 80% do suprimento terrígeno para o Oceano Atlântico Equatorial. A descarga líquida de água doce do rio Amazonas no Oceano Atlântico, de acordo com Diegues (1972) é próxima a 200.000 m³/s. A descarga sólida, segundo Kuehl *et al.* (1988), é da ordem de 1.2-1x10⁹ ton/ano, sendo 6.3-2x10⁸ ton/ano acumulando-se na plataforma continental da Amazonas. As taxas de sedimentação variam com a profundidade, sendo entre 30 e 50 m de 10cm/ano e entre 50 e 70m menor que 1cm/ano.

A superfície da plataforma externa ao largo do Estado do Amapá possui um relevo mais acidentado, onde estão presentes zonas de bancos arenosos e vales, que alternam-se com os fundos irregulares de origem carbonática, ondas de areia assimétricas e irregulares (ver **Mapa II.5.1.2-1**).

Na borda da plataforma, a noroeste do vale do rio Pará, essa superfície é influenciada pela progradação dos sedimentos do rio Amazonas. Esses bancos arenosos são relativamente contínuos, com um relevo crescente à medida que se aproximam do cânion do Amazonas, quando atingem cerca de 30 m de comprimento. Esse conjunto de bancos é recoberto parcialmente por sedimentos lamosos da frente de progradação do cânion e, nas áreas em que afloram, as calhas entre eles são preenchidas por sedimentos. As cristas e calhas paralelas se estendem da área da cabeceira do cânion por 180 km e direção a nordeste.

Os vales submarinos são feições importantes na área. A plataforma é recortada até a profundidade de 70-80 m pelas cabeceiras do cânion do Amazonas. Esse cânion e seus tributários apresentam incisões de até 70 km na plataforma continental. O vale submarino do Pará corta a borda da plataforma, sendo que, na parte da plataforma interna, encontra-se totalmente preenchido e, nas partes mais profundas, vem sofrendo preenchimento (ver **Mapa II.5.1.2-1**).

No trecho entre o rio Pará em direção ao rio Turiaçu, a plataforma interna é adjacente à Depressão Maranhense, que representa uma área de relevo complexo, formado por bancos submarinos dispostos paralelamente e com direção ENE-WSW. As características desse conjunto são a presença de bancos assimétricos, de face escarpada com flancos alongados voltados para noroeste, com comprimentos entre 14 e 70 km, largura em torno de 7 km e altura entre 8 m e 20 m. Esses bancos são separados por um sistema de canais descontínuos, que formam depressões alongadas com profundidades entre 28 e 32 m, podendo atingir 56 m.

Na plataforma interna, são encontrados vários canais relacionados às linhas de drenagem nas áreas costeiras, denominados de “vales”, formando a Depressão Maranhense. Tais canais atravessam a plataforma desde a área próxima às embocaduras. Material sedimentar coletado nessas áreas mostrou a presença de cascalho biodetrítico e material terrígeno, com a presença de fragmentos de arenitos de praia (*beach rocks*). Sobre o interflúvio localizado a noroeste da Depressão, situa-se outro conjunto de bancos denominado “campo de Cururupu”.

O talude continental, a oeste do cone do Amazonas, e na costa do Estado do Amapá, é bastante estreito e íngreme, com um gradiente em torno de 1:11, e com a base entre 2.300 e 2.425 m de profundidade. Na longitude de 50° W, o talude é recoberto pelo cone do Amazonas. Reaparece a leste do cone e prolonga-se para sudeste, tornando-se gradativamente mais íngreme e estreito até 44°30' W (ver **Mapa II.5.1.2-1**).

A porção sudeste do cânion subdivide-se em duas áreas: o talude superior e o talude inferior. A primeira possui um gradiente de 1:9, até 1.490 m de profundidade, e a segunda, o gradiente de 1:30, até a profundidade de 2.650 m.

Na longitude de 44°30' W, o talude apresenta um gradiente de 1:5, com sua base a 3.150 m de profundidade. A leste desta longitude, a largura do talude se mantém constante, sendo que entre 41° e 47° W os gradientes variam, em média, entre 1:7 e 1:19.

No talude continental são verificados canais e cânions submarinos que podem atravessá-lo desde a plataforma continental em direção ao sopé continental, promovendo variações significativas no relevo submarino. A morfologia desses cânions mostra perfis transversais vales em forma de "U" ou "V". Os cânions escavados em "V" predominam na porção do talude superior, enquanto os cânions em "U" situam-se na base dos taludes superior e inferior. Os primeiros podem apresentar fundos planos, indicando processo de sedimentação, enquanto os segundos são mais rasos.

Geralmente, com algumas exceções, esses cânions se apresentam desconectados da drenagem continental atual, fato que atesta o caráter subatual. Apresentam características erosivas e de idade recente, pois cortam sedimentos relativamente jovens (Terciário Médio).

A sudeste do cone do Amazonas, o talude continental é atravessado em toda a sua extensão por vários cânions. A partir de 47° W em direção a leste até a longitude de 46° W, ocorrem 23 cânions, com profundidade média em torno de 500 m. Entre as longitudes de 45° a 46° W ocorrem pelo menos 26 dessas feições. As feições de destaque na área são os cânions do Pará e do Gurupi. O cânion de Gurupi encontra-se a uma profundidade de 1.210 m. O cânion do Pará apresenta, no talude inferior, um leque submarino. Na porção central do cone do Amazonas, o cânion do Amapá penetra em direção mar adentro a partir da plataforma. Destaca-se que a maioria dos cânions situam-se entre 50 e 750 m de profundidade, enquanto cinco cânions se localizam em profundidades maiores que 750 m (ver **Mapa II.5.1.2-1**).

A existência de movimentos de massa no talude pode ser evidenciada a partir de diversas feições erosivas que nele ocorrem. A partir do cone do Amazonas, para leste, aparecem desmoronamentos, provavelmente relacionados aos

sedimentos recentes que cobrem o talude, sendo alguns associados a falhamentos existentes na área. Os tipos de movimentos de massa sugeridos são os rotacionais, no talude superior e os longos, no talude inferior, onde estes estariam associados a movimentos ocorridos ao longo de planos de acamamento.

O sopé continental, na área de estudo, constitui-se por uma espessa cunha de sedimentos que se prolonga, a partir do talude continental, por centenas de quilômetros mar adentro. As profundidades, em geral, situam-se entre 2.200 e 4.550 m, ao longo da borda superior do sopé, passando à 4.300 a 5.600 m ao longo da borda inferior.

A morfologia do sopé não apresenta sinais de controle estrutural do embasamento, atestando o seu caráter sedimentar. As feições presentes no sopé continental são as colinas, as cavas e as planícies lisas. As colinas e cavas são feições suavemente arredondadas, restringindo-se à área do sopé superior. As planícies lisas ocorrem no sopé inferior, sendo caracterizadas por ausência de ondulações; porém, excepcionalmente, podem ocorrer grandes regiões com morfologia ondulada.

O sopé continental é descontínuo somente diante do rio Amazonas, devido ao avanço do cone do Amazonas sobre esta área. Entre o cone do Amazonas e 40° W, o sopé continental atinge cerca de 300-340 km de largura, inclinando-se em direção ao mar, com profundidades que variam de 2.330 m, a Noroeste, e 3.275 m, a Sudeste. Os gradientes nesse trecho situam-se entre 1:250 e 1:325 m.

Nas áreas mais profundas, o sopé continental é interrompido pela topografia irregular e rugosa dos montes submarinos da Cadeia Norte Brasileira, que ocorre paralelamente à base do talude continental. Essa cadeia representa uma crista estreita do embasamento e se constitui numa feição topográfica contínua (35° W a 39° W), estendendo-se por cerca de 1.300 km na direção E-W, a uma distância de 150 a 200 km do talude continental. Possui uma largura na base de até 45 km, atingindo 75 km na área dos picos, sendo suas encostas muito íngremes e desnudas.

A Cadeia Norte Brasileira exerce uma influência sobre o transporte de sedimentos, pois a sua porção sul funciona como uma barreira aos sedimentos provenientes da plataforma continental e talude, que se dirigem ao sopé continental, fazendo com que a espessura do lado sul seja 750 m maior que a espessura do lado norte (ver **Mapa II.5.1.2-1**). Os sedimentos que recobrem a cadeia são consolidados.

Perfurações realizadas a 1.916 m de profundidade (*Deep Sea Drilling Project*) mostraram que, até os primeiros 35-40 m, o pacote sedimentar é constituído por vasas de foraminíferos com idade entre o final do Pleistoceno e o final do Mioceno. A seqüência encontrada abaixo é constituída por conglomerado calcário, com a presença de fósseis com idade que varia entre o Mioceno Inferior ao Médio. Entre 49-54 m ocorre uma seqüência de fragmentos de calcários de algas (não datadas), sugerindo ser um antigo recife. Essas evidências sugerem que a área já esteve submetida a situações de águas rasas, e que a área possivelmente sofreu subsidência.

Diversos canais, com profundidades de até 80 m e larguras da ordem de quilômetros, atravessam a parte interna do sopé (área entre o talude e a cadeia Norte Brasileira), sugerindo conexões com vários cânions submarinos provenientes do talude continental.

A planície abissal é representada por uma superfície plana, com gradientes inferiores a 1:1.000 e áreas menores com colinas abissais suaves, sendo a sua descontinuidade devida às elevações oceânicas e montes submarinos, que são controlados por altos estruturais do embasamento oceânico.

A planície abissal do Ceará, interrompida pela elevação do Ceará, se estende para leste até a Cadeia Mesoatlântica, sendo limitada ao sul pela Cadeia Norte Brasileira (ver **Mapa II.5.1.2-1**). Esta planície abissal é subdividida em duas partes: a planície abissal do Ceará Norte e a porção principal da planície abissal do Ceará. A planície abissal do Ceará Norte é limitada ao norte e a leste pelo flanco leste da Cadeia Mesoatlântica, a oeste pelo cone do Amazonas e ao sul pelo flanco norte da elevação do Ceará (GORINI, 1981).

E - Características Faciológicas

A cobertura sedimentar na Margem Continental Norte Brasileira entre cabo Orange e o rio Turiaçu se caracteriza por um predomínio sedimentação terrígena sobre a carbonática, tendo grande importância a descarga fluvial dos sistemas de drenagem.

Na plataforma continental predominam fácies recente, fácies retrabalhada durante o Holoceno até o presente, fácies não retrabalhada durante o Holoceno e fácies residual, com ocorrência restrita até a quebra da plataforma. As fácies sedimentares são: lama fluvial, areia fluvial, areia com fonte indeterminada, recife de algas calcárias, areia ou cascalhos de moluscos, areia de foraminíferos bentônicos e de areia e/ou cascalho de algas coralíneas (**Mapa II.5.1.2-2 - Batimétrico e Faciológico**).

O setor entre cabo Orange e a foz do rio Pará apresenta sedimentos terrígenos constituídos por lamias fluviais na plataforma interna, passando à areias na plataforma externa. Esse domínio se relaciona à descarga de sedimentos do rio Amazonas, que sofre desvio para noroeste pela ação da Corrente das Guianas.

A presença de uma “língua” arenosa isolada no interior do domínio das lamias possivelmente se associa à descarga do canal norte do rio Amazonas. A ocorrência da fácies lamiosa ocorre até a profundidade de 30 m, estabelecendo-se em desnível batimétrico com a fácies arenosa, que se estende até a isóbata de 70 m, na plataforma externa (ver **Mapa II.5.1.2-2 - Batimétrico e Faciológico**). Esse desnível está relacionado à frente de progradação deltaica do Amazonas.

Segundo Kowsmann e Costa (1979), as características das fácies lamiosa e arenosa, tais como a presença de grãos de quartzo angulosos e capeados por óxido de ferro, a abundância de feldspatos, a diversidade e imaturidade dos minerais pesados e a presença de restos vegetais, mostram que os sedimentos que as compõem são de origem fluvial.

A ocorrência de sedimentos carbonáticos se restringe à plataforma externa. A noroeste do cânion do Amazonas, as fácies carbonáticas são bastante dispersas,

predominando aquelas associadas a sedimentos terrígenos, como as constituídas por moluscos e foraminíferos bentônicos (ver **Mapa II.5.1.2-2 - Batimétrico e Faciológico**). Nas áreas próximas ao cânion, ocorrem recifes algais pouco desenvolvidos. O pouco desenvolvimento bioconstrucional carbonático, nesse trecho da plataforma continental, expressa a forte influência da sedimentação terrígena de origem fluvial a noroeste da foz do rio Pará.

A partir do rio Pará, para sudeste, até o rio Turiaçu, é observado um domínio extenso e homogêneo da fácies arenosa, que se difere das areias amazônicas pelas suas características petrográficas. Os sedimentos apresentam assembléia mineralógica pesada, madura, sendo os leves ortoquartzíticos. Geralmente, os grãos quartzosos são subarredondados, com exceção da plataforma média e externa ao largo da foz do rio Gurupi, onde se apresentam subangulares, indicando uma paleodrenagem desse rio.

Os sedimentos carbonáticos, com teores de CaCO_3 acima de 95%, se estendem ao longo de uma faixa contínua da plataforma externa, onde predominam fácies de recifes algais, areias e/ou cascalhos, além de fácies de algas coralíneas ramificadas (*maerl*), de foraminíferos bentônicos e moluscos (ver **Mapa II.5.1.2-2 – Batimétrico e Faciológico**). As fácies de algas coralíneas ramificadas e de foraminíferos bentônicos se destacam na área da plataforma externa ao largo do rio Gurupi.

Os moluscos, que ocorrem em manchas isoladas no domínio terrígeno, constituem-se nos principais integrantes dos sedimentos ao largo de Salinópolis. A ocorrência de recifes algais nesse trecho da Plataforma Continental Norte pode indicar uma fraca contribuição de sedimentos terrígenos pelas drenagens costeiras. Os oólitos, que representam uma fração importante nos sedimentos superficiais, dispõem-se ao longo da borda continental desde o largo do cabo Orange até a margem direita do cone amazônico.

Nos sedimentos de fundo da plataforma continental, entre o cabo Orange e o rio Turiaçu, predominam argilominerais dos tipos montmorilonita, illita e caulinita, que se estendem até 200 m de profundidade. As manchas dispersas, com

predominância de montmorilonita, ilita, associação de ilita e caulinita, e caulinita são também encontradas.

Na área do talude, predomina a fácies de sedimentos mascarados por afloramentos rochosos, a qual segue seu o delineamento, sendo mais significativa a partir da isóbata de 300 m. Tal fácies ocorre de maneira contínua, com orientação NW-SE, estendendo-se desde a área ao largo do cabo Norte até o largo do rio Turiaçu. Na área ao largo do cabo Norte, essa fácies desaparece e reaparece a partir da área ao largo do cabo Orange (ver **Mapa II.5.1.2-2 - Batimétrico e Faciológico**). A ausência dessa fácies coincide com a área de ocorrência do cone do Amazonas, voltando a ocorrer nas áreas do sopé continental e planície abissal.

As fácies hemipelágica e de canais e diques marginais ocorrem, predominantemente, a partir dos 2.000 m, estendendo-se até cerca de 4.000 m, entre a base do talude e o sopé continental. A fácies hemipelágica se distribui de modo descontínuo ao largo do cabo Orange até a altura da baía de Turiaçu. Esta descontinuidade é produzida pelas manchas da fácies de canais e diques marginais, restringindo-se à área do cone do Amazonas. À medida que se avança em direção ao oceano, do cabo Gurupi até o rio Turiaçu, ocorrem fácies de desmoronamento e deslizamento, que coincidem com o aumento do gradiente e estreitamento da margem continental.

As fácies turbidítica e hemipelágica concentram-se ao longo de toda a área da planície abissal, com orientação NW-SE, acompanhando a configuração do fundo marinho. Os turbiditos ocorrem, em geral, intercalados com sedimentos hemipelágicos (ver **Mapa II.5.1.2-2 - Batimétrico e Faciológico**).

Ocorre, também, fácies de erosão por correntes de fundo, que é restrita às áreas mais elevadas da Elevação do Ceará, indicando a atuação de processos oceanográficos atuais ou subatuais.

F - Sismicidade

O padrão de sismicidade observado na Bacia Para-Maranhão, de acordo com os registros históricos apurados, é o padrão característico para região de intraplacas tectônicas (áreas tectonicamente pouco ativas). São de pequenas magnitudes (< 6.0), com foco (hipocentro) ocorrendo comumente a baixas profundidades (< 30 km – são considerados rasos, terremotos com focos situados entre 0 e 70 km), sendo sentidos, em função disto, apenas a poucos quilômetros do epicentro.

A **Figura II.5.1.2-3** apresenta a distribuição epicentral da Margem Equatorial Brasileira. Nessa figura, apresentado um conjunto de eventos sísmicos com magnitudes variando entre 2,8 e 5,3 (escala Richter) registrados no período de 1860 – 2007 (IAG-USP, 2010), pode ser observado que a maior concentração de focos epicentrais na Margem Equatorial ocorre nos domínios da Plataforma Continental e Região Costeira. Na área da Bacia Para-Maranhão essas ocorrências estão restritas à Região Costeira

O nível de atividade nas Bacias Marginais da Margem Equatorial Brasileira apesar de significativo não atinge magnitudes tão elevadas, não tendo sido identificado até o presente, qualquer movimento gravitacional relacionado a sismicidade nas bacias marginais da Margem Equatorial Brasileira.

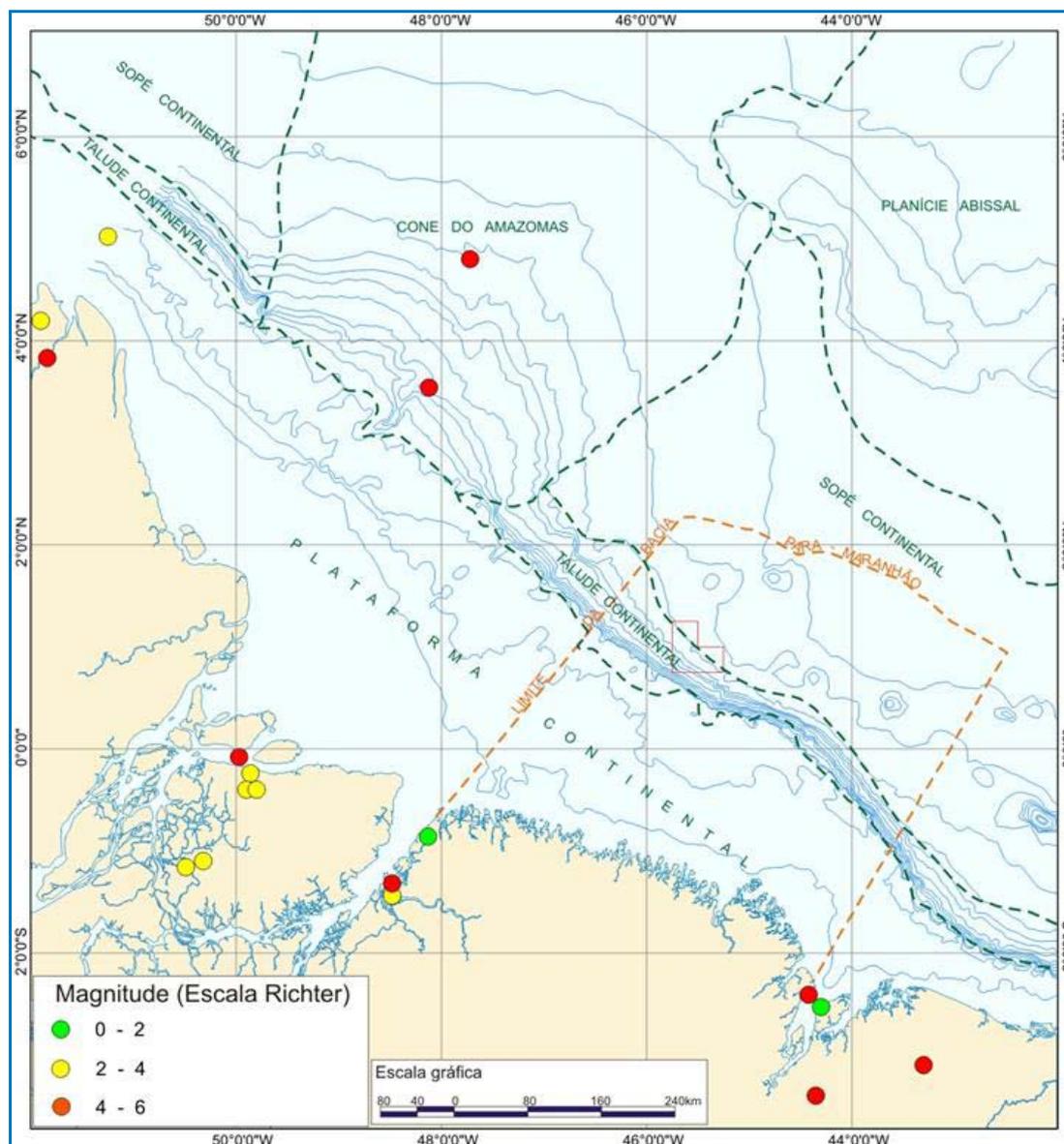


Figura II.5.1.2-3 - Mapa de Sismicidade da Bacia Pará-Maranhão.

Fonte: ICF, 2010. Dados sismotectônicos IAG – USP (2010).

II.5.1.2.2 - Caracterização Geológica e Geomorfológica da Região do PAMA-8

A - Geologia Estrutural

O bloco BM-PAMA-8, objeto do presente estudo, situa-se na porção mais distal da bacia do Pará-Maranhão, que por sua vez está assentada sobre crosta continental estendida. A seção rifte nesta parte da bacia assemelha-se a da região de plataforma com um sistema de blocos basculados formando meio-grabens de direção noroeste-sudeste.

A partir do Albiano teve início o processo de subsidência tectônica e assim cessaram os falhamentos diastróficos. As principais estruturas observadas a partir desta época estão associadas a *roll-overs* que formaram grandes anticlinais, os quais constituem os principais alvos exploratórios no bloco (**Figura II.5.1.2-4**).

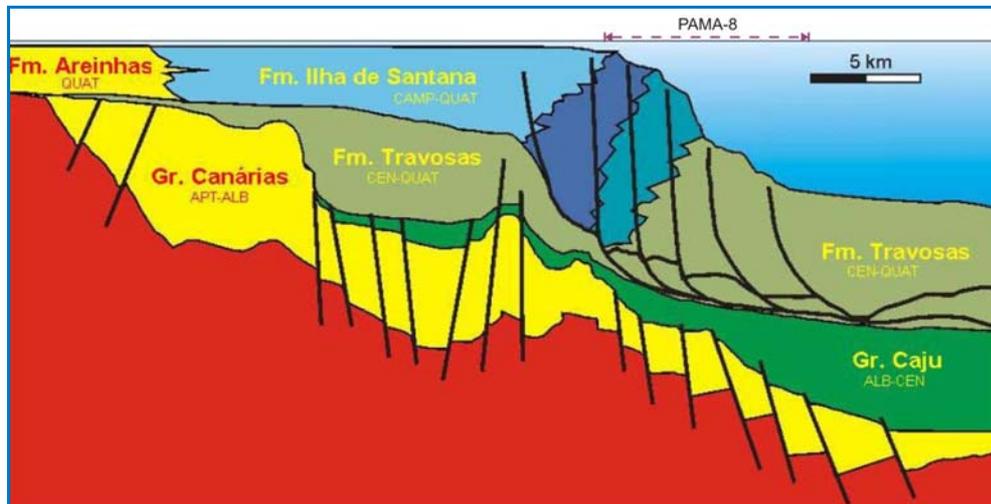


Figura II.5.1.2-4 - Seção geológica generalizada da Bacia do Pará-Maranhão.

Fonte: ANP, 2009.

B - Características Estratigráficas Locais

A área do Bloco PAMA-8 encontra-se na área limítrofe entre o talude e o Sopé Continental. A estratigrafia definida a partir dos poços 1-PAS-28-PA e 1-PAS-29-PA é caracterizada pela ocorrência de extensos pacotes de folhelhos intercalados com margas, calcilutitos e arenitos.

A estratigrafia na área poço 1-PAS-28-PA é caracterizada por uma sucessão de 2.700 m de folhelhos com intercalações de arenitos e margas. Os intervalos objetivos são formados por corpos arenosos expressivos encaixados em folhelhos intercalados com margas.

A estratigrafia na área poço 1-PAS-29-PA é caracterizada por uma coluna de 4450 m de espessura constituída predominantemente por folhelhos com pequenas intercalações de arenitos. A porção inferior dessa sucessão é recoberta por uma camada de siltito com cerca de 100 m de espessura, sendo todo esse pacote é sobreposto por uma seqüência de folhelhos intercalados com marga, calcilutitos e arenitos com cerca de 2.050 m espessura.

C - Fisiografia Características Locais

Para a caracterização da Fisiografia local com mais detalhe foi elaborado mapas de declividade através do software ArcGis, com base no mapa batimétrico local. Foi gerado um modelo digital de terreno (MDT) da área do PAMA-8 sendo elaborado a partir deste MDT, o mapa de declividade local (**Figura II.5.1.2-5**)

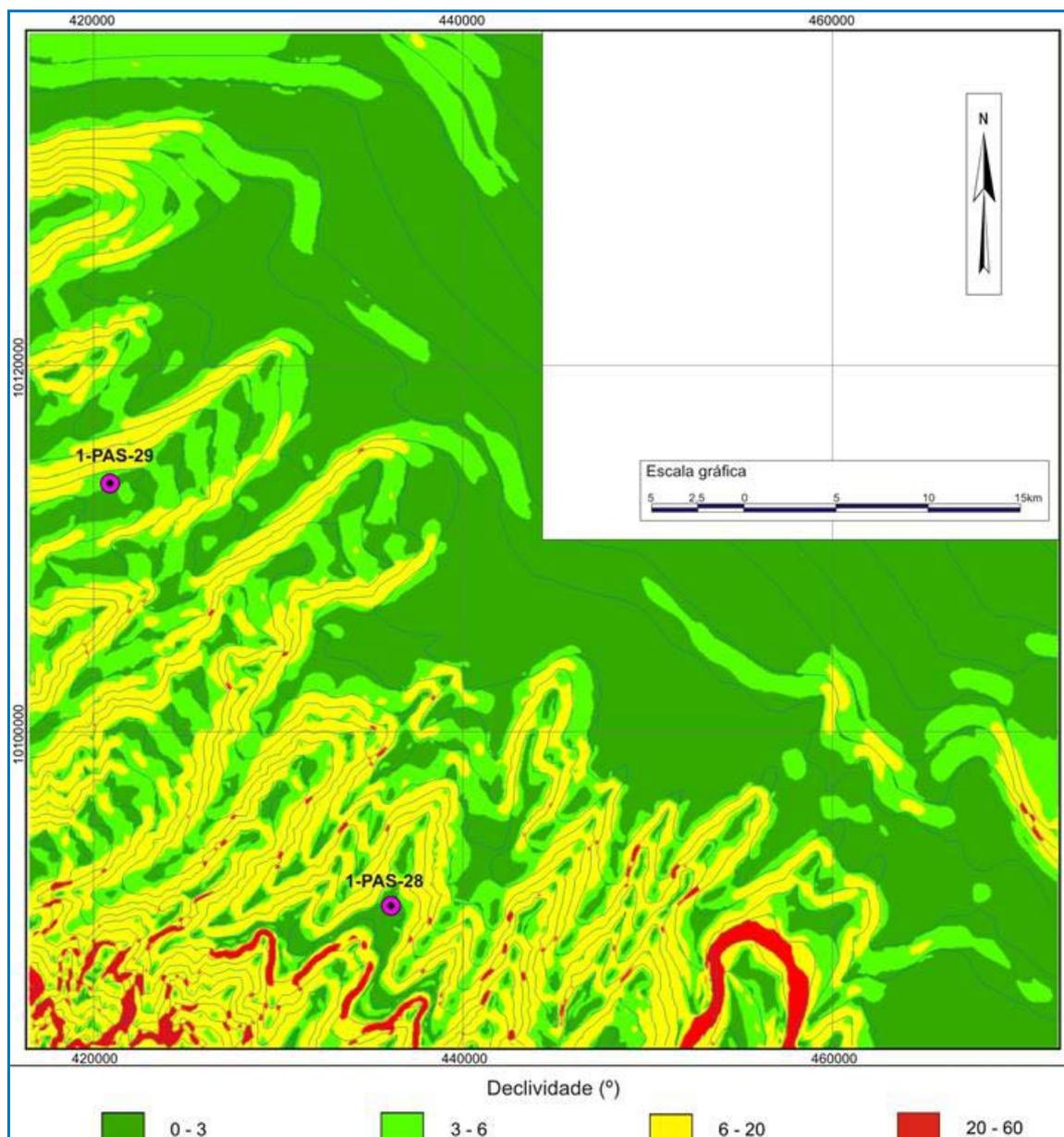


Figura II.5.1.2-5 - Mapa de declividade local – Bloco PAMA-8.

Fonte: ICF, 2010. Dados batimétricos, Petrobras (2009).

A área de estudo está situada no limite do domínio fisiográfico denominado Talude Continental, entre as isóbatas de -800 e -3400m. O Talude apresenta relevo do fundo marinho irregular, com declividades variando de 0° a 40° e declividade média em torno de 2°. A região é dominada por cânions de dimensões variáveis alinhados na direção NE–SW como pode ser observado na **Figura II.5.1.2-5**.

Na Área PAMA-8 o relevo é bem movimentado com gradientes de declividade aumentando em direção ao talude. As áreas de locação do poço 1-PAS-28-PA e 1-PAS-29-PA apresentam gradientes de declividade suaves entre 3° e 6°. Gradientes mais elevados ocorrem na porção sudoeste e sul do Bloco associado aos cânions de direção NE-SW onde são registrados gradientes de declividades superiores a 60°.

D - Descrição dos Sedimentos de Fundo

Com base no mapa batimétrico/faciológico local (**Figura II.5.1.2-6**) e nas poucas amostras descritas e interpretadas na literatura dessa região, pode-se observar que a área do PAMA-8, encontra-se predominantemente no Domínio de Oceano Profundo (Talude Inferior/Sopé Continental), estando inserida na Unidade Faciológica Hemipelágicos.

O terreno é predominantemente lamoso, sendo o faciologia no domínio do Talude constituído principalmente de folhelhos e argilitos, e o domínio do Sopé Continental constituídos principalmente de argilas e silte carregados por correntes de fundo. Na Área dos poços 1-PAS-28-PA e 1-PAS-29-PA o solo é composto por uma sedimentação lamosa hemipelágica (fração argila+silte)

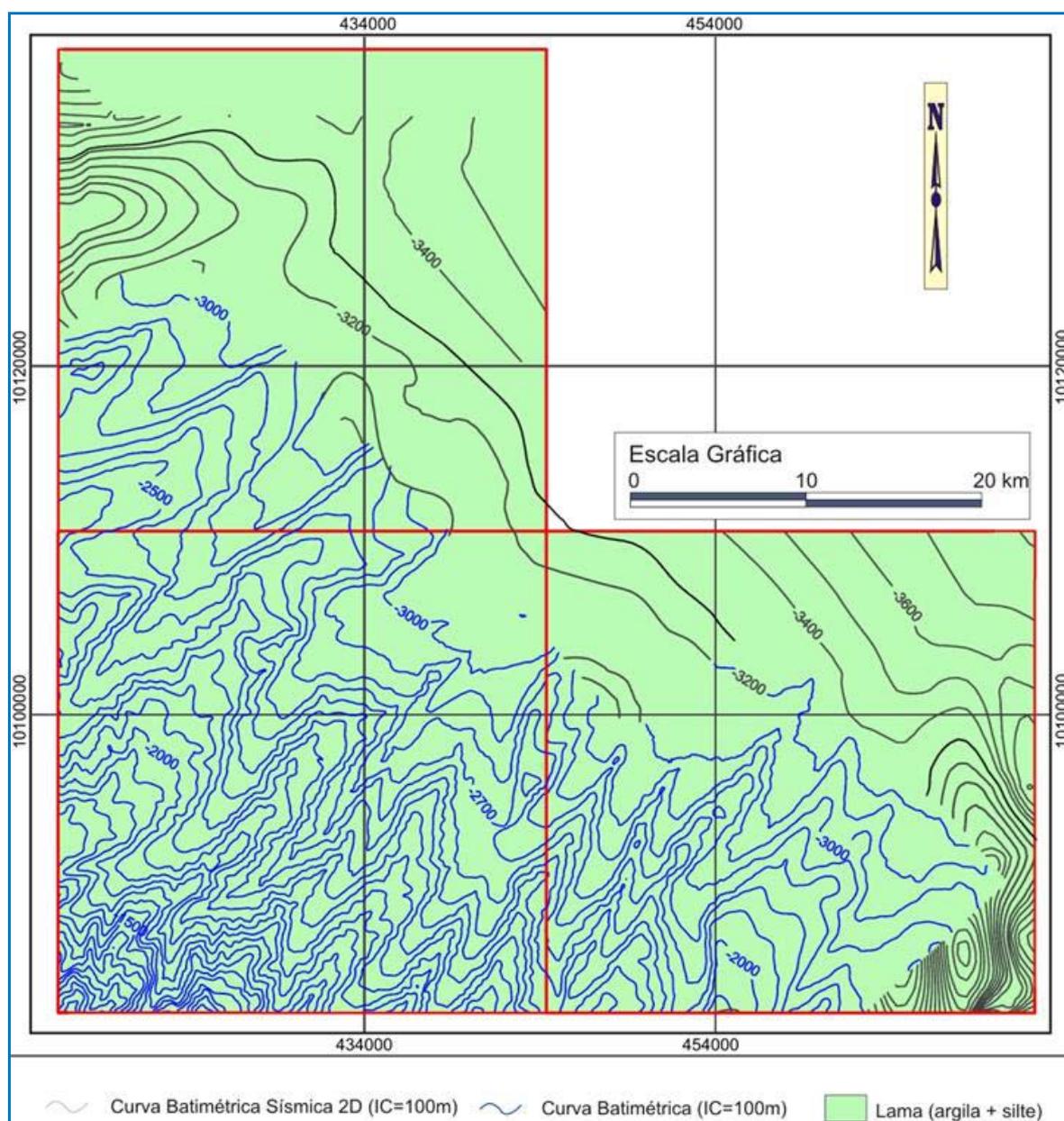


Figura II.5.1.2-6- Mapa faciológico local – Bloco PAMA-8.

Fonte: Petrobras, 2009.

E - Condições Geotécnicas

A área de estudo apresenta, como discutido anteriormente, várias incisões. Através de perfis sísmicos feições de corte e preenchimento também são observadas nos primeiros metros abaixo do fundo marinho. Contudo, pouca movimentação de massa significativa é atualmente observada.

Dados sísmicos indicam que poucas falhas afloram atualmente no fundo marinho, sendo que as mesmas estão em alguns pontos do Bloco BM-PAMA-8 cobertas por sedimentos hemipelágicos recentes. Sendo assim, podemos afirmar que atualmente as falhas não se encontram ativas. O principal período de movimentação destas falhas foi, provavelmente, no Eoceno Superior, cerca de 38 Ma.

Os estudos de geopressões realizados na área do PAMA indicaram pressões de poros em regime hidrostático para a locação do Poço 1-PAS-29 (**Figura II.5.1.2-7**). Para a locação do poço 1-PAS-28 o modelo indica a possibilidade de ocorrência de pressão de até 10,5 ppg a aproximadamente 4500 m de profundidade (**Figura II.5.1.2-8**).

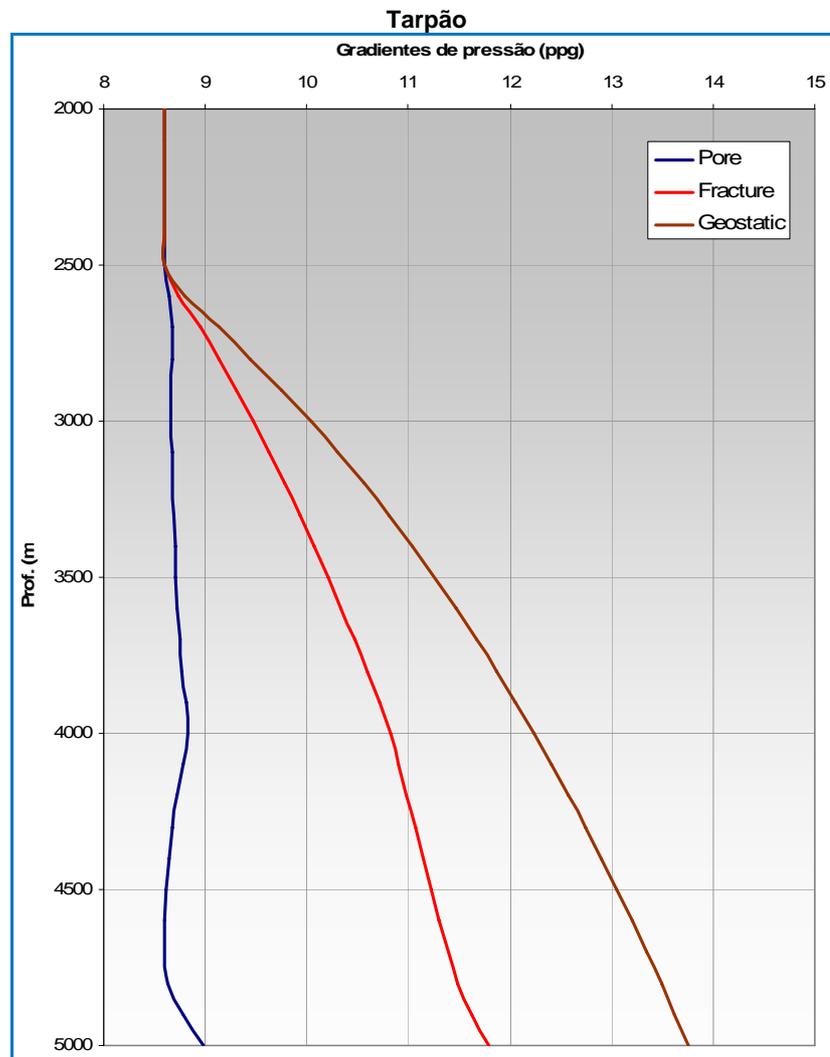


Figura II.5.1.2-7 - Modelo de geopressões da locação 1-PAS-29.

Fonte: Petrobras, 2009.

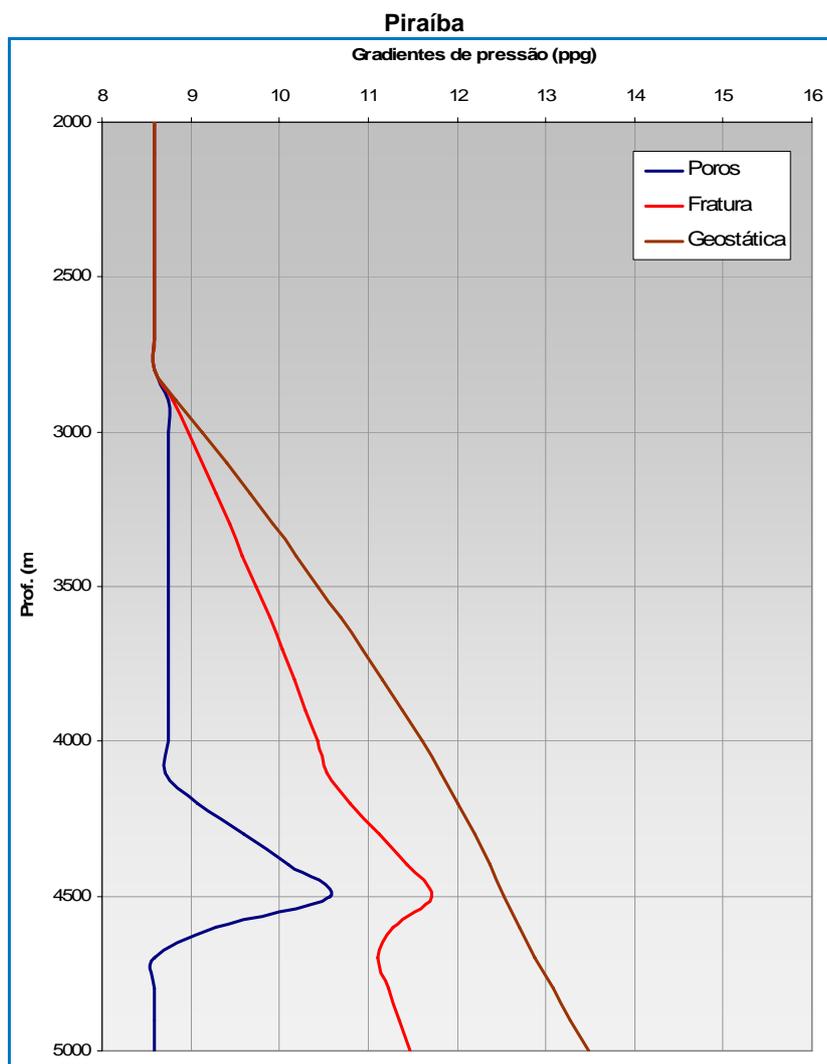


Figura II.5.1.2-8 - Modelo de geopressões da localização 1-PAS-28.

Fonte: Petrobras, 2009.

II.5.1.3 - Oceanografia

A abordagem adotada na caracterização oceanográfica apresentada neste relatório parte de um levantamento a nível regional da Bacia do Pará-Maranhão, e sempre que possível, apresenta as características particulares das proximidades do Bloco BM-PAMA-8.

Para este estudo foram utilizados dados das fontes citadas a seguir:

- Dados de temperatura e salinidade do *National Oceanographic Data Center* (NODC), da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) e do Banco Nacional de Dados Oceanográficos (BNDO).
- Dados de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) do ODYSSEA disponibilizados pelo IFREMER/CERSAT.
- Produtos operacionais de previsão oceânica oriundos do projeto ATLASUL (LAMMA/UFRJ).
- Dados de corrente do Programa *World Ocean Circulation Experiment* (WOCE).
- Bóias de deriva do *Global Drifter Program* (NOAA/AOML).
- Dados de ondas do projeto ERA-40 (ECMWF Re-Analysis 40) do ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) e do BNDO.
- Dados de maré obtidos do modelo FES-95.

Referências bibliográficas sobre a oceanografia local também foram utilizadas para elaboração dessa caracterização.

Na **Quadro II.5.1.3-1** apresenta-se um resumo das fontes de dados utilizadas no estudo e as suas respectivas localizações.

Quadro II.5.1.3-1 - Localização das fontes de dados utilizadas na caracterização oceanográfica da área do Bloco BM-PAMA-8 e proximidades.

| Fontes | Coordenadas | | Parâmetros |
|--------------------|--------------------|---------------------------|----------------------|
| | Latitude | Longitude | |
| NODC e BNDO (área) | 0° – 2° N | 44° 30' W - 46° 30' W | T e S |
| NODC (área) | 3° S - 5° N | 41° W - 49° W | T e S (climatologia) |
| ODYSSEA (área) | 3° S – 5° N | 41° W – 49° W | TSM |
| ERA-40 | 0° | 45° W | Ondas |
| BNDO (área) | 0° - 2° N | 45° W – 47° W | Ondas |
| GFO/JASON | 1° N | 46° W | Ondas |
| FES-95 | 1° N | 45° 30' W | Maré |
| AOML/NOAA | -3° S – 3° N | 40° W – 50° W | Correntes |
| WOCE | 0° 5' N - 0° 15' N | 44° 18' 36"W-44° 23' 24"W | Correntes |

Legenda: T = Temperatura; S = Salinidade; TSM = Temperatura Superficial do Mar

Nos itens a seguir, são apresentadas as análises dos parâmetros oceanográficos de maior interesse para essa caracterização, a saber:

- Temperatura e Salinidade;
- Massas d'água;
- Regime de Correntes;
- Regime de Ondas;
- Regime de Marés;

II.5.1.3.1 - Temperatura e Salinidade

O estudo da temperatura e salinidade nos oceanos é de extrema importância para o conhecimento das estruturas verticais de massas d'água, bem como para o entendimento do papel dos oceanos como reservatório de sal, gases e calor (FERRERO & WAINER, 2008).

Para avaliar a variação vertical de temperatura e salinidade, na região próxima ao Bloco BM-PAMA-8, foram utilizados os dados dos perfis de temperatura e salinidade disponíveis no BNDO e no NODC, coletados entre os anos de 1927 e 1996. Na **Figura II.5.1.3-1** é apresentada a localização do BM-PAMA-8 e das estações de coleta de dados para os perfis apresentados. Os dados adquiridos foram tratados e observações com valores inferiores ou superiores a três vezes o desvio médio para cada profundidade foram descartados.

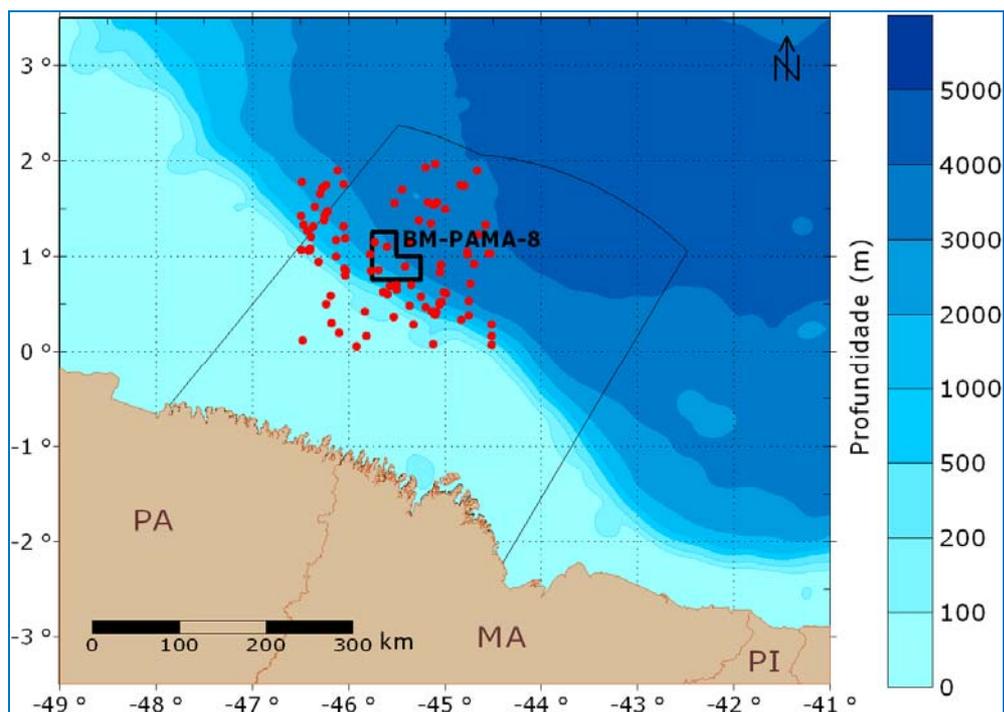


Figura II.5.1.3-1 - Localização das estações de coleta utilizadas para avaliação da variação vertical da temperatura e salinidade.

Na **Figura II.5.1.3-2** e na **Figura II.5.1.3-3**, são apresentados os perfis verticais de temperatura e salinidade para os períodos de verão, outono, inverno e primavera (referentes ao Hemisfério Norte).

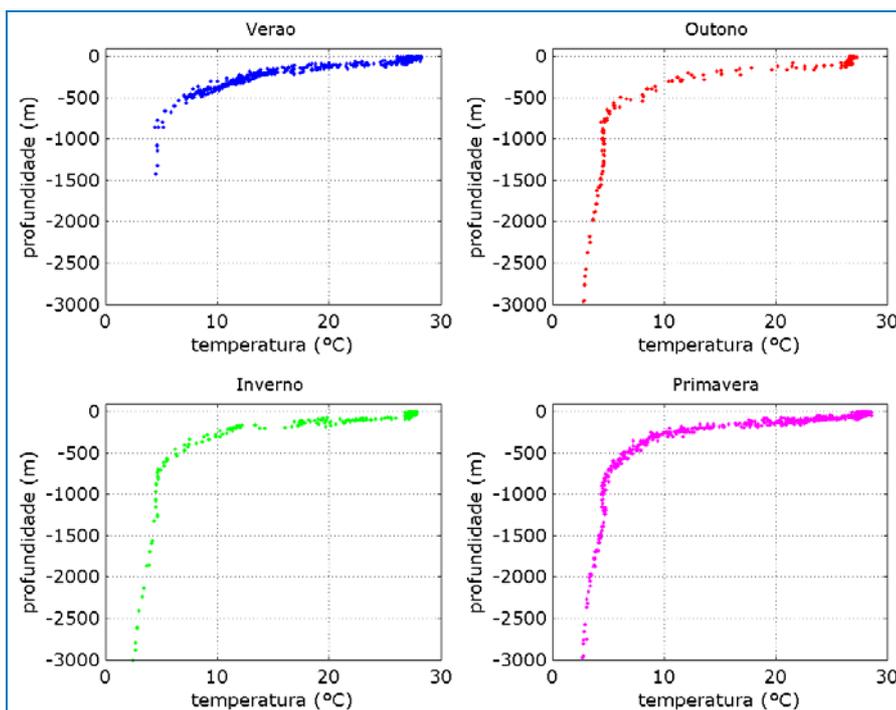


Figura II.5.1.3-2 - Perfis de temperatura na área do Bloco BM-PAMA-8 e proximidades nas quatro estações do ano.

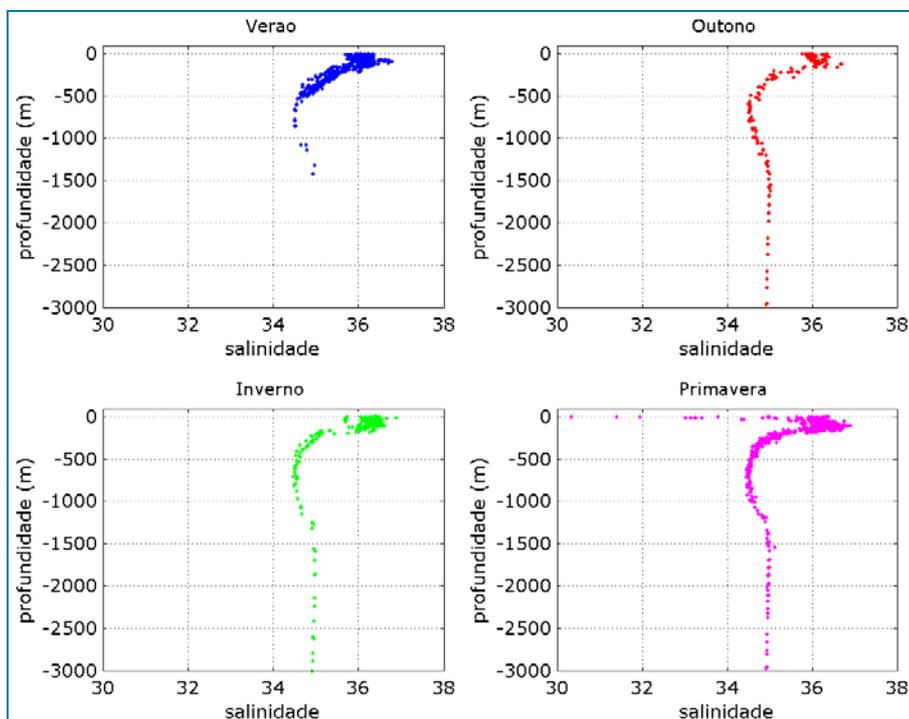


Figura II.5.1.3-3 - Perfis de salinidade na área do Bloco BM-PAMA-8 e proximidades nas quatro estações do ano.

A região da Bacia do Pará-Maranhão, nas proximidades do Bloco BM-PAMA-8, apresenta uma termoclina permanente que se inicia a cerca de 100 m de profundidade e se estende até aproximadamente 700 m, onde a temperatura é de aproximadamente 4 °C. A partir desta profundidade, a temperatura apresenta um ligeiro decréscimo.

Não foram verificadas variações sazonais significativas nos perfis de temperatura. Em superfície, a menor temperatura registrada (26,08 °C) ocorreu no período de verão (Hemisfério Norte), enquanto que a temperatura superficial mais elevada (28,57 °C) foi verificada na primavera.

Os perfis de salinidade também não apresentaram grandes variações sazonais, exceto em superfície, onde salinidades mais baixas podem ocorrer durante a primavera (período chuvoso), que apresentou o mínimo de ~30. O mínimo de salinidade associado à Água Intermediária Antártica (AIA) ocorre entre 700 e 800 m de profundidade em todas as estações.

A **Tabela II.5.1.3-1** apresenta os mínimos e máximos de temperatura e salinidade superficiais na região do Bloco BM-PAMA-8.

Tabela II.5.1.3-1 - Variação da temperatura e salinidade na área do Bloco BM-PAMA-8 e proximidades nas quatro estações do ano.

| Estação | Temperatura Mínima (°C) | Temperatura Máxima (°C) | Salinidade Mínima | Salinidade Máxima |
|-----------|-------------------------|-------------------------|-------------------|-------------------|
| Verão | 26,08 | 28,22 | 35,70 | 36,33 |
| Outono | 26,65 | 27,29 | 35,78 | 36,35 |
| Inverno | 26,81 | 27,88 | 35,73 | 36,49 |
| Primavera | 26,89 | 28,57 | 30,34 | 36,39 |

A partir da climatologia anual do *World Ocean Atlas 05* (WOA05) do NODC é possível obter uma boa estimativa da temperatura e da salinidade climatológicas na região da Bacia do Pará-Maranhão. Os campos que compõem a base de dados da climatologia WOA05 consistem da análise objetiva de dados irregularmente espaçados, gerando uma grade global com resolução espacial de 1°. Estes campos são tridimensionais e os dados são interpolados em 33

profundidades padrão desde a superfície até 5.500 m de profundidade. Temporalmente, esta climatologia consiste na média realizada para o período compreendido entre os anos de 1900 e 2005.

Os dados da climatologia WOA05 podem ser obtidos através da sua página na *internet* (WOA05, 2005).

A seguir, da **Figura II.5.1.3-4** a **Figura II.5.1.3-9** são apresentadas as temperaturas climatológicas nos níveis de 0, 100, 400, 1.000, 1.500 e 3.000 m, na região da Bacia do Pará-Maranhão.

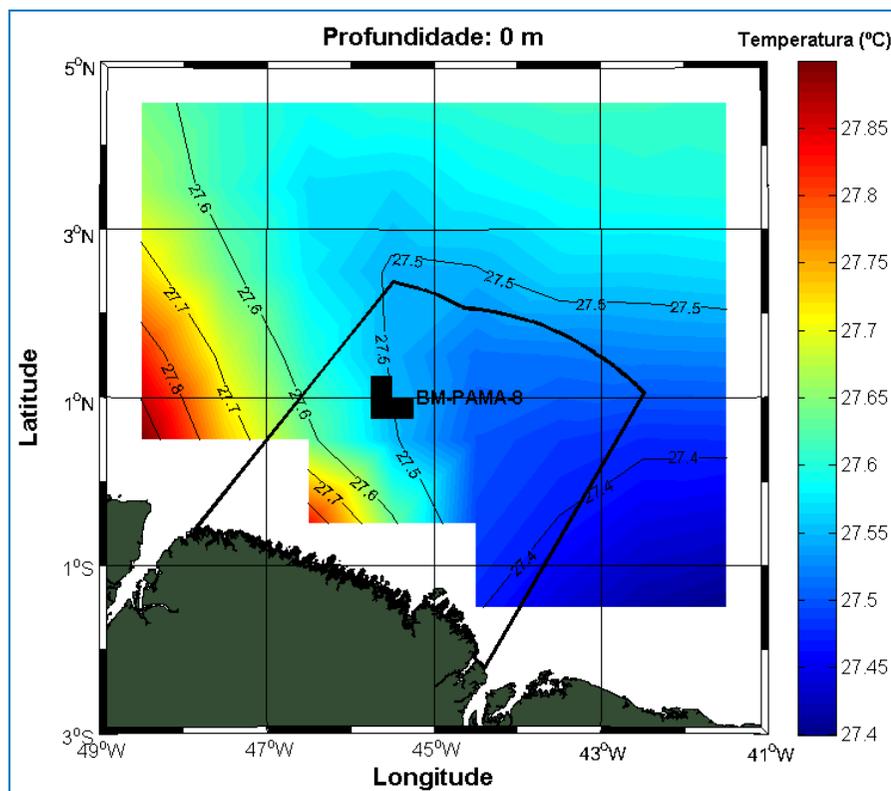


Figura II.5.1.3-4 - Temperatura climatológica superficial na região da Bacia do Pará-Maranhão.

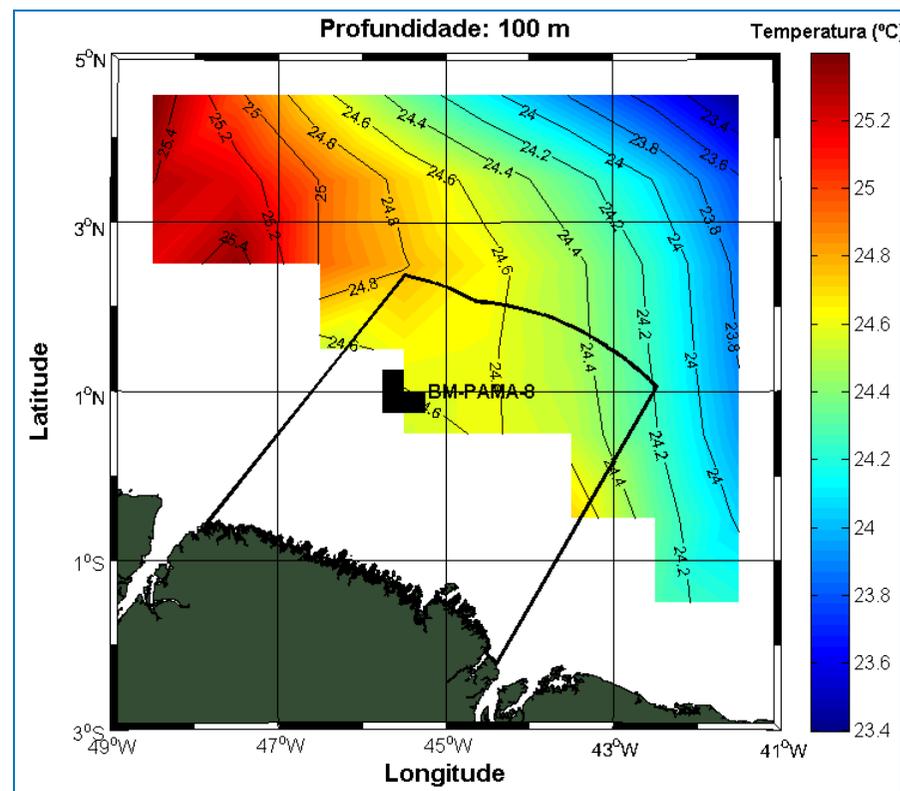


Figura II.5.1.3-5 - Temperatura climatológica a 100 m de profundidade na região da Bacia do Pará-Maranhão.

Fonte: NODC.

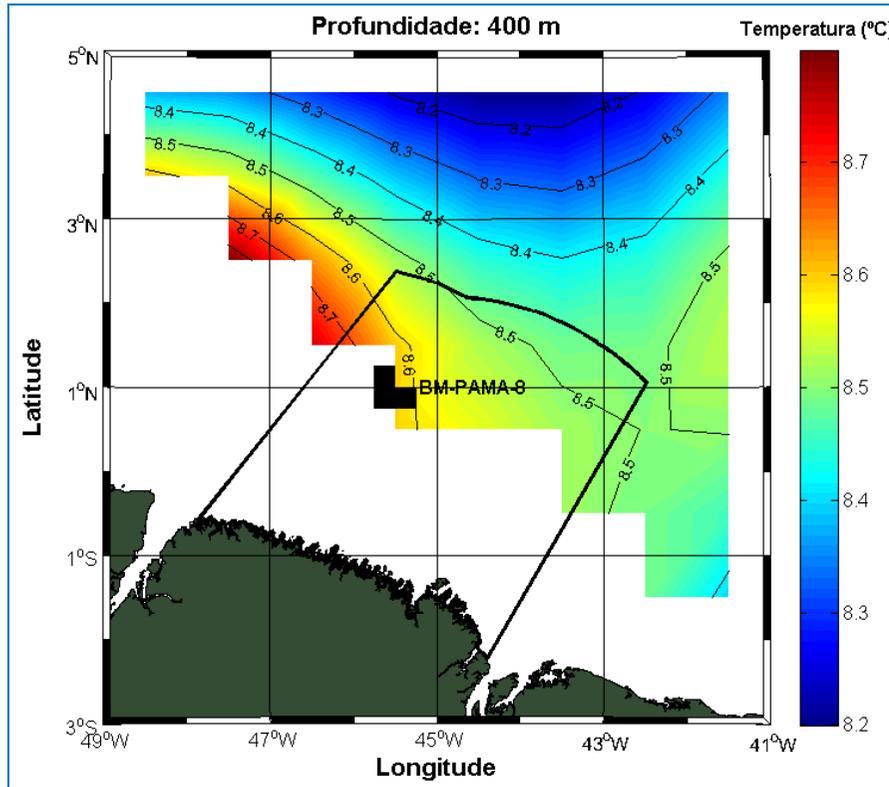


Figura II.5.1.3-6 - Temperatura climatológica a 400 m de profundidade na região da Bacia do Pará-Maranhão.

Fonte: NODC.

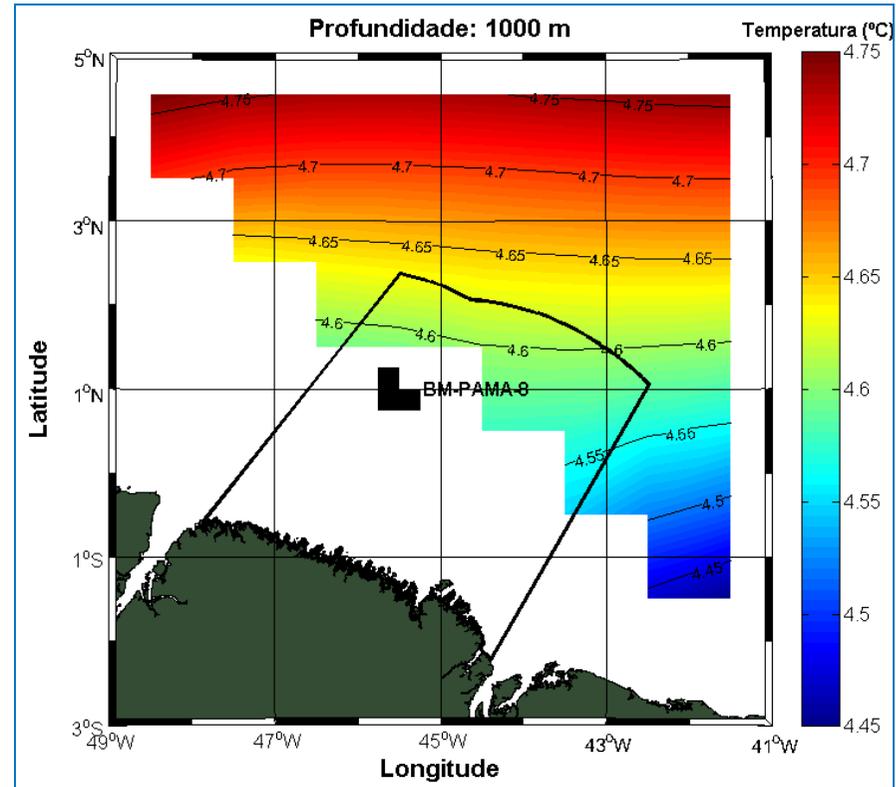


Figura II.5.1.3-7 - Temperatura climatológica a 1.000 m de profundidade na região da Bacia do Pará-Maranhão.

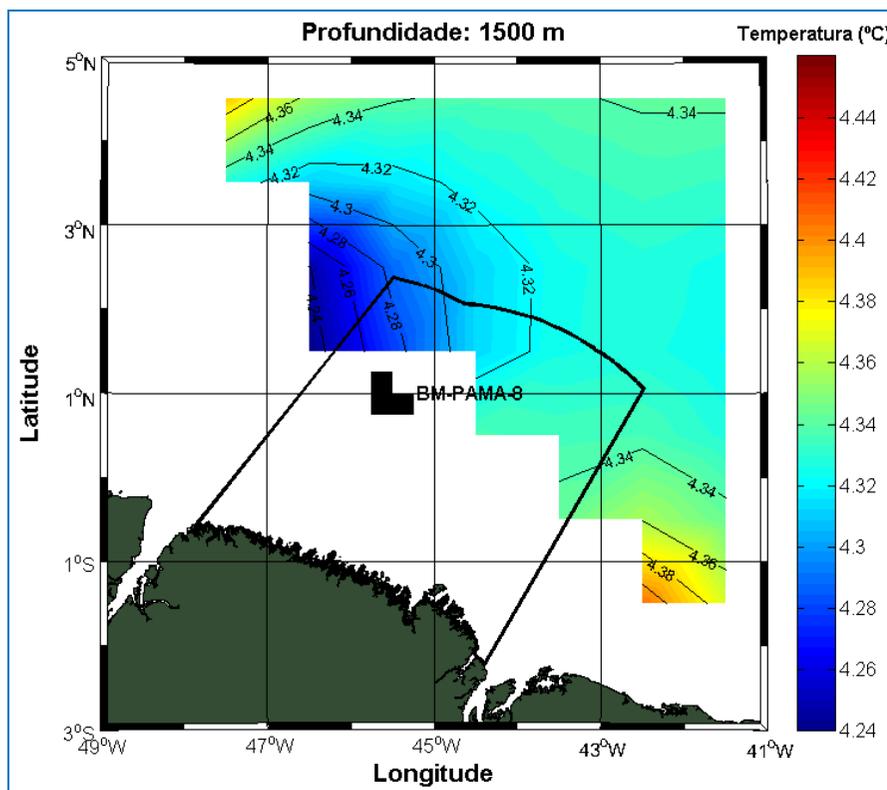


Figura II.5.1.3-8 - Temperatura climatológica a 1.500 m de profundidade na região da Bacia do Pará-Maranhão.

Fonte: NODC.

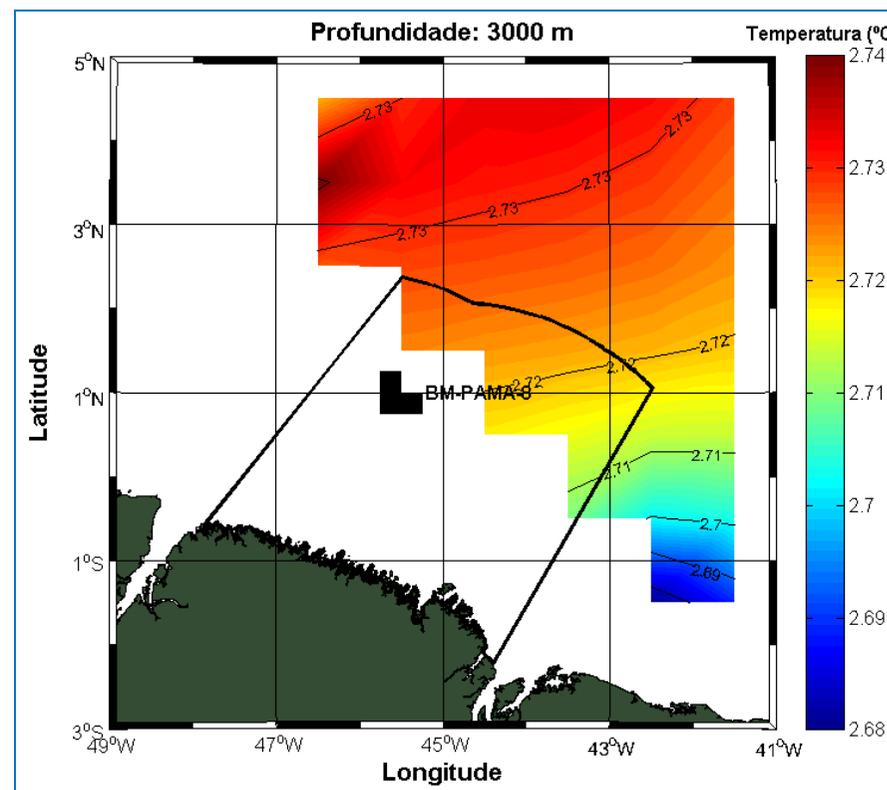


Figura II.5.1.3-9 - Temperatura climatológica a 3.000 m de profundidade na região da Bacia do Pará-Maranhão.

Embora não haja informações de temperatura, em profundidade, na área do Bloco BM-PAMA 8 estes dados são úteis para caracterização de áreas adjacentes, por vezes mais profundas, mas ainda na Bacia do Pará-Maranhão. Observa-se que a temperatura superficial climatológica nas proximidades do Bloco BM-PAMA-8 fica em torno de 27,5 °C (**Figura II.5.1.3-4**). Em termos mais gerais, observa-se que a temperatura superficial aumenta nas proximidades da costa. A 100 m de profundidade, a temperatura climatológica na área do bloco se encontra entre 23,4 e 25,4 °C e, em 400, 1.000, 1.500 e 3.000 m de profundidade, há um decréscimo da temperatura, em um intervalo de 8 a 2 °C. No **Tabela II.5.1.3-2**, observa-se a variação da temperatura climatológica, na Bacia do Pará-Maranhão, em todos os níveis analisados.

Tabela II.5.1.3-2 - *Variação da temperatura climatológica na Bacia do Pará-Maranhão nos níveis de 0, 100, 400, 1.000, 1.500, 3.000 m de profundidade.*

| Profundidade | Mínima (°C) | Máxima (°C) |
|--------------|-------------|-------------|
| Superfície | 27,4 | 27,85 |
| 100 m | 23,4 | 25,4 |
| 400 m | 8,2 | 8,7 |
| 1.000 m | 4,45 | 4,76 |
| 1.500 m | 4,24 | 4,44 |
| 3.000 m | 2,68 | 2,74 |

Fonte: NODC.

Da **Figura II.5.1.3-10** a **Figura II.5.1.3-15** são apresentadas as salinidades climatológicas, nas mesmas profundidades para as quais apresentou-se as temperaturas climatológicas.

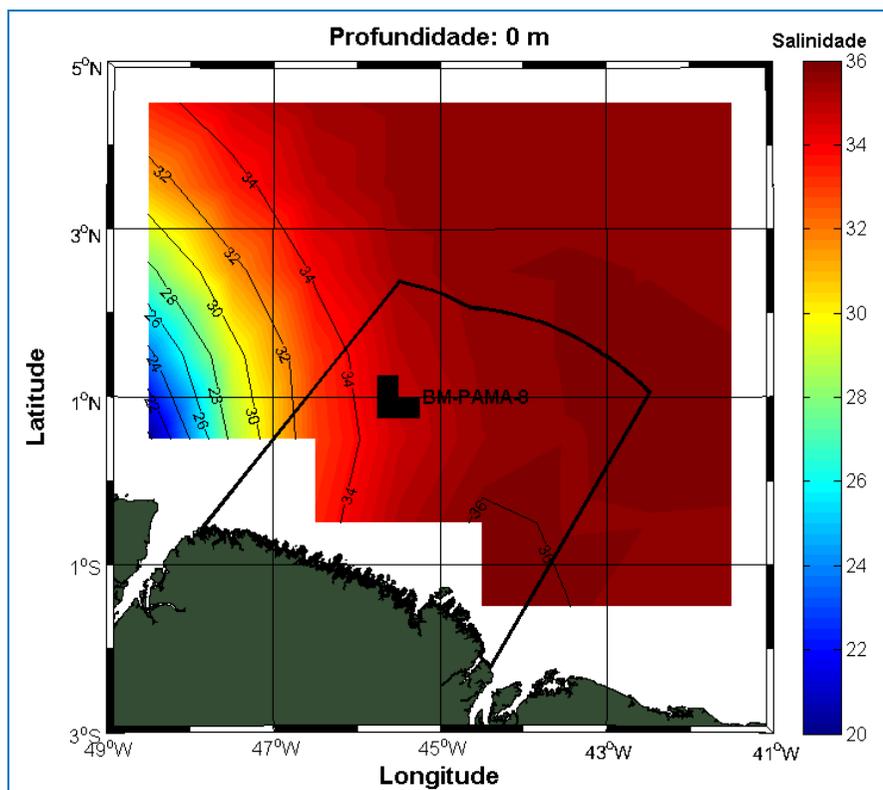


Figura II.5.1.3-10 - Salinidade climatológica superficial na região da Bacia do Pará-Maranhão.

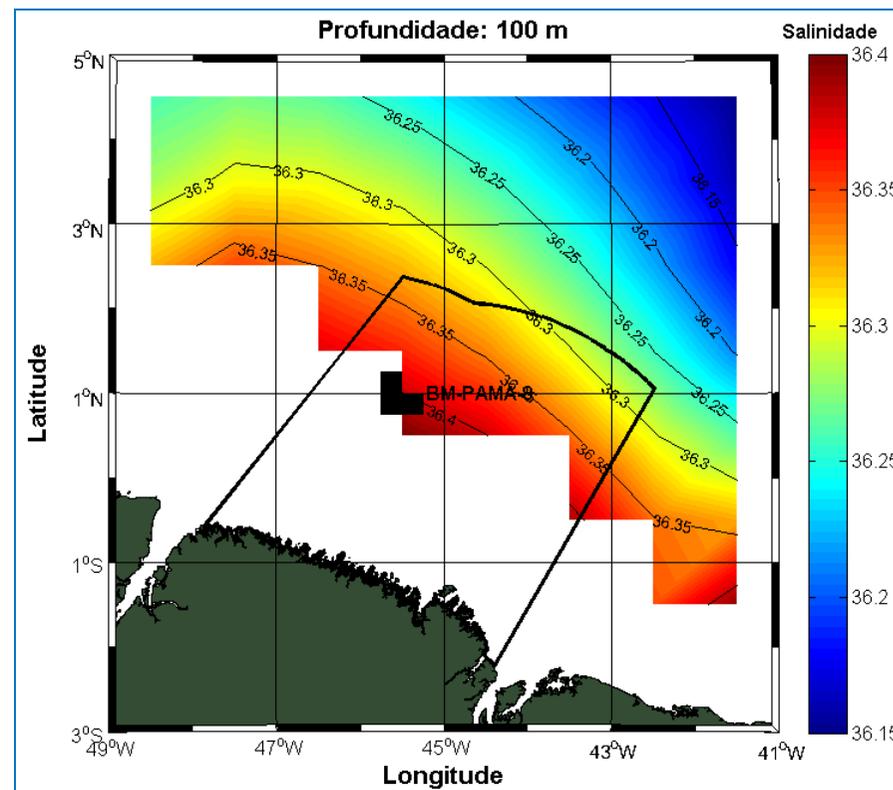


Figura II.5.1.3-11 - Salinidade climatológica a 100 m de profundidade na região da Bacia do Pará-Maranhão.

Fonte: NODC.

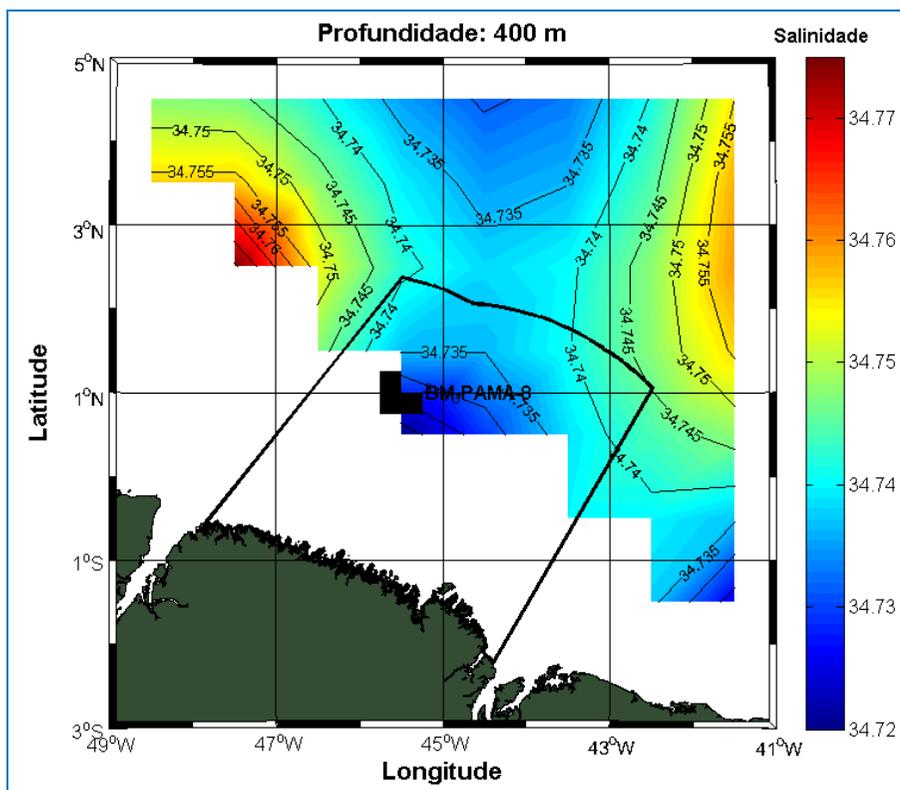


Figura II.5.1.3-12 - Salinidade climatológica a 400 m de profundidade na região da Bacia do Pará-Maranhão.

Fonte: NODC.

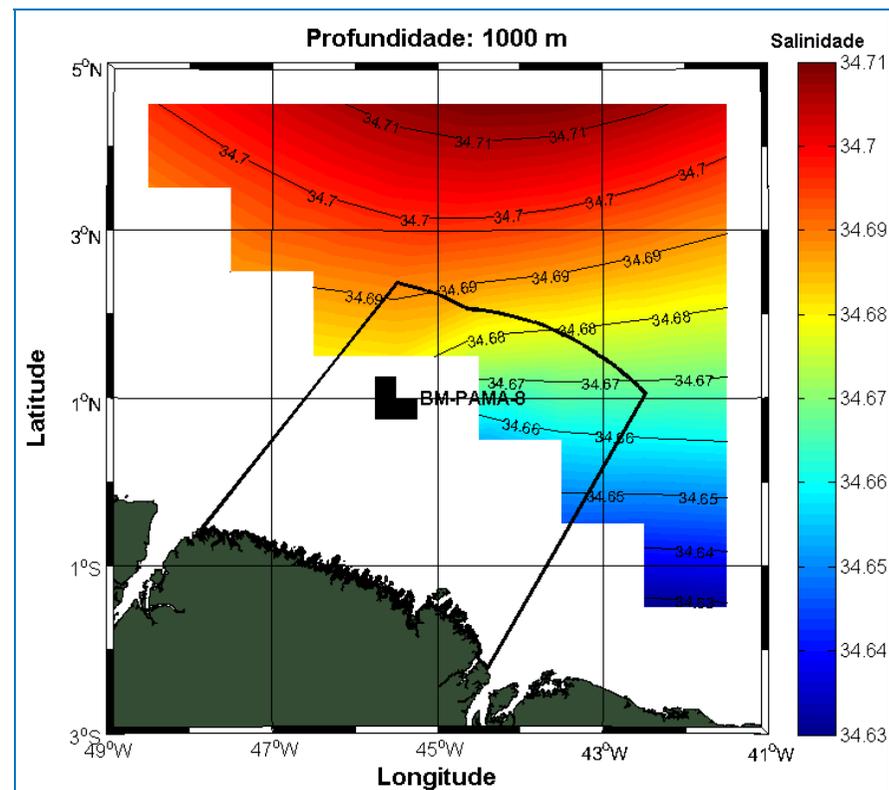


Figura II.5.1.3-13 - Salinidade climatológica a 1.000 m de profundidade na região da Bacia do Pará-Maranhão.

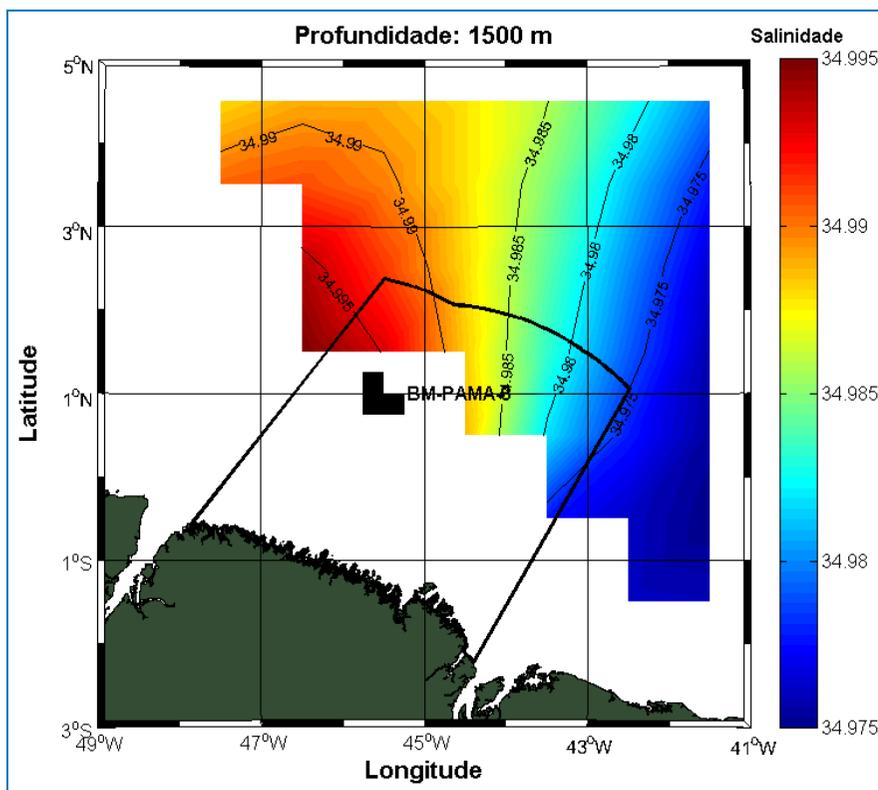


Figura II.5.1.3-14 - Salinidade climatológica a 1.500 m de profundidade na região da Bacia Marítima do Pará-Maranhão.

Fonte: NODC.

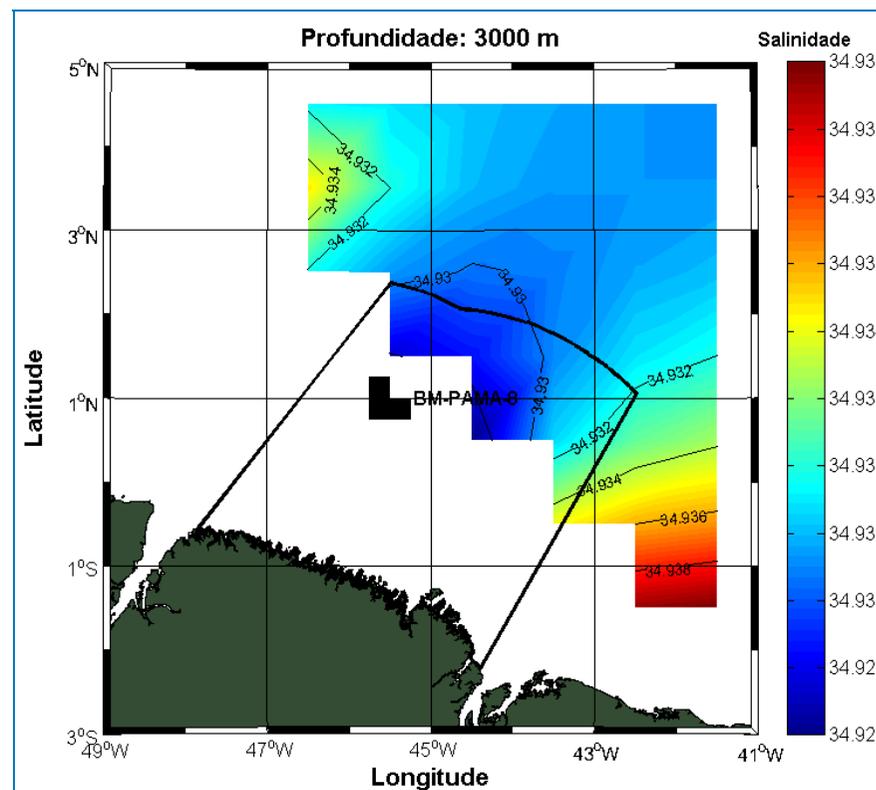


Figura II.5.1.3-15 - Salinidade climatológica a 3.000 m de profundidade na região da Bacia do Pará-Maranhão.

A salinidade climatológica superficial na região do Bloco BM-PAMA-8 se encontra próxima a 35. Os valores mais baixos, que ocorrem próximo ao limite oeste da Bacia do Pará-Maranhão, são decorrentes da proximidade com a foz do rio Amazonas e a alta pluviosidade da região.

Na **Tabela II.5.1.3-3** observa-se a variação da salinidade climatológica nos níveis analisados.

Tabela II.5.1.3-3 - *Variação da salinidade climatológica nos níveis de 0, 100, 400, 1.000, 1.500 e 3.000 m de profundidade. Fonte: NODC.*

| Profundidade | Mínima | Máxima |
|--------------|--------|--------|
| Superfície | 20,00 | 36,00 |
| 100 m | 36,15 | 36,40 |
| 400 m | 34,72 | 34,77 |
| 1.000 m | 36,63 | 34,71 |
| 1.500 m | 34,98 | 35,00 |
| 3.000 m | 34,93 | 34,94 |

Para o estudo da variabilidade sazonal da TSM foram utilizados dados satelitais disponibilizados pelo IFREMER/CERSAT (IFREMER/CERSAT, 2009). O produto ODYSSEA (Ocean Data analysis System for merSEA) abrange todo o globo e possui alta resolução (~10 km). O produto é oferecido diariamente, sendo resultado da combinação de diversos sensores infravermelhos e micro-ondas através de um processo de Análise Objetiva. A seguir, na **Figura II.5.1.3-16** e na **Figura II.5.1.3-17**, são apresentadas as médias sazonais (período chuvoso e seco) para o ano de 2008 na região da Bacia do Pará-Maranhão.

A grande vantagem da utilização do sensoriamento remoto para obtenção de dados de temperatura é que devido à elevada sensibilidade dos sensores que estão em operação, pequenas variações em áreas extensas podem ser capturadas, principalmente quando comparados a resultados obtidos a bordo de navios (SOUZA *et al.*, 2005).

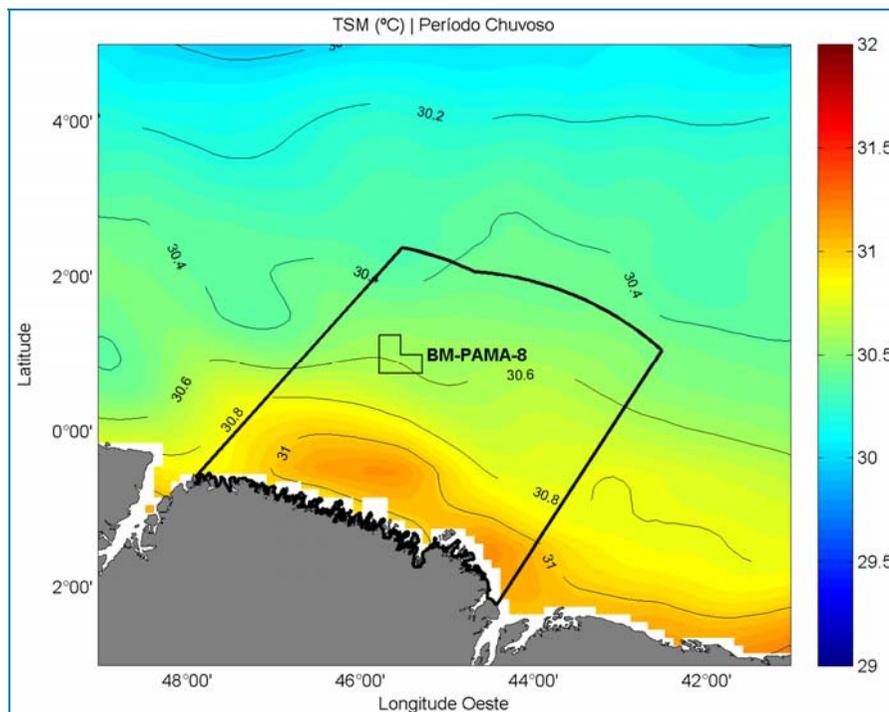


Figura II.5.1.3-16 - TSM na região da Bacia do Pará-Maranhão no período chuvoso: média sazonal de janeiro a junho de 2008.

Dados: ODYSSEA.

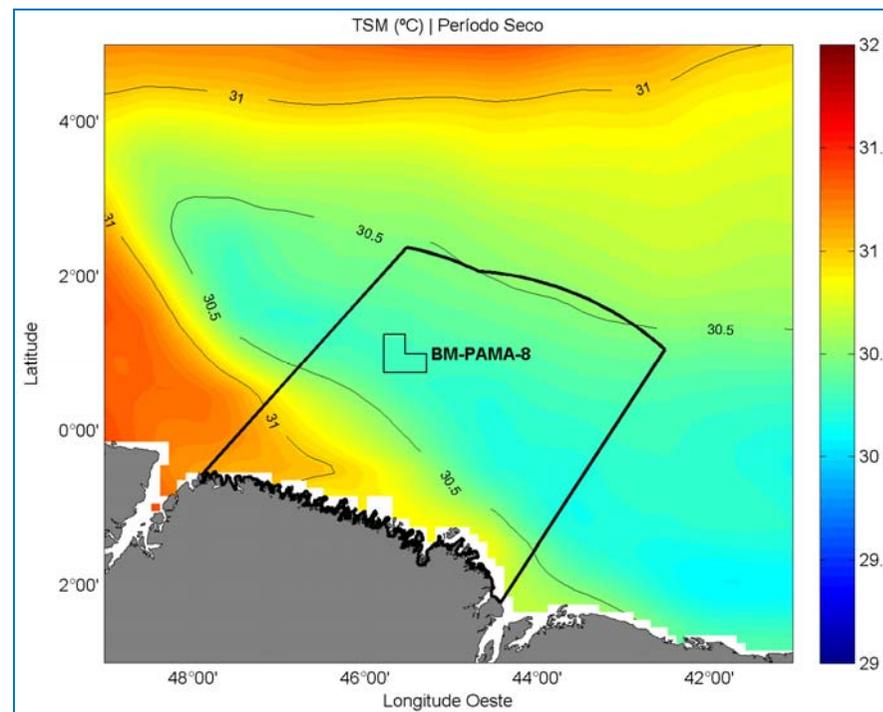


Figura II.5.1.3-17 - TSM na região da Bacia do Pará-Maranhão no período seco: média sazonal de julho a dezembro de 2008.

Analisando as imagens observa-se que no período chuvoso, em média, as maiores temperaturas na região da Bacia do Pará-Maranhão são encontradas próximas a costa, e as águas mais frias, em direção ao oceano. Neste período, a temperatura média na região do BM-PAMA-8 foi de ~30,6 °C. No período seco, a temperatura média na região do Bloco foi ligeiramente menor (~30,2 °C). Nesta época são observadas águas mais frias entrando pela porção leste da Bacia, com a presença de águas mais quentes ao norte e ao sul da mesma.

II.5.1.3.2 - Massas d'Água

As massas d'água são corpos de água com história comum de formação, definidos por suas características de temperatura e salinidade que, por sua vez, definem sua densidade. Esta última determina a posição que estes corpos irão ocupar na coluna d'água (MIRANDA, 1991).

Segundo Stramma & Schott (1999) e Castro & Miranda (1998), que realizaram uma descrição preliminar das massas d'água presentes na costa Norte brasileira, espera-se encontrar as seguintes massas de água na região da Bacia do Pará-Maranhão:

- Água Costeira (AC) - água de salinidade abaixo de 34, devido à influência que sofre do continente, e temperaturas entre 26 e 28,87°C.
- Água Tropical (AT) - formada pela mistura de camadas mais superficiais do oceano; apresenta temperaturas maiores que 18°C e salinidades maiores que 36.
- Água de Mistura (AM) - apresenta salinidade variando entre 34 e 36 e temperatura acima de 18°C. Massa d'água proveniente da mistura entre AT e AC;
- Água Central do Atlântico Sul (ACAS) - apresenta uma temperatura mínima de 6°C e máxima de 18°C; a salinidade oscila entre 34,5 e 36. Massa d'água situada entre a Água Tropical (AT) e a Água Intermediária Antártica (AIA). É formada na Convergência Subtropical. Atinge o Equador através da Corrente Norte do Brasil (CNB) e Contra Corrente Norte do Brasil (CCNB).

- Água Intermediária Antártica (AIA) - apresenta valores de temperatura entre 2,75°C e 5°C e salinidade entre 34,1 e 34,5. É proveniente da Convergência Antártica direcionando-se ao Atlântico Norte. Apresenta um mínimo de salinidade entre 700 e 1.100 m de profundidade.
- Água Profunda do Atlântico Norte (APAN) – apresenta valores de temperatura variando de 2°C a 3°C, salinidade oscilando entre 34,7 e 35,5. Formada na região Ártica é observada entre 1.000 e 2.500 m de profundidade.

Na **Figura II.5.1.3-18** são apresentados mapas do Oceano Atlântico mostrando em quais profundidades (**Figura II.5.1.3-18-a**) são encontrados os valores mínimos de salinidade (**Figura II.5.1.3-18-b**), que indicam a presença da Água Intermediária Antártica. Na **Figura II.5.1.3-19** é apresentada uma seção vertical de salinidade variando com a latitude e a profundidade. Esta seção é indicada por um traço contínuo na **Figura II.5.1.3-18-a**.

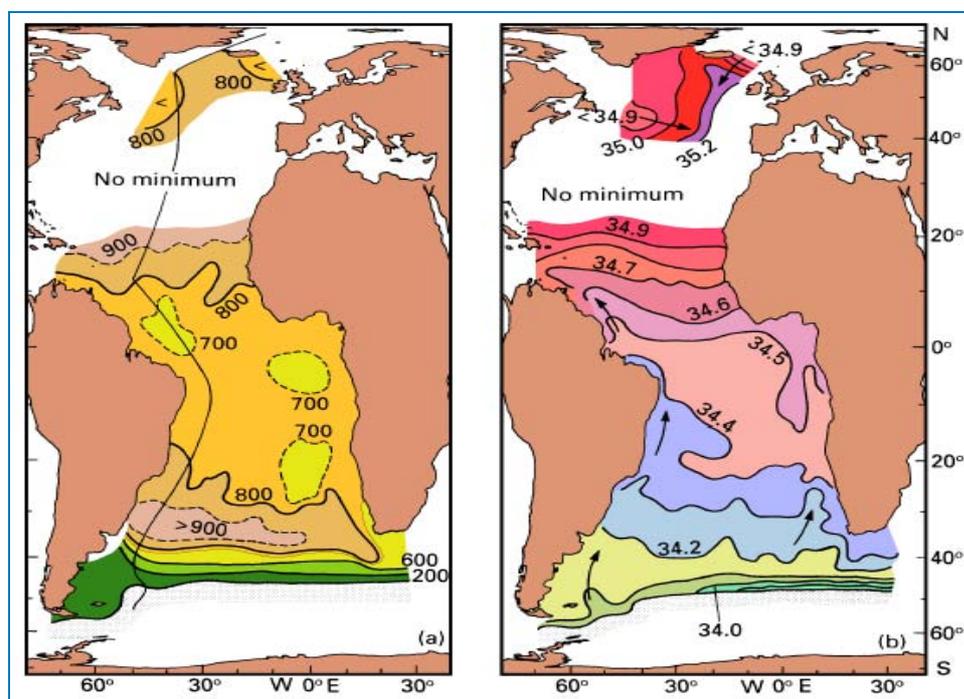


Figura II.5.1.3-18 - Mapa dos valores mínimos de salinidade provocados pela Água Intermediária Antártica.

Fonte: Tomczak & Godfrey, 1994. ((a) profundidade da mínima (os tons de verde representam áreas onde o mínimo de salinidade é encontrado em áreas mais rasas, e em bege, áreas mais profundas); (b) salinidade na profundidade da mínima (a escala de cores apresenta valores crescentes do verde para o vermelho)).

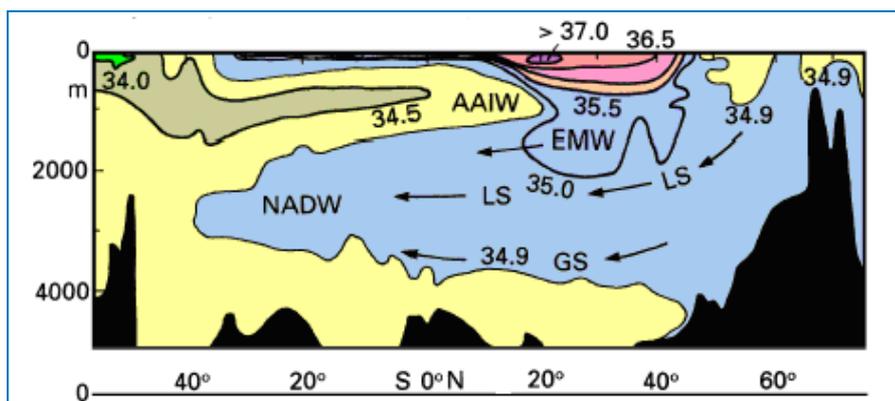


Figura II.5.1.3-19 - Seção vertical de salinidade através da bacia oeste do Oceano Atlântico.

AIA – Água Intermediária Antártica (AAIW), APAN - Água Profunda do Atlântico Norte (NADW), Mar do Labrador (LS), Mar da Groenlândia (GS), AME - Água Mediterrânea Eurafriana (EMW).
Fonte: Tomczak & Godfrey, 1994.

É possível notar, para a latitude da região de estudo, a presença da AIA e da APAN, além das águas mais superficiais com maiores valores de salinidade.

No estudo realizado por Moller *et al.* (2006) foram apontadas zonas de transição entre as massas d'água. Os autores apresentam uma zona de transição entre a AC e a AT chamada de ZACAT, que representa a mistura entre a Água Costeira e a Água Tropical, e outra entre a AT e a ACAS, denominada ZATACAS. Deve ser ressaltado que os dados utilizados nesta abordagem foram coletados entre os meses de maio e junho de 1999, correspondendo ao período de máxima descarga do rio Amazonas.

Da **Figura II.5.1.3-20** a **Figura II.5.1.3-26** são apresentados os mapeamentos das massas d'água na região da plataforma continental amazônica (PCA) nas profundidades de 10, 50, 100, 150, 200, 600-700, e > 800 m, respectivamente.

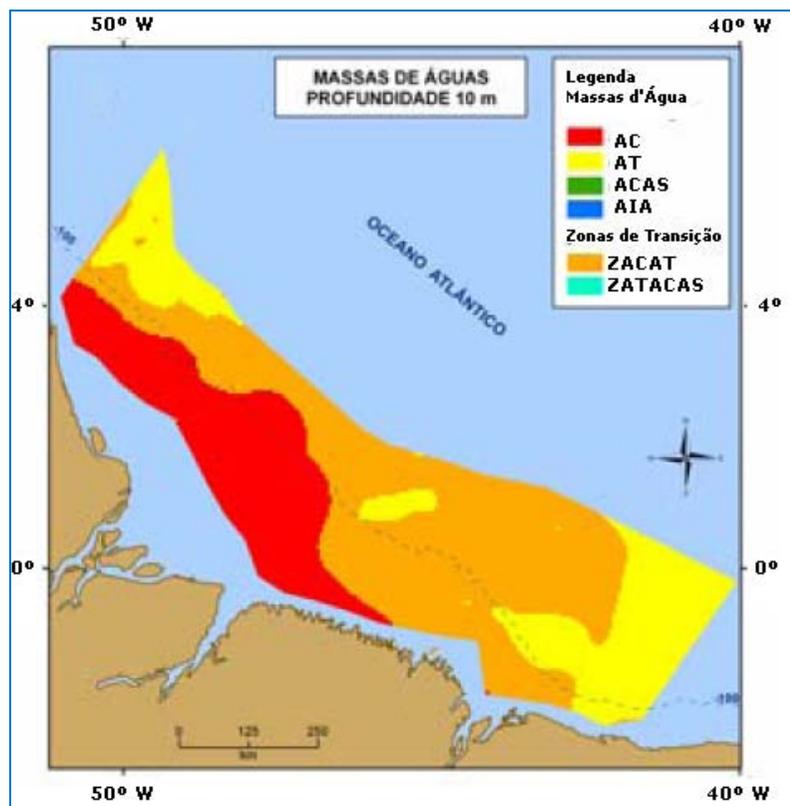


Figura II.5.1.3-20 - Massas d'água na Plataforma Continental Amazônica (PCA) na profundidade de 10 m.

Fonte: Molleri *et al.* (2006).

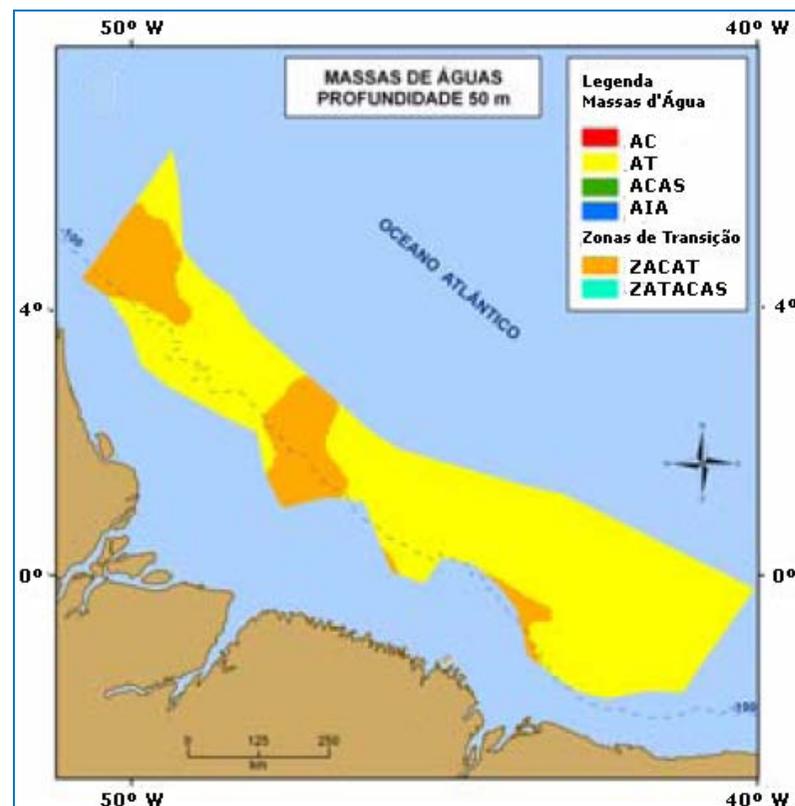


Figura II.5.1.3-21 - Massas d'água na (PCA) na profundidade de 50 m.

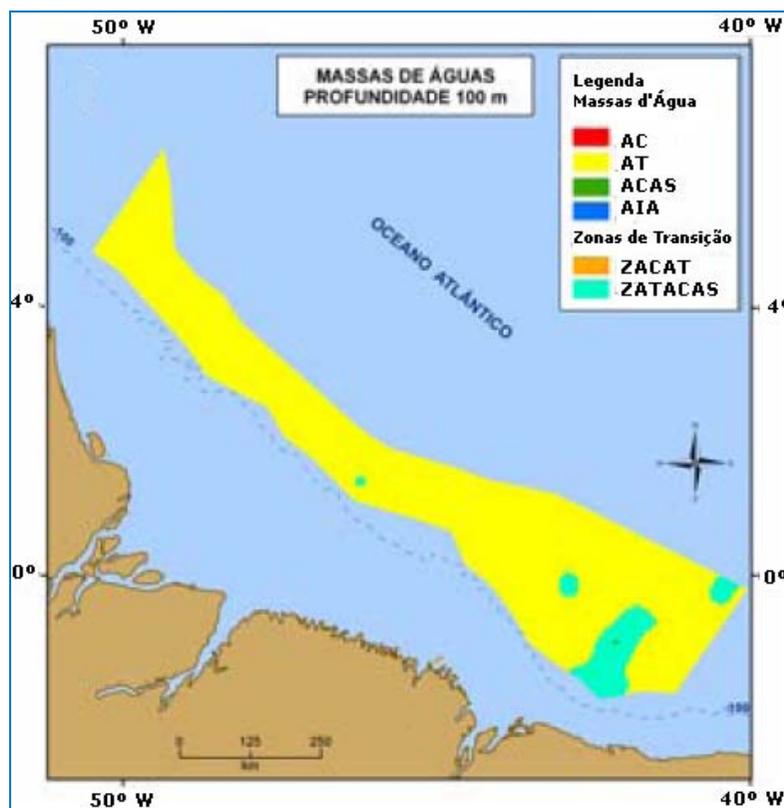


Figura II.5.1.3-22 - Massas d'água na (PCA) na profundidade de 100 m.

Fonte: Molleri et al. (2006).

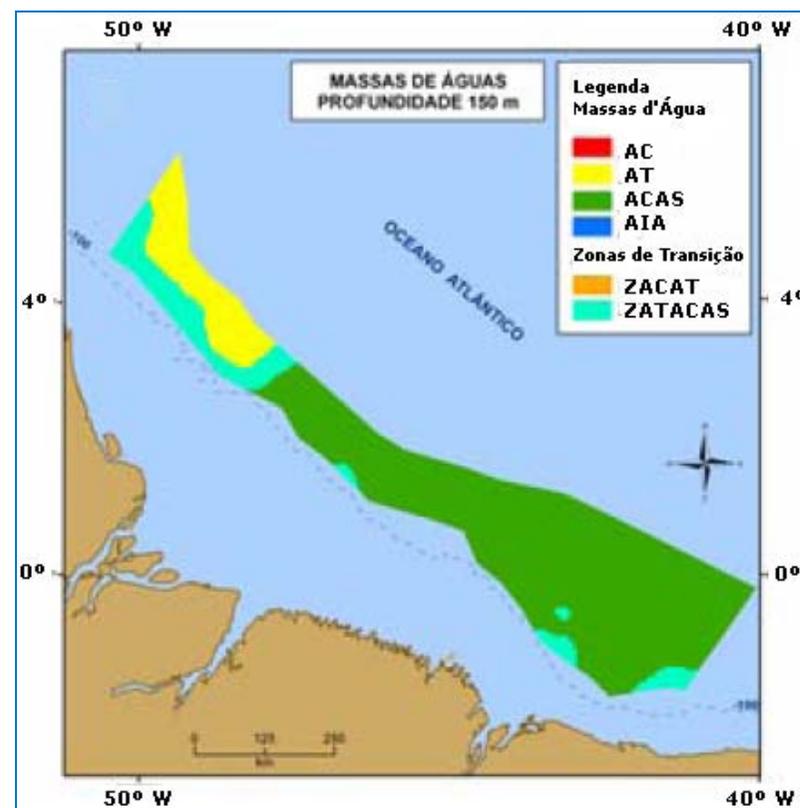


Figura II.5.1.3-23 - Massas d'água na (PCA) na profundidade de 150 m.

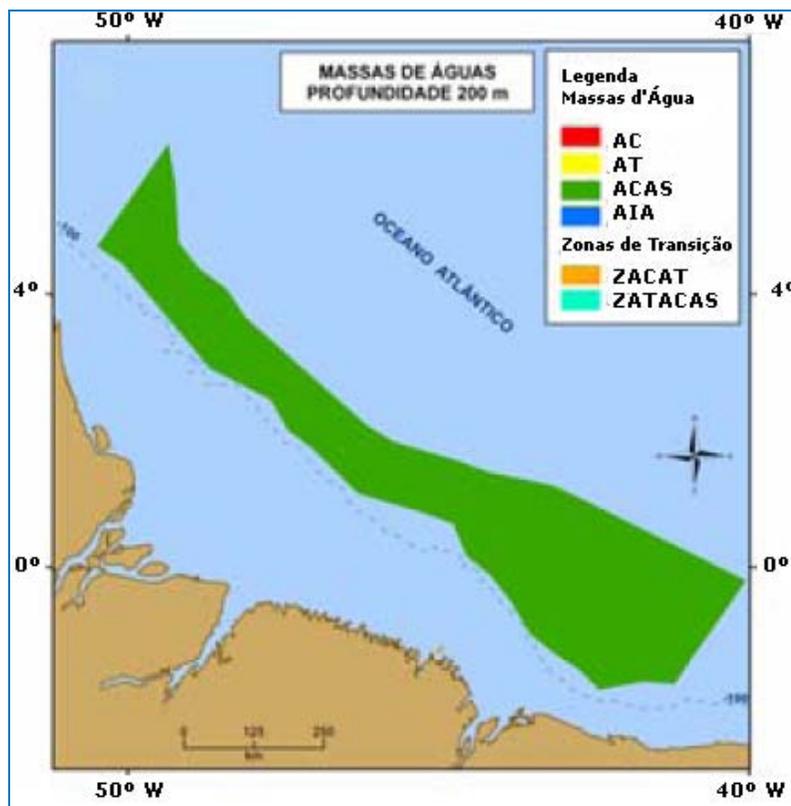


Figura II.5.1.3-24 - Massas d'água na (PCA) na profundidade de 200 m.

Fonte: Molleri *et al.* (2006).

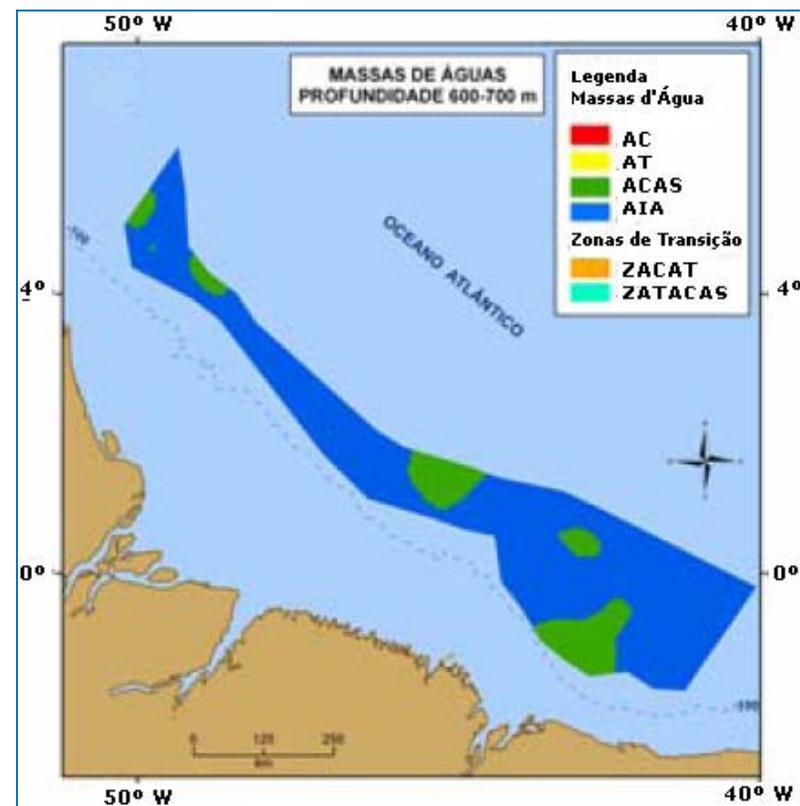


Figura II.5.1.3-25 - Massas d'água na (PCA) em profundidades 600-700 m.

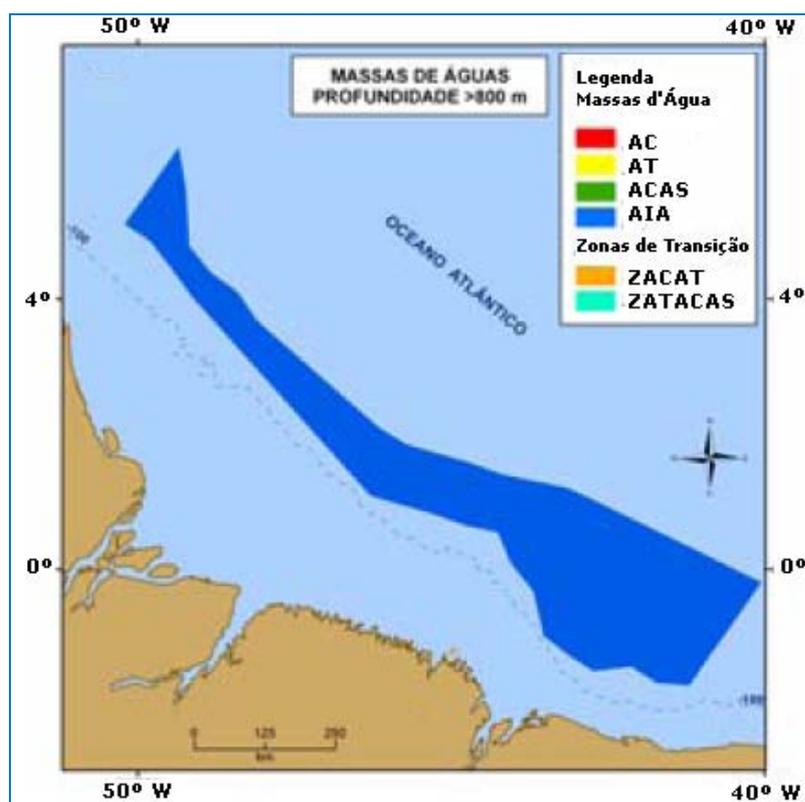


Figura II.5.1.3-26 - Massas d'água na (PCA) em profundidades maiores que 800 m.

Fonte: Molleri *et al.* (2006).

A **Quadro II.5.1.3-2** apresenta um resumo das massas d'água encontradas por Molleri *et al.* (2006) nas diferentes profundidades. A denominação "ZATACAS" refere-se à zona de transição entre AT e a ACAS.

Quadro II.5.1.3-2 - Massas d'água encontradas por Molleri *et al.* (2006) nos níveis de 10, 50, 100, 150, 200, 600-700 e >800 m na PCA.

| Profundidade (m) | Massa d'água |
|------------------|-------------------|
| 10 | AC, AT, AM |
| 50 | AC, AM |
| 100 | AT, ZATACAS |
| 150 | AT, ZATACAS, ACAS |
| 200 | ACAS |
| 600 - 700 | ACAS, AIA |
| >800 | AIA |

Na **Figura II.5.1.3-27** é apresentado o diagrama TS espalhado, elaborado com os dados do NODC e os limites termo-halinos (**Quadro II.5.1.3-3**) definidos por Silva *et al.* (2005). Observa-se que todas as massas d'águas caracterizadas por Silva *et al.* (2005) (ver **Quadro II.5.1.3-3**) estão presentes nos dados analisados.

No diagrama TS (**Figura II.5.1.3-27**), os pares de temperatura e salinidade representados por pontos pretos, não estão associados a nenhuma das massas d'água apresentadas no gabarito utilizado por Silva *et al.* (2005).

Quadro II.5.1.3-3 - Critério de identificação das massas d'água na Plataforma Continental Amazônica, segundo Silva *et al.* (2005).

| Massas d'água | Temperatura (°C) | Salinidade |
|---------------|------------------|---------------|
| AC | 26,00 – 28,87 | < 34 |
| AT | > 18 | > 36 |
| ACAS | 5,95 – 18,35 | 34,55 – 36,40 |
| AIA | 4,92 – 5,90 | 34,48 – 34,78 |

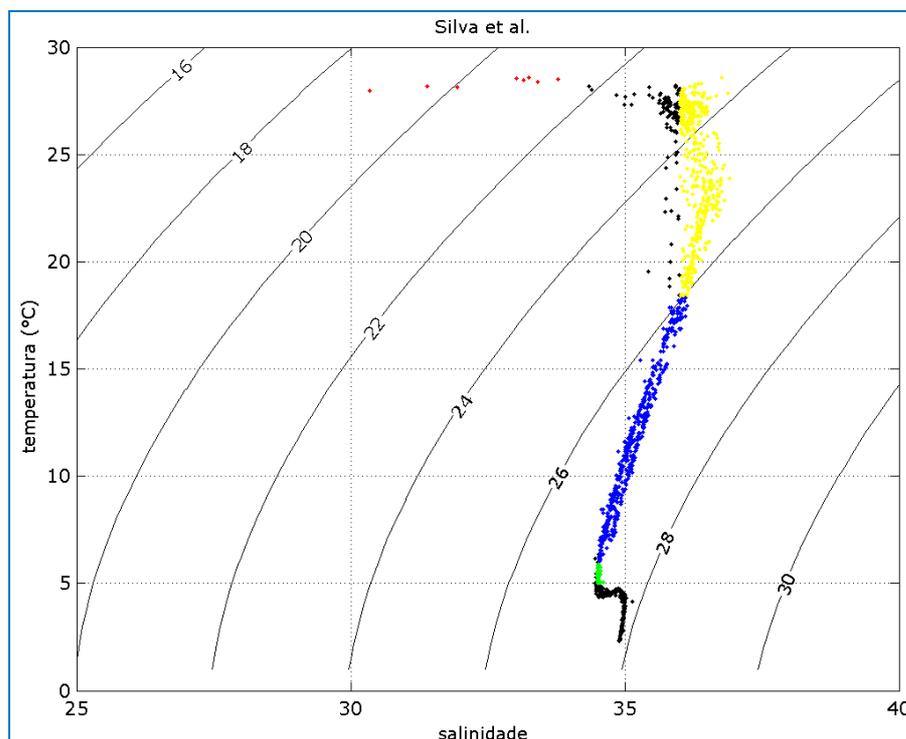


Figura II.5.1.3-27 - Diagrama TS espalhado para a região da Bacia Pará-Maranhão elaborado com os dados do NODC.

As cores representam as massas d'água: vermelho (AC), amarelo (AT), azul (ACAS), verde (AIA). A cor preta representa zonas de transição entre as massas d'água, ou massas d'água não descritas

por Silva *et al.* (2005).

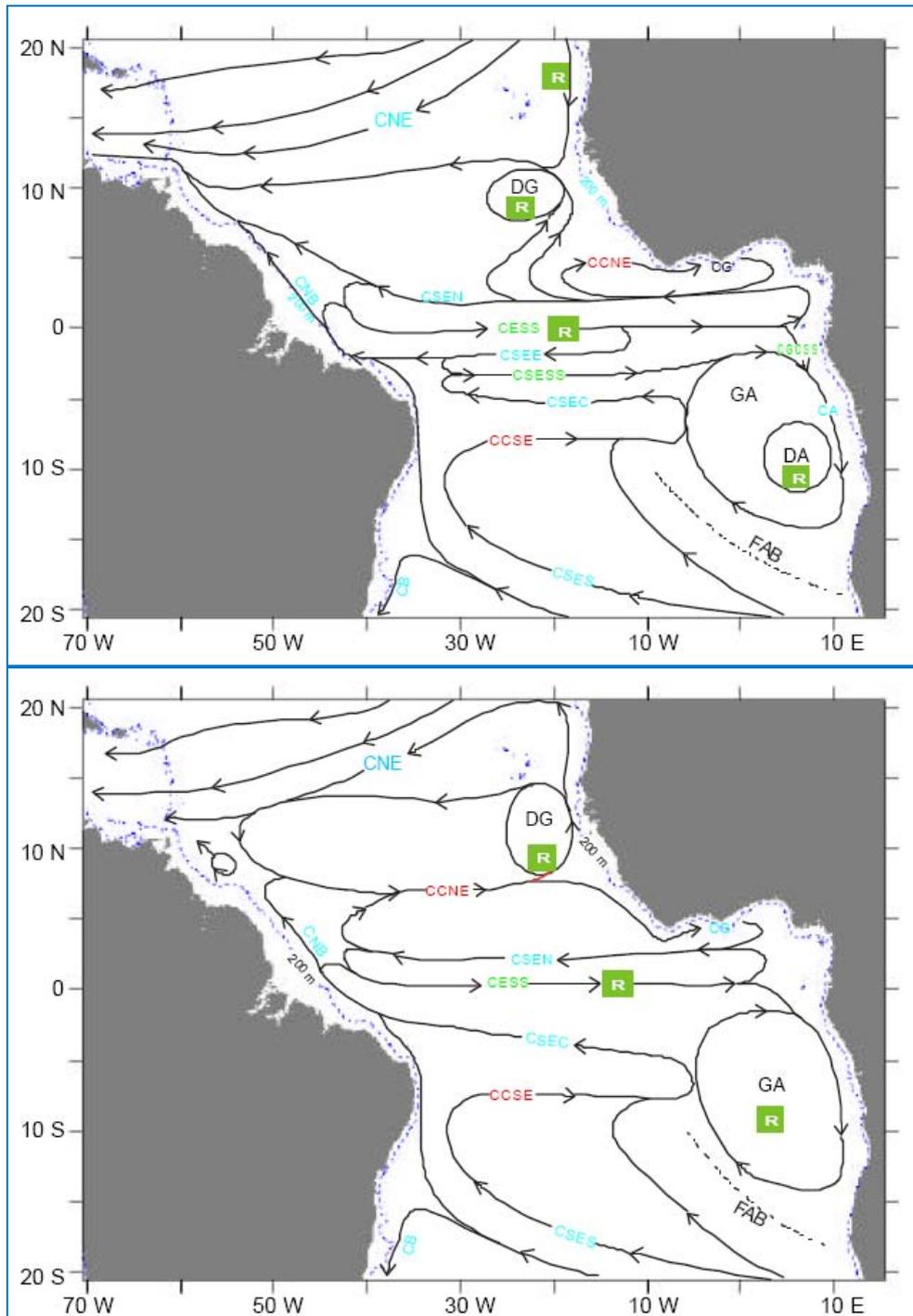
II.5.1.3.3 - Regime de Correntes

A região onde está localizado o Bloco BM-PAMA-8 sofre a influência direta da Corrente Norte do Brasil (CNB). Essa corrente é formada a partir da bifurcação do ramo sul da Corrente Sul-Equatorial (CSE), que flui para oeste em direção ao cabo de São Roque (ponto mais a leste da América do Sul), dividindo-se em duas partes: a Corrente Norte do Brasil (CNB) e a Corrente do Brasil (CB) (STRAMMA, 1991). Na **Figura II.5.1.3-28** e na **Figura II.5.1.3-29** são apresentados mapas das principais correntes no Atlântico Tropical em superfície, entre 0 e 100 metros, e em subsuperfície (100 e 500 metros).

Na **Figura II.5.1.3-28** e na **Figura II.5.1.3-29**, CA é a Corrente de Angola; CB - Corrente do Brasil; CCNE - Contra-corrente Norte Equatorial; CCSE - Contra-corrente Sul Equatorial; CESS - Corrente Equatorial Subsuperficial; CG - Corrente da Guiné; CGCSS - Corrente do Gabão-Congo Subsuperficial; CNB - Corrente Norte do Brasil; CNE - Corrente Norte Equatorial; CSEC - Corrente Sul Equatorial ramo central; CSEE - Corrente Sul Equatorial ramo equatorial; CSEN - Corrente Sul Equatorial ramo norte; CSES - Corrente Sul Equatorial ramo sul; CSESS - Corrente Sul Equatorial Subsuperficial; DA - Domo de Angola; DG - Domo da Guiné; FAB - Frente Angola-Benguela; GA - Giro da Guiné; R - Áreas de provável ressurgência.

A circulação superficial do Atlântico Tropical, segundo Pickard & Emery (1982), é formada pelas seguintes correntes:

- Corrente Norte Equatorial (CNE), fluindo para Oeste, a norte de 10° N, com velocidade média de 10-15 cm/s;
- Contra-corrente Norte Equatorial (CCNE), fluindo para Leste entre 8° N e 3° N;
- Corrente Sul Equatorial (CSE) fluindo para Oeste a sul de 3° N.



A

B

Figura II.5.1.3-28 - Distribuição esquemática das principais correntes na camada superficial (entre 0 e 100 m) no Atlântico Tropical: (a) situação típica de outono/HS (março, abril e maio) e (b) situação típica de primavera/HS (setembro, outubro e novembro). Os pontos azuis representam a batimétrica de 200 m.

Fonte: Menezes, 1999.

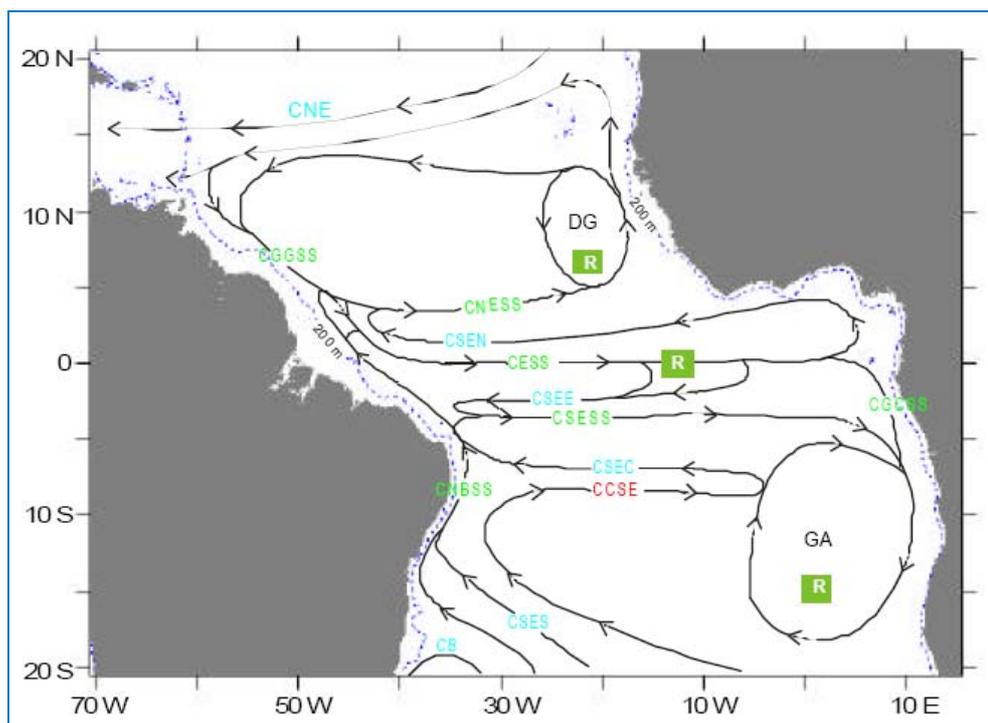


Figura II.5.1.3-29 - Distribuição esquemática das principais correntes na camada subsuperficial (entre 100 e 500 m) no Atlântico Tropical. Os pontos azuis representam a batimétrica de 200 m.

Fonte: Menezes, 1999.

Atualmente, a CSE é subdividida em 3 ramos distintos, por apresentar uma estrutura muito complexa: um mais ao norte (Corrente Sul Equatorial ramo Norte - CSEN), um central (Corrente Sul Equatorial ramo Central - CESC) e um ao sul (Corrente Sul Equatorial ramo Sul - CSES) (STRAMMA & SCHOTT, 1999). Esses ramos são separados, respectivamente, pela Corrente Sul Equatorial Subsuperficial (CSESS) que flui entre 3° S e 5° S e pela Contra-corrente Sul Equatorial (CCSE) que flui para Leste entre 7° S e 9° S (MENEZES, 1999).

Próximo à costa do Brasil, a sul de 10° S, a CSES ramifica-se formando a Corrente do Brasil (CB) que flui para Sul com velocidade média de 10-15 cm/s e a Corrente Norte do Brasil (CNB), que cruza o Equador e acelera, alcançando em 2° N a velocidade de 81 cm/s. Nesta localidade, 2° N, a CNB une-se à CSEN, fluindo próximo à costa na direção Norte (STRAMMA, 1991). Devido à complexa estrutura da CSE no lado Oeste da bacia atlântica, a localização exata da origem da CNB não é bem definida (SILVEIRA *et al.*, 1994 *apud* MENEZES, 1999).

Na segunda metade do ano, tipicamente de julho a setembro, a CNB divide-se próximo a 8° N e 50° W: uma parte continua para Norte próximo à costa, primeiro como Corrente das Guianas (CGG) e depois como Corrente do Caribe (CC); outra parte inflete-se para fora da costa, alimentando a CCNE (SILVEIRA *et al.*, 1994 *apud* MENEZES, 1999). Este processo é conhecido como a retroflexão da CNB. Segundo Johns *et al.* (1990 *apud* MENEZES, 1999), a separação da CNB é um processo fortemente estratificado, isto é, a camada superficial da CNB alimenta a CCNE; a camada da termoclina alimenta a Corrente Equatorial Subsuperficial (CESS); e a camada sub-termoclina, que é permanentemente retro-refletida entre 3° N e 5° N, alimenta a Corrente Norte Equatorial Subsuperficial (CNESS).

A CESS flui para Leste, entre 50 e 300 metros de profundidade, a uma velocidade média de cerca de 100-110 cm/s.

Na região da Bacia do Pará-Maranhão, além da influência da circulação da CNB descrita anteriormente, ainda existe a influência direta da maré, sendo este talvez, o principal mecanismo forçante para as correntes na plataforma continental. Essa região possui uma das maiores amplitudes de maré da costa brasileira e de todo o globo. Tal fato é causado pela distribuição da variação da maré global no oceano, que naquela região possui grandes oscilações, em contraste com regiões influenciadas por pontos anfidrômicos, como a costa Sudeste e Sul do Brasil. A **Figura II.5.1.3-30** mostra a distribuição das amplitudes e fases da principal componente de maré (M_2) no Oceano Atlântico. Pode-se notar um núcleo de grandes amplitudes na região da Bacia do Pará-Maranhão e adjacências.

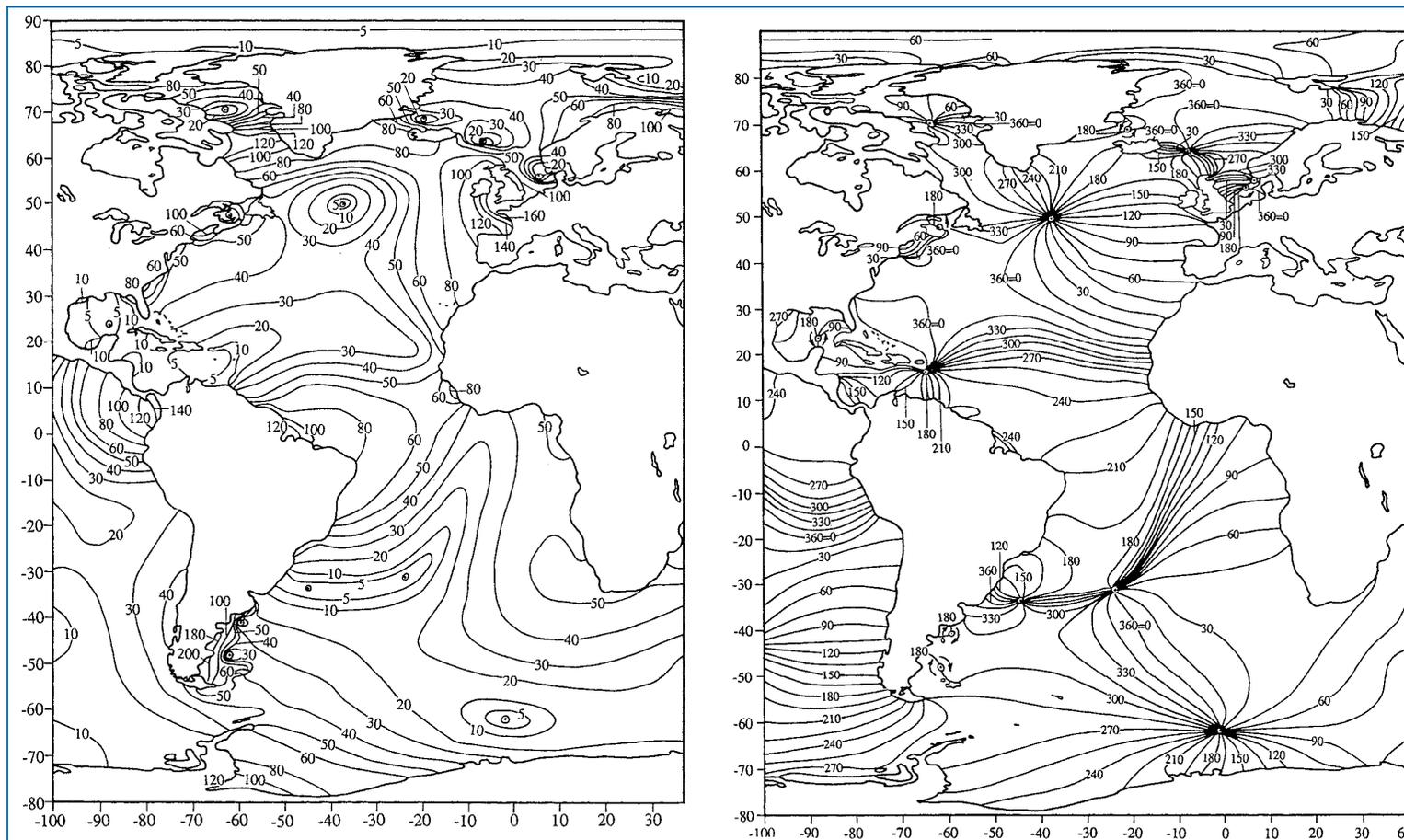


Figura II.5.1.3-30 - Distribuição das amplitudes (cm) e fases (graus) da componente M2 da maré no Oceano Atlântico.
Fonte: Schwerdski (1979).

Para auxiliar a caracterização das correntes em superfície na região da Bacia do Pará-Maranhão, foram utilizados dados obtidos por bóias de deriva no *Interpolated Global Lagrangian Drifter Database* gerenciado pelo *Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratory* (AOML, 2006). Os dados analisados foram obtidos de diversas bóias no período de 1990 a 2005. Na **Figura II.5.1.3-31** são apresentados os vetores de corrente para o período chuvoso e seco na região da Bacia do Pará-Maranhão.

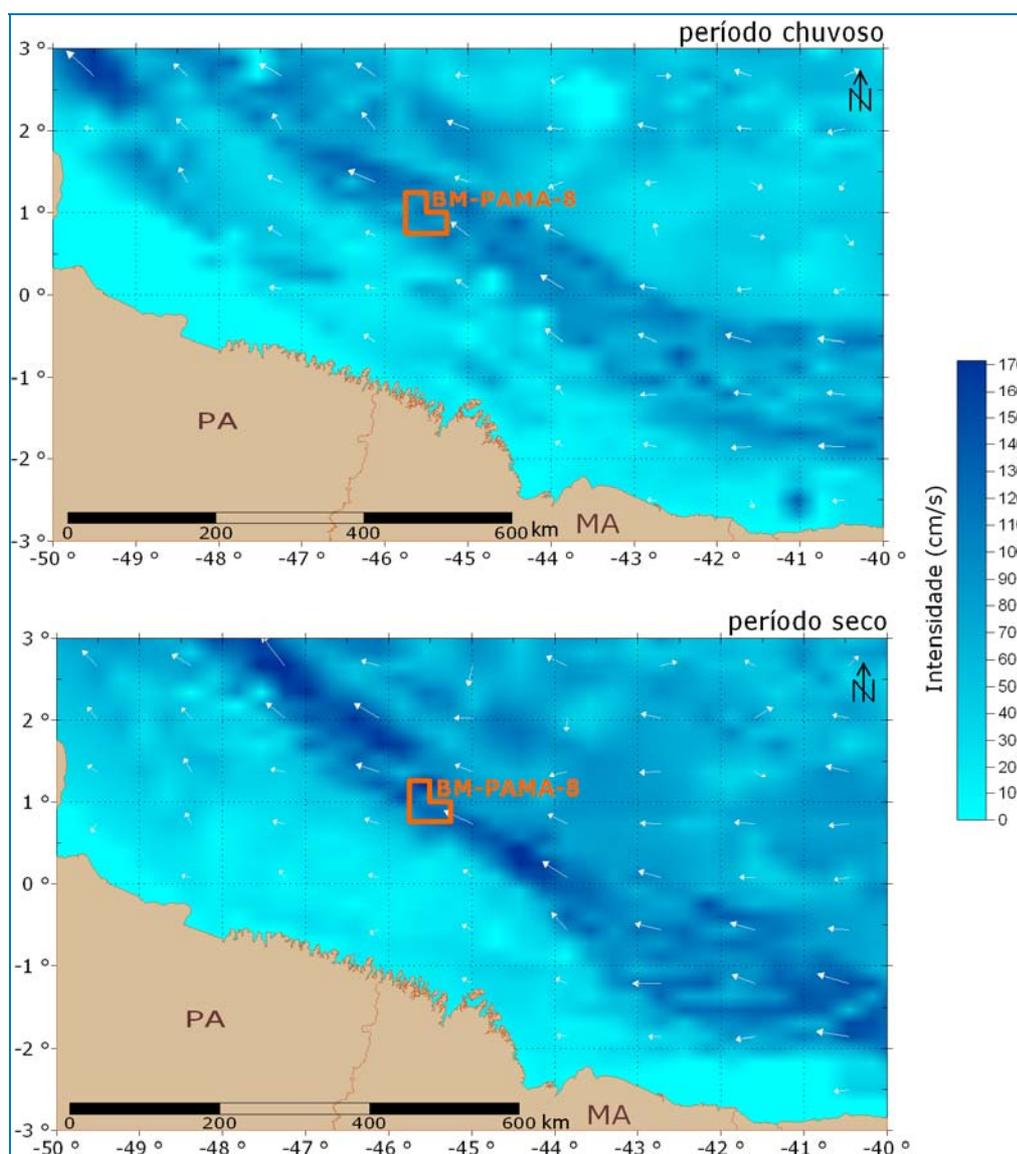


Figura II.5.1.3-31 - Vetores de correntes para o período chuvoso e seco.

Fonte: AOML/NOAA.

É possível observar, baseado nos dados analisados, que as correntes superficiais na região do Bloco BM-PAMA-8 apresentam sentido preferencial noroeste, indicando, de acordo com a bibliografia, a presença da CNB. No entanto, no período chuvoso, a intensidade da CNB apresenta-se menor quando comparada com o período seco. Foram obtidos valores de intensidade máxima em torno de 1,50 m/s na CNB, para o período chuvoso, e 1,70 m/s, para o período seco.

Outra maneira de se obter informações a respeito das correntes superficiais é através da estimativa realizada por meio de dados altimétricos obtidos por sensores a bordo de satélites.

Os satélites altimétricos, por se basearem em dados de RADAR (micro-ondas), fornecem dados que independem de cobertura de nuvens. Atualmente, está estabelecido que, através de mapeamentos que utilizam dados de pelo menos dois satélites altimétricos intercalibrados, é possível resolver as feições de meso-escala (VIANNA & MENEZES, 2005).

A VM Oceânica realizou, durante o ano de 2002, um estudo da dinâmica das águas superficiais do Atlântico Ocidental Equatorial entre 1995 e 2000, através de dados altimétricos multi-satélite. A base de dados utilizada foi produzida através de um mapeamento objetivo espaço-temporal dos dados colineares dos satélites Topex/Poseidon e ERS2 em grade de 27 x 27 km. A resolução temporal foi de 10 dias. As respectivas grades de circulação foram computadas usando a Topografia Dinâmica de Boyer & Levitus (1997) e uma fórmula geostrófica não linear válida sobre o Equador. Para maiores detalhes deve ser consultado Vianna & Menezes (2003). Este estudo permitiu que se descobrisse que a área oceânica do entorno do Bloco BM-PAMA-8 é dominada, de fato, por variabilidades intra-sazonais, principalmente devido a ondas de 50-60 dias, apresentando picos de corrente de mais de 1,5 m/s. Este resultado não inclui correntes de maré nem as correntes de *Ekman* que, na região, têm o sentido de Noroeste, e são limitadas aos primeiros 40 m.

Os campos de circulação geostrófica supracitados reproduzem ocorrências de grandes picos de corrente na faixa intra-sazonal, cujas amplitudes variam de ano para ano. Trata-se de uma área oceânica onde ocorre uma bifurcação transitória da CNB devida a reflexão de ondas de *Rossby* pelo talude continental, conforme processo descrito por Holvorcem & Vianna (1992). Este trabalho

demonstra que as amplitudes de corrente esperadas na região que engloba o Bloco BM-PAMA-8, devido a ocorrência destas ondas de 50 dias, são as maiores de todo o Atlântico Tropical Ocidental.

Tudo indica que, considerando os resultados das referências supracitadas, estes fenômenos ocorrem desde a superfície até, pelo menos, 500 m de profundidade, gerando correntes intensas e picos de intensidade de corrente da ordem de 1,5 m/s.

Para ilustrar as escalas de turbulência de meso-escala que dominam a região, é apresentada na **Figura II.5.1.3-32** e na **Figura II.5.1.3-33** a série temporal para a componente E-W e N-S da corrente, respectivamente, na posição de 1,5° N e 45,5° W. Pode-se observar a variação interanual das intensidades, bem como a dominância de oscilações intra-sazonais.

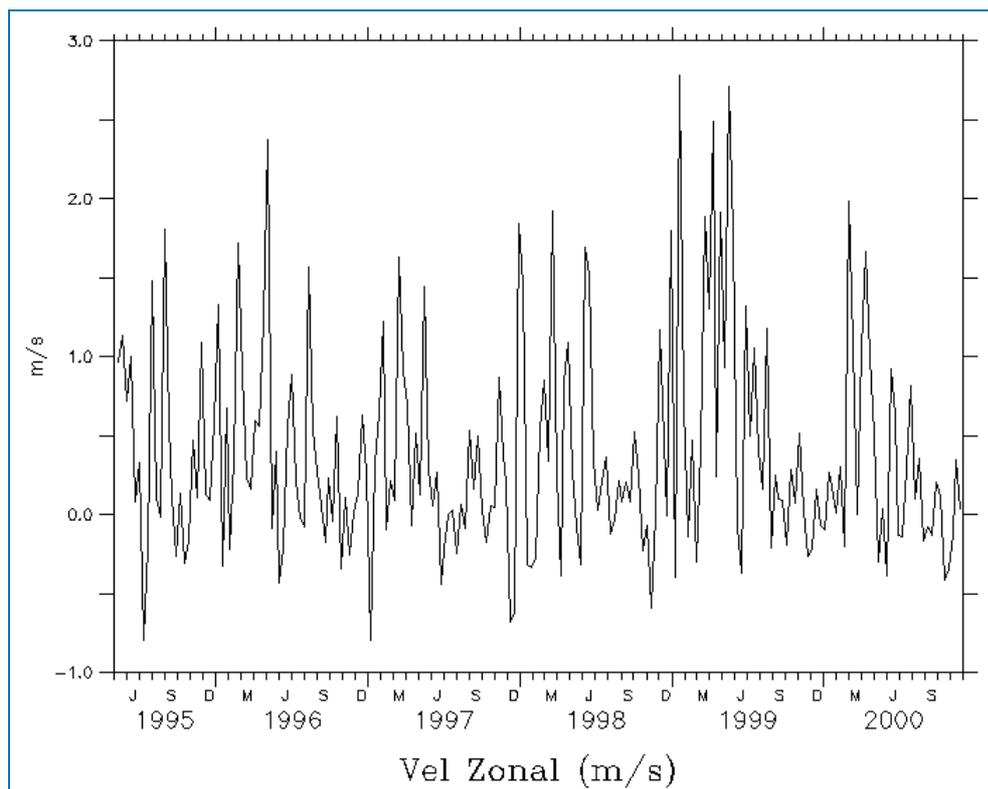


Figura II.5.1.3-32 - Série temporal de corrente zonal (u) superficial em região próxima ao Bloco BM-PAMA-8, obtida por dados altimétricos multi-satélites.

Fonte: TOPEX/POSEIDON.

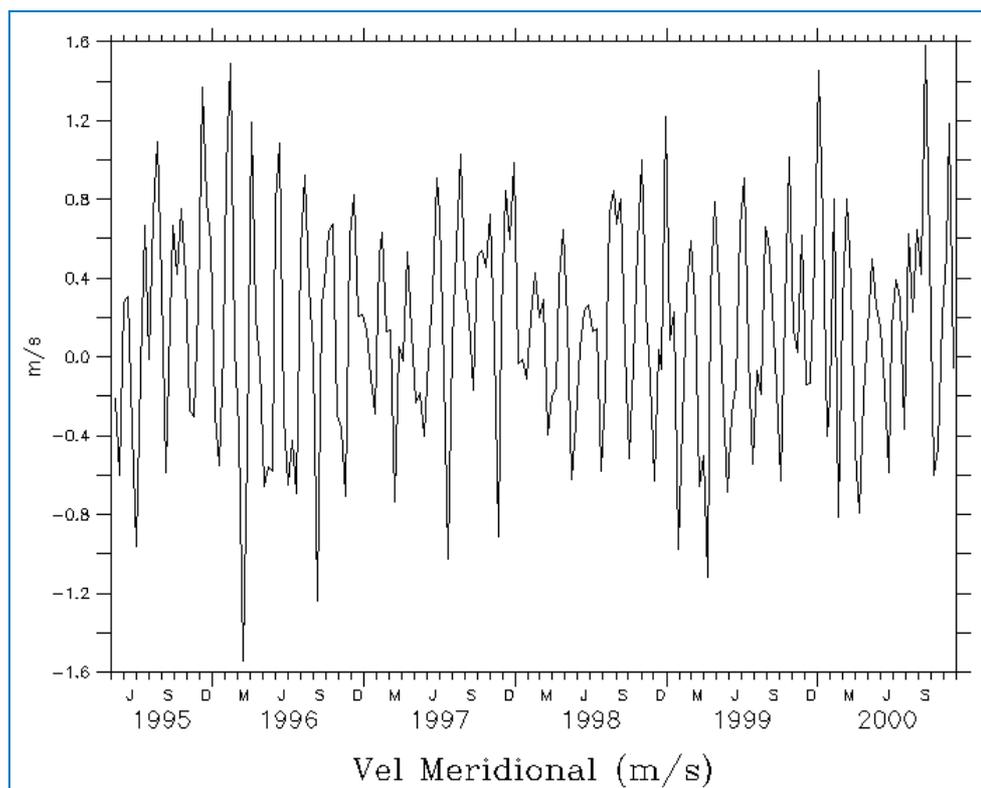


Figura II.5.1.3-33 - Série temporal de corrente meridional (v) superficial em região próxima ao Bloco BM-PAMA-8, obtida por dados altimétricos multi-satélites.

Fonte: TOPEX/POSEIDON.

O estudo dos cinco anos de dados permitiu constatar que a circulação oceânica na área ocupada pelo Bloco BM-PAMA-8 não apresenta uma sazonalidade importante e, como é de se esperar, a corrente zonal média, abaixo da Camada de Mistura e acima da termoclina, é dirigida para leste. Como a componente meridional média se dirige para o norte, conclui-se que a região oceânica próxima ao Bloco BM-PAMA-8 se insere na retroflexão da CNB que alimenta a Corrente Equatorial Subsuperficial, cujo núcleo se situa em torno de 150 m de profundidade na região.

Na **Figura II.5.1.3-34**, é apresentado um mapeamento regional da componente meridional da velocidade de corrente, que apresenta a assinatura típica de uma onda de Rossby, vinda de leste, e espalhada pelo talude continental, obtida pelos mapeamentos altimétricos. A data escolhida foi a de 15/11/2000, época em que se deu o cruzeiro descrito em Stramma *et al.* (2005).

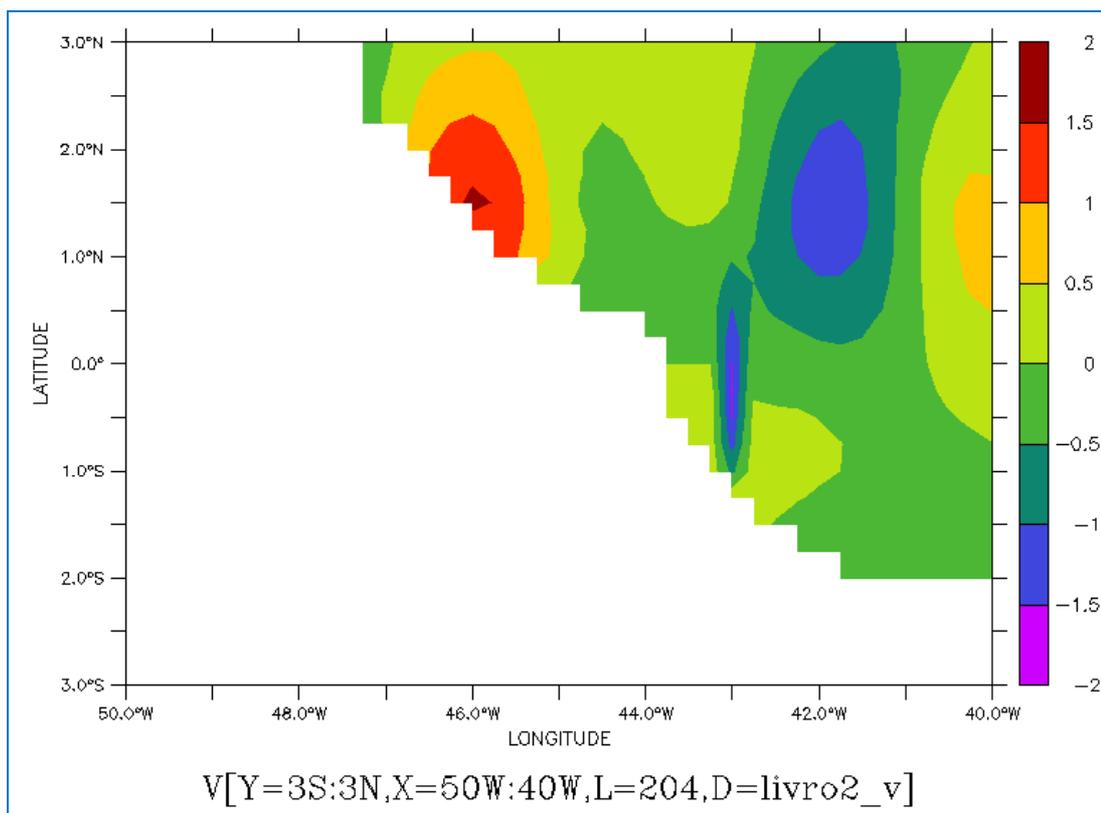


Figura II.5.1.3-34 - Mapeamento da componente meridional das correntes na região oceânica da costa Norte do Brasil, baseada em dados altimétricos e topografia dinâmica média obtida dos dados Boyer-Levitus.

É possível admitir que as “bolhas” alternadas de intensidade entre 1°N e 2°N são assinaturas de ondas de Rossby refletidas pelo talude continental (VIANNA & MENEZES, 2003).

A **Figura II.5.1.3-35** indica a zona de confluência entre a corrente que vem de Noroeste com a que vem de Sudeste (CNB), causando variabilidades mais rápidas, devido ao acoplamento entre ondas de *Kelvin* de talude ou “costeiras”, que convergem e se propagam para Leste como ondas de *Kelvin* equatoriais.

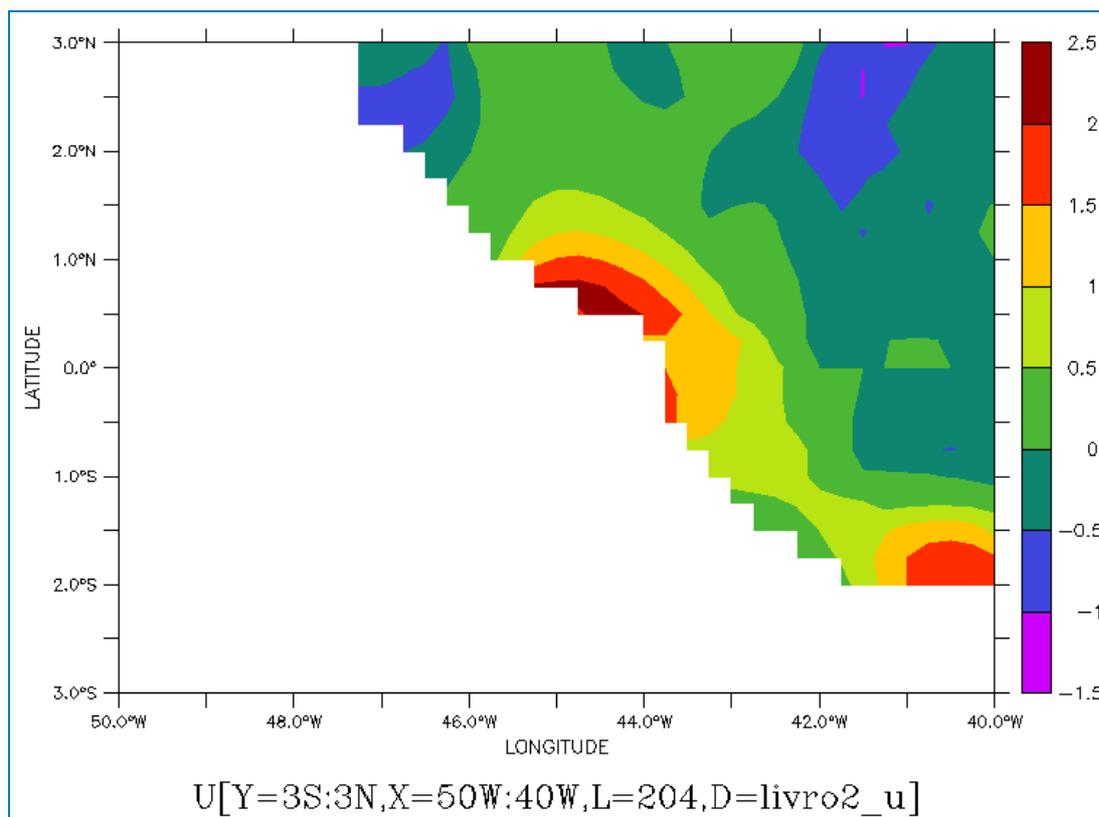


Figura II.5.1.3-35 - Mapeamento da componente zonal das correntes na região oceânica da costa norte do Brasil, baseada em dados altimétricos e topografia dinâmica média obtida dos dados Boyer-Levitus.

Para a análise das correntes em profundidade foram utilizados dados registrados em áreas adjacentes, obtidos do Programa *Current Meter Data do World Ocean Circulation Experiment (WOCE)*, da *Oregon State University*. A base de dados do WOCE contempla um arranjo de linhas de fundeios na bacia norte do Brasil em lâminas d'água compatíveis com a do Bloco BM-PAMA-8. O arranjo ACM7 (**Figura II.5.1.3-36**) contém os fundeios K327 e K339, localizados na latitude 0,087° N e longitude 44,390° W e o fundeio K359 localizado na latitude de 0,243° N longitude 44,310° W. Destaca-se que estes fundeios foram efetuados em épocas diferentes.

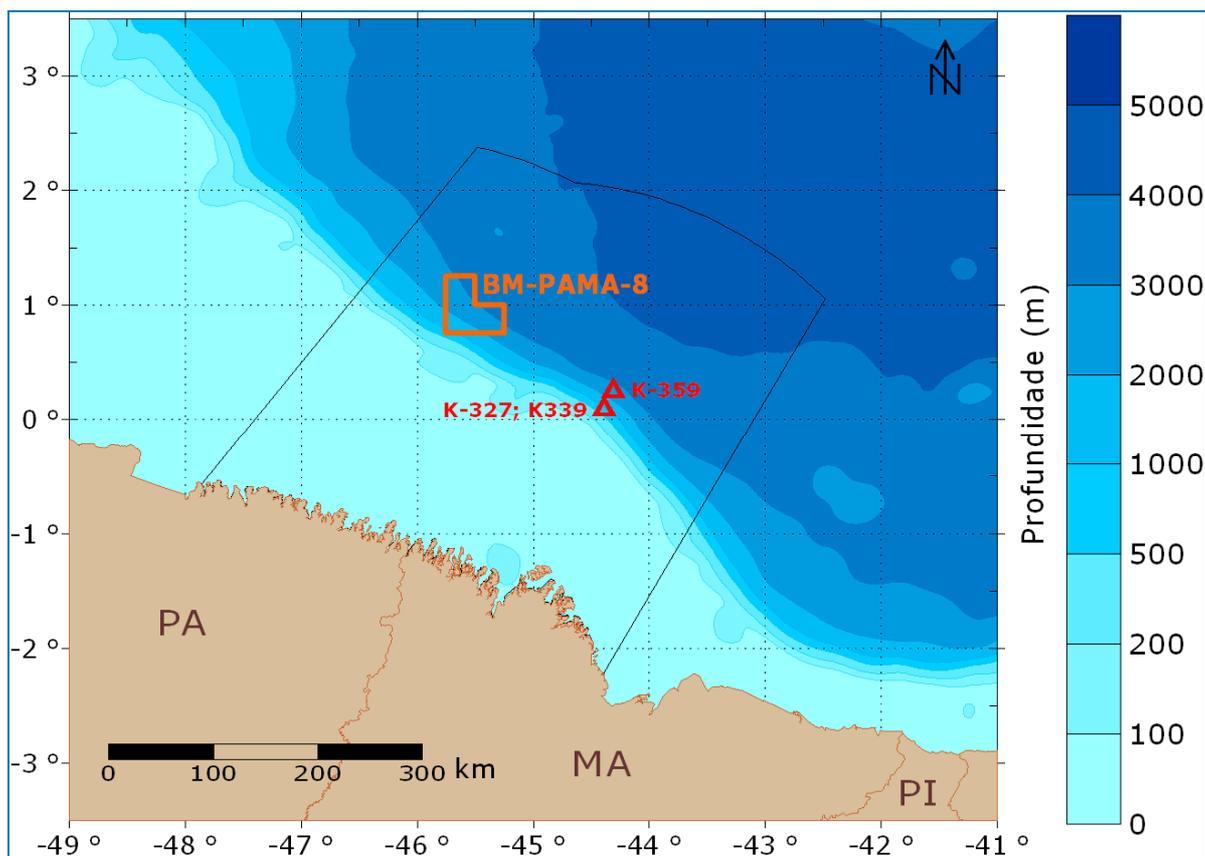


Figura II.5.1.3-36 - Localização dos fundeios do WOCE utilizados para análise das correntes em profundidade.

As rosas de correntes elaboradas com os dados do fundeiro K327, medidos entre o período de setembro de 1989 a outubro de 1990, são apresentadas na **Figura II.5.1.3-37**.

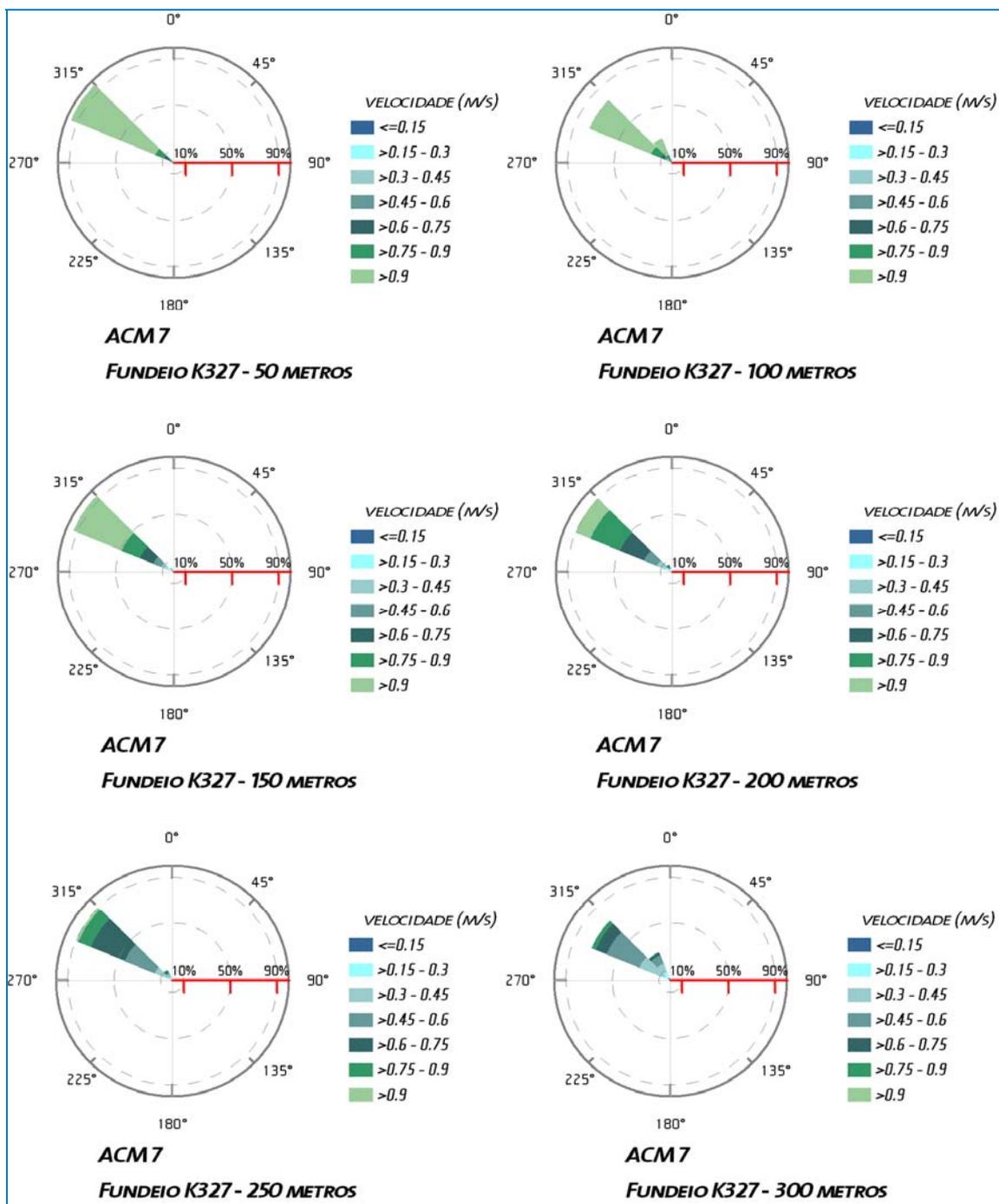


Figura II.5.1.3-37 - Rosas de correntes elaboradas com os dados do fundeio K327 do WOCE (setembro de 1989 a outubro de 1990).

É possível notar que em todas as profundidades analisadas, o sentido preferencial da corrente se dá no sentido Noroeste. No entanto, com o aumento da

profundidade ocorre um decréscimo nos valores de velocidade, apresentando uma velocidade máxima de 1,95 m/s em 50 metros e mínima de 0,05 m/s a 300 metros.

A **Tabela II.5.1.3-4** apresenta os valores de ocorrência conjunta entre direção e intensidade das correntes a 50 m de profundidade no fundeio K327.

Tabela II.5.1.3-4 - Ocorrência conjunta entre direção e intensidade das correntes a 50 m de profundidade.

| Direção -> | | N | NE | E | SE | S | SW | W | NW | Total | Freq (%) |
|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|----------|
| Intensidade (m/s) | | | | | | | | | | | |
| 0,00 | 0,30 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 3 | 7 | 0,89 |
| 0,30 | 0,60 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 29 | 39 | 4,95 |
| 0,60 | 0,90 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 113 | 114 | 14,47 |
| 0,90 | 1,20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 232 | 232 | 29,44 |
| 1,20 | 1,50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 298 | 298 | 37,82 |
| > 1,5 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 98 | 98 | 12,44 |
| Total | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 773 | 788 | |
| Freq (%) | | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,90 | 98,10 | | |

Verifica-se que mais de 98% das correntes têm fluxo para Noroeste e que aproximadamente 38% têm velocidades entre 1,20 e 1,50 m/s. Correntes com velocidades maiores que 1,5 m/s representaram 12,44% das ocorrências.

As rosas de correntes que correspondem aos dados do fundeio K339 são apresentadas na **Figura II.5.1.3-38**. Estes dados foram coletados no período de outubro de 1990 a setembro de 1991.

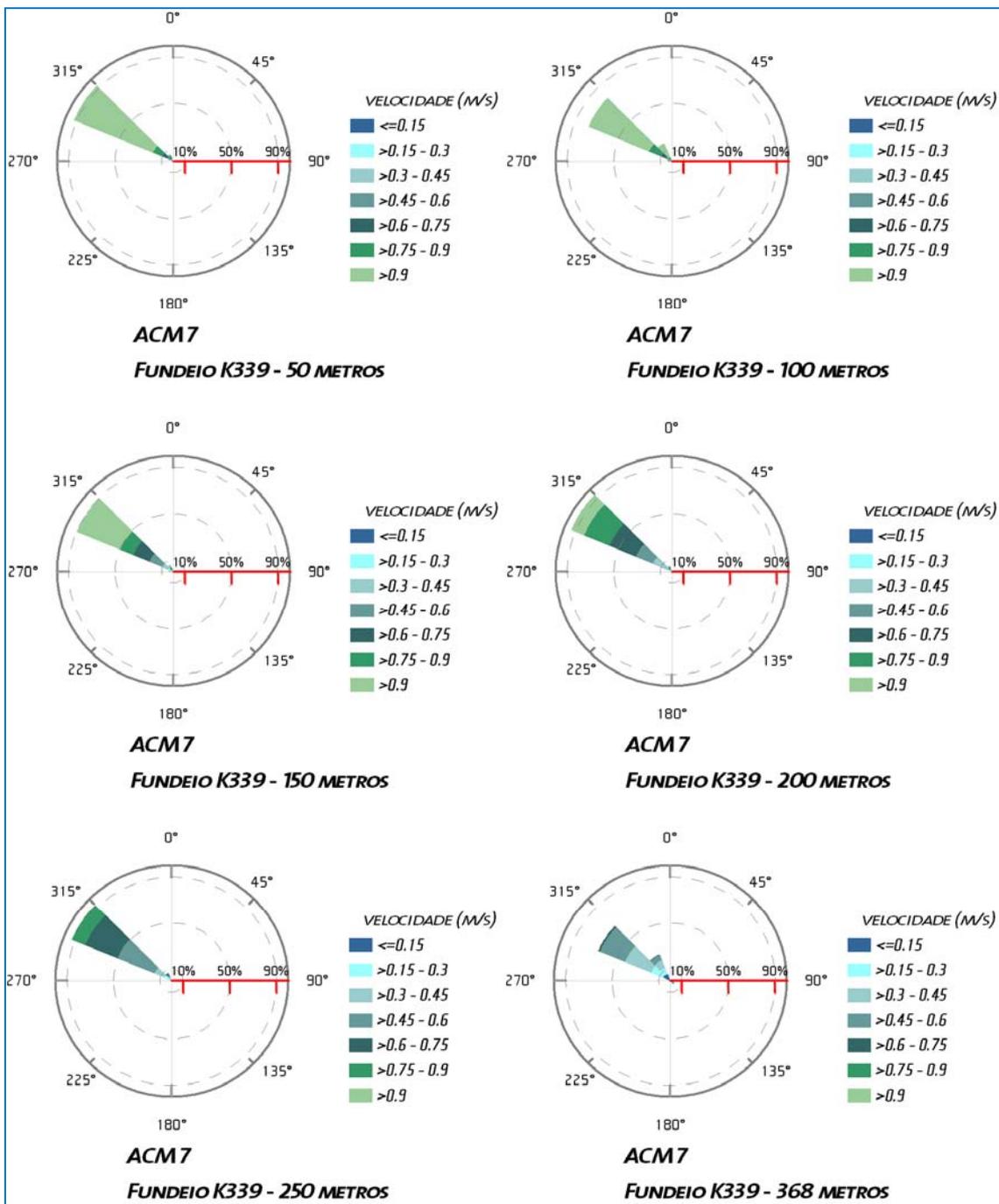


Figura II.5.1.3-38 - Rosas de correntes elaboradas com os dados do fundeio K339 do WOCE (outubro de 1990 a setembro de 1991).

É observado que os resultados obtidos no fundeio K339 o comportamento é similar ao verificado no fundeio K327, apresentando valores de velocidade máxima de 2 m/s em 50 metros e velocidade mínima de 0,003 m/s em 368 metros.

Na **Figura II.5.1.3-39** e na **Figura II.5.1.3-40**, são apresentadas as rosas de corrente para o fundeio K359. Este fundeio foi realizado no período de outubro de 1992 a fevereiro de 1993.

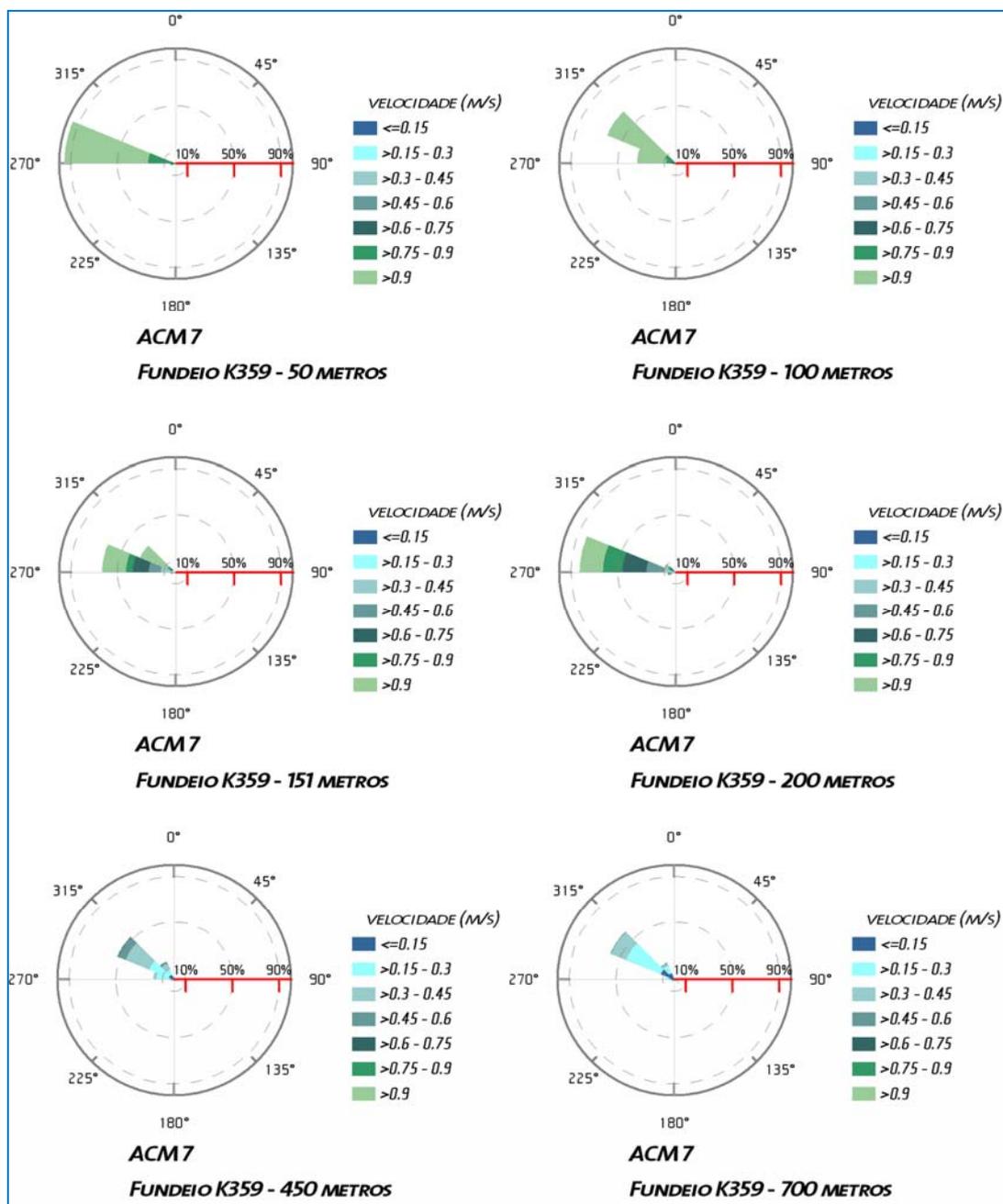


Figura II.5.1.3-39 - Rosas de correntes elaboradas com os dados do fundeio K359 do WOCE até a profundidade de 700 metros (outubro de 1992 a fevereiro de 1993).

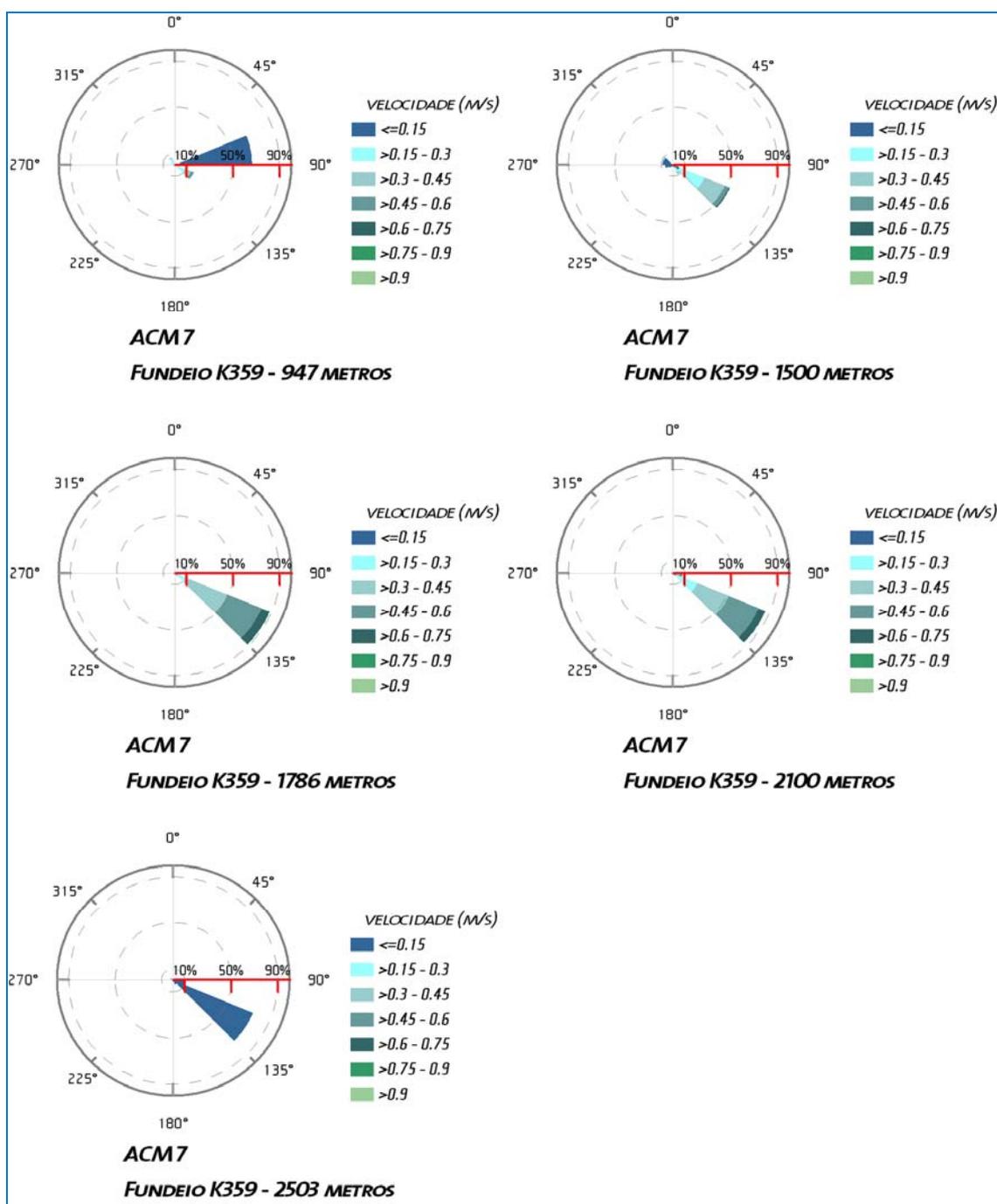


Figura II.5.1.3-40 - Rosas de correntes elaboradas com os dados do fundeio K359 do WOCE de 947 a 2503 metros (outubro de 1992 a fevereiro de 1993).

Até a profundidade de 700 metros, o fundeio K359, sugere um eixo principal para o fluxo como sendo O/NO. Porém, a intensidade das correntes, de maneira semelhante aos dois fundeios anteriormente apresentados, diminui com a

profundidade. A velocidade máxima de 1,46 m/s ocorre a 50 metros enquanto que a 700 metros, a máxima obtida é de 0,5 m/s. A 947 metros de profundidade, o sentido da corrente muda para Leste com máxima de 0,6 m/s.

Nas demais profundidades apresentadas, o sentido da corrente é para Sudeste. Dentre destas, a que atinge maior velocidade (0,75 m/s) está na profundidade de 1.786 metros.

Foi observado nos três fundeios que a intensidade das correntes em grandes profundidades é, em sua grande maioria, inferior a 0,1 m/s.

Observa-se que até a profundidade de 700 m o rumo predominante das correntes é Noroeste, com a intensidade diminuindo gradativamente com o incremento da profundidade, representando o fluxo da Corrente Norte do Brasil e o fluxo associado à Água Central do Atlântico Sul.

Nas rosas referentes as profundidades de 1.500, 1.786, 2.100 e 2.503 metros, observa-se que as correntes mais freqüentes apresentam rumo sudeste, referentes ao fluxo associado a Água Profunda do Atlântico Norte.

Os resultados obtidos pelos fundeios do WOCE mostram que, entre 50 e 150 m, a corrente apresenta direção NW em quase todo o período e velocidades em torno de 100 cm/s (1 m/s). A partir dessa profundidade, a corrente torna-se mais fraca e a direção mais variável. A partir do nível de 850 m, a corrente passa a apresentar um fluxo bi-direcional, variando ora para NW, ora para SE. Nas profundidades maiores do que 1.500 m, a corrente volta a ser unidirecional, sendo o fluxo principal de quadrante S, com velocidades em torno de 50 cm/s (0,5 m/s), a 1.500 m, diminuindo até menos de 5 cm/s (0,05 m/s) em 3.000 m. A **Figura II.5.1.3-41** apresenta uma síntese do comportamento das correntes na região estudada.

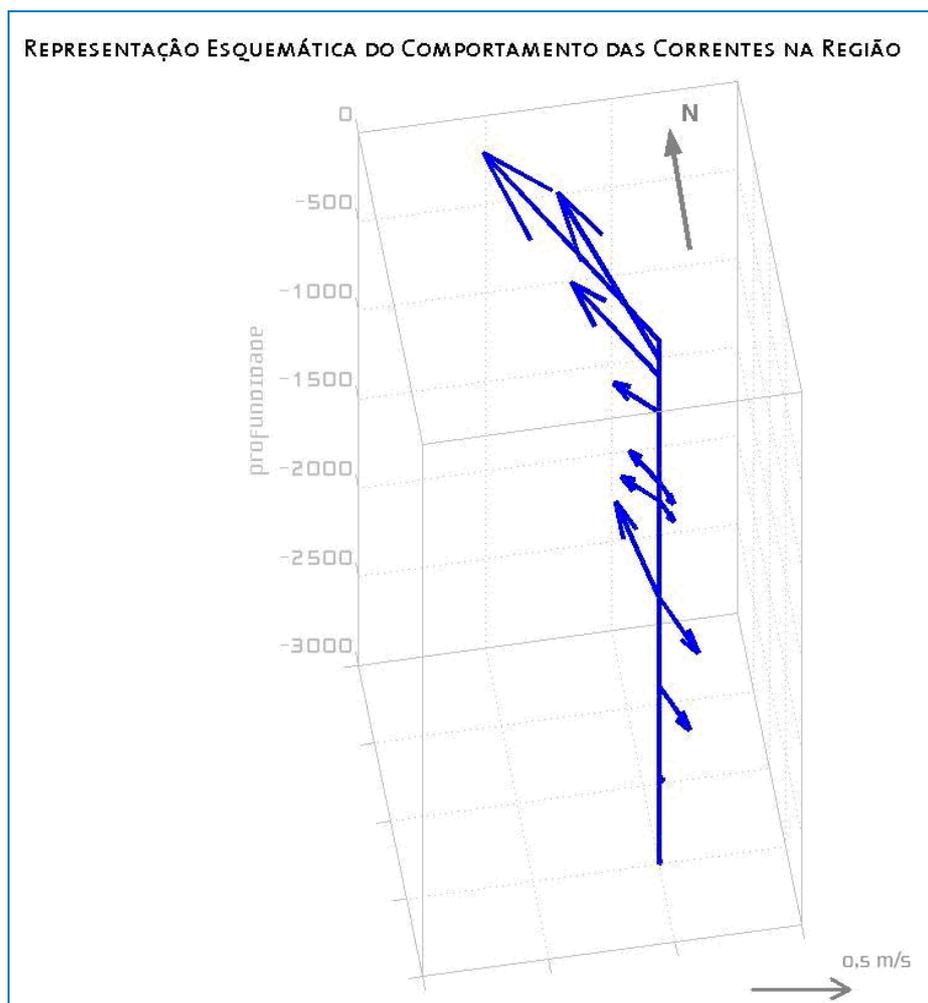


Figura II.5.1.3-41 - Ilustração do comportamento das correntes conforme resultados obtidos pelos fundeios do WOCE.

Para melhor visualização da estrutura vertical de correntes, na **Figura II.5.1.3-42** observa-se um exemplo de seção vertical de correntes na costa Norte do Brasil, em seção transversal à costa na longitude de 45°W.

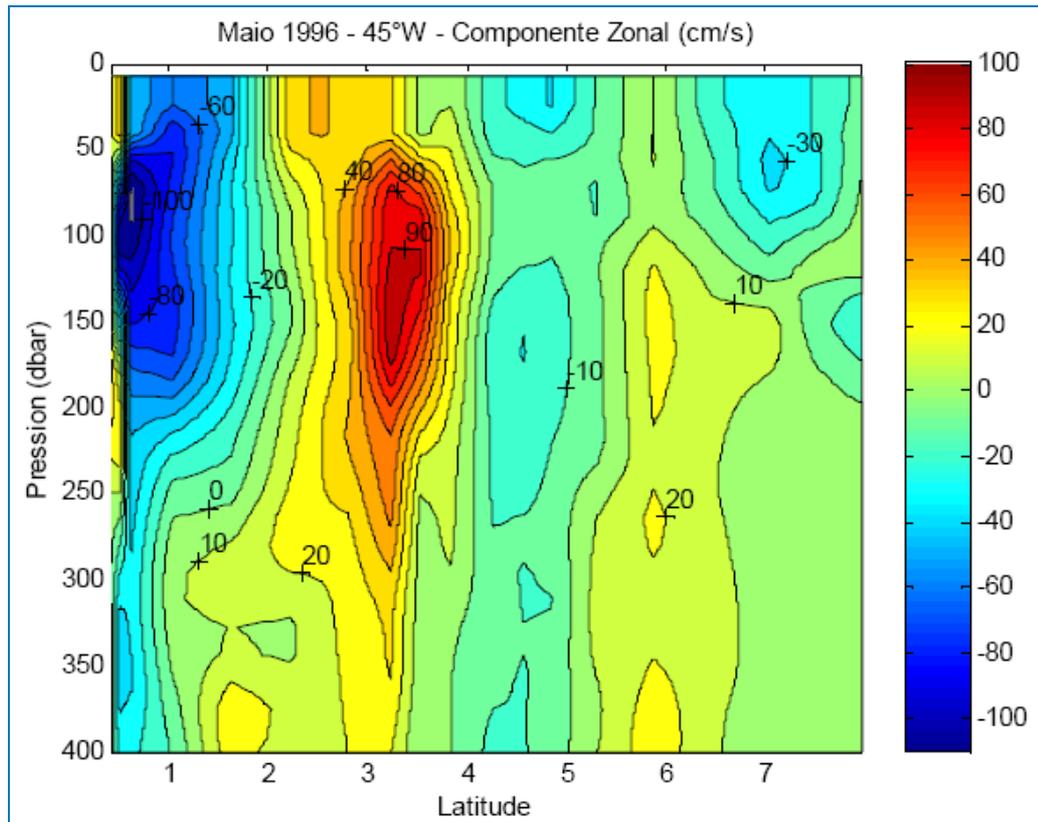


Figura II.5.1.3-42 - Seção vertical da componente zonal das correntes na longitude de 45° W. Fonte: Silva (2006).

Entre 50 e 100 m de profundidade na latitude de 1° N, observa-se o núcleo da CNB, e na latitude de 3° N entre 100 e 150 m, se faz presente o núcleo da CESS.

Comparando os diversos levantamentos de correntes apresentados, verifica-se que a CNB apresenta velocidades médias próximas a 0,5 m/s. Correntes de até 2 m/s foram verificadas nos fundeios do WOCE e de 1,70 m/s pelos derivadores da AOML/NOAA, enquanto que os dados altimétricos indicaram correntes mais intensas, com máximos de até 2,75 m/s. Estas informações são apresentadas de forma resumida no **Tabela II.5.1.3-5**.

Tabela II.5.1.3-5 - Resumo das velocidades máximas obtidas pelas diferentes fontes apresentadas no presente estudo.

| Fonte | WOCE | AOML/NOAA | TOPEX/POSEIDON |
|-----------------------|------|-----------|----------------|
| Velocidade Máx. (m/s) | 2,00 | 1,70 | 2,75 |

II.5.1.3.4 - Regime de Ondas

Existem duas principais zonas de geração de ondas no Atlântico Sul, associadas a dois centros de circulação de ventos: i) o cinturão extra tropical de tempestades de médias e altas latitudes; e ii) o cinturão dos ventos alísios. Este último, localizado entre 10°N e 10°S, é caracterizado por uma alta frequência de ventos com velocidade mínima de 5 m/s, que é a mínima necessária para gerar ondas capazes de produzir alguma mudança geomórfica significativa ao longo da linha de costa (DAVIES, 1972).

Devido a sua localização geográfica, a região do Bloco BM-PAMA-8 encontra-se sob influência das ondas geradas no cinturão dos ventos alísios. A região de estudo está localizada na região equatorial da plataforma continental externa norte-nordeste da América do Sul, cuja direção forma um ângulo menor que 45° com o Equador. Por esta razão, ela é influenciada por ondas de longas pistas do quadrante Norte e Leste.

Ondas originadas por ventos de tempestade de inverno no Atlântico Norte, que ocorrem principalmente entre dezembro e março, também podem atingir a área do Bloco, na forma de *swell*. Segundo Inocentinni *et. al.* (2001), na região Norte do Brasil, do Amapá até aproximadamente Natal, no Rio Grande do Norte, as ondas incidentes são formadas pelos alísios, e apresentam altura próxima de 1-1,5 m em mar aberto. Eventualmente, chegam ondas com período de 15-20 s provenientes das tempestades formadas no extremo norte do Atlântico.

Coincidentemente, durante o inverno do Hemisfério Norte a Convergência Intertropical cruza a área em direção ao sul, expondo a região às ondas geradas pelos alísios de Nordeste.

Neste estudo, são utilizados alguns termos como vaga, marulho, mar local e *swell*. Entende-se por vaga aquelas ondas que ainda estão sob influência do vento que as gerou; em outras palavras, ainda estão em suas áreas de geração. Os marulhos ou *swell* são aquelas ondas que não mais estão sob a influência do vento que as gerou, ou seja, estão fora da área de geração. Um mar local é caracterizado por ondas que estão sendo geradas pelo vento local (vagas).

A caracterização dos estados de mar é feita em função de três parâmetros: altura significativa (H_s), direção e período de pico (T_p). A altura significativa, tomada no domínio do tempo, é uma medida estatística obtida separando-se o registro de onda em três partes iguais e calculando-se uma média da parte do registro onde estejam as maiores alturas. Corresponde, aproximadamente, à altura relatada através de observação visual por um observador experiente. A direção é o rumo seguido pela onda significativa e, a frequência de pico é a frequência na qual a maior quantidade de energia da ondulação está concentrada.

Para a caracterização da agitação marítima na Bacia do Pará-Maranhão foram utilizados os dados do Projeto ERA-40, do BNDO, resultados de modelagem numérica oriundos do Projeto ATLASUL, além de dados altimétricos dos satélites JASON e GFO.

O Projeto *ECMWF Re-Analysis 40* (ERA-40) do ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) tem como objetivo produzir análises globais diárias do estado atmosférico, terrestre e dos oceanos, em um período compreendido entre 1957 e 2001, com resolução espacial de $2,5^\circ$. Esta abordagem considera os dados de altura significativa (H_s), direção (D_m) e período médios (T_m), para todo o período (1957 a 2001), no ponto de grade mais próximo ao BM-PAMA-8. Os dados do ERA-40 podem ser obtidos na sua página disponível na *internet* (ERA-40, 2009). A localização do ponto de grade do ERA-40 utilizado é apresentada na **Figura II.5.1.3-43**.

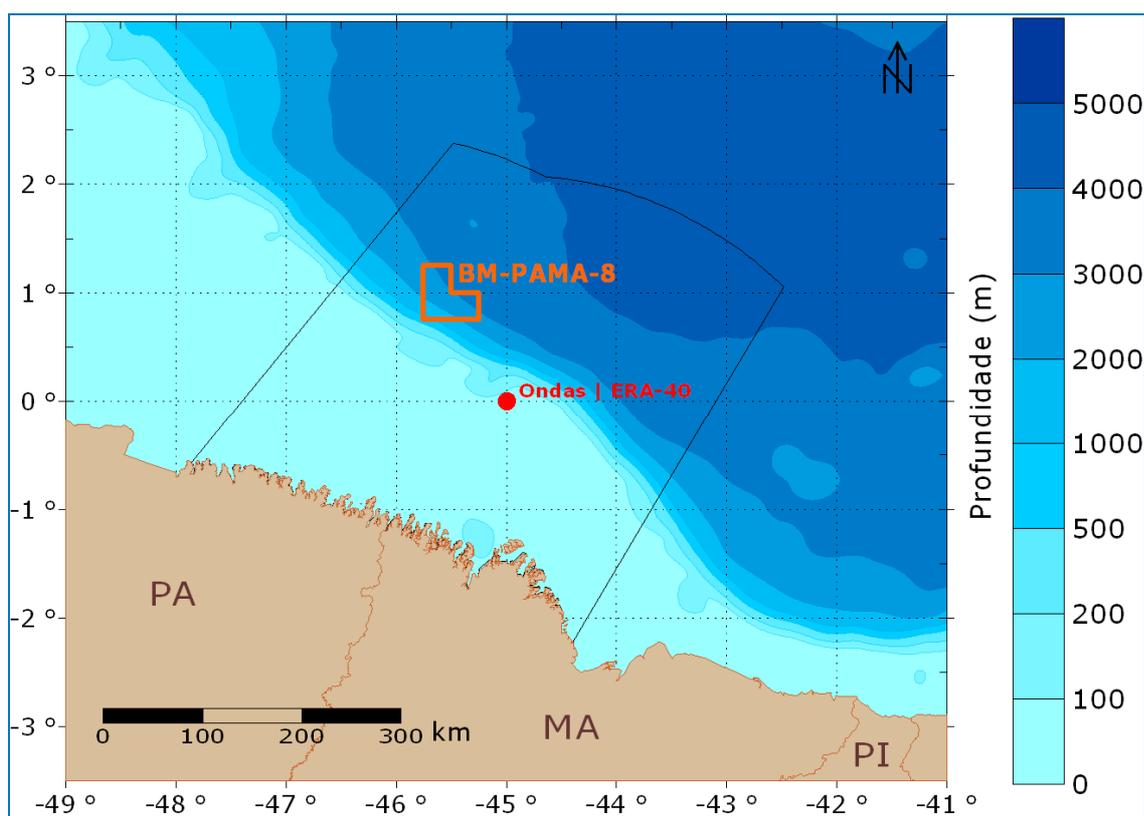


Figura II.5.1.3-43 - Localização do ponto de grade do ERA-40, de onde foram extraídos os dados utilizados para a caracterização da Bacia do Pará-Maranhão.

Na Tabela II.5.1.3-6, Tabela II.5.1.3-7 e Tabela II.5.1.3-8 são apresentadas, respectivamente, as ocorrências conjuntas entre direção e altura significativa, direção e período médio, e período médio por altura significativa, elaboradas com os dados do Projeto ERA-40. Nestas, as direções representam as seguintes faixas: N (337,5°-22,5°), NE (22,5°-67,5°), E (67,5°-112,5°), SE (112,5°-157,5°), S (157,5°-202,5°), SW (202,5°-247,5°), W (247,5°-292,5°) e NW (292,5°-337,5°).

Tabela II.5.1.3-6 – Ocorrência conjunta entre direção e altura significativa de onda.

| Direção -> | | N | NE | E | SE | S | SW | W | NW | Total | Freq (%) |
|------------|------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|-------|----------|
| Hs (m) | | | | | | | | | | | |
| 0,50 | 1,00 | 1 | 435 | 191 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 627 | 3,81 |
| 1,00 | 1,50 | 539 | 5000 | 4135 | 1 | 9 | 0 | 5 | 0 | 9689 | 58,95 |
| 1,50 | 2,00 | 865 | 2904 | 1628 | 0 | 17 | 1 | 21 | 2 | 5438 | 33,09 |
| 2,00 | 2,50 | 242 | 302 | 73 | 0 | 17 | 0 | 13 | 6 | 653 | 3,97 |
| 2,50 | 3,00 | 17 | 8 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 27 | 0,16 |
| > 3 | | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0,01 |
| Total | | 1666 | 8649 | 6028 | 1 | 43 | 1 | 40 | 8 | 16436 | |
| Freq (%) | | 10,14 | 52,62 | 36,68 | 0,01 | 0,26 | 0,01 | 0,24 | 0,05 | | |

Fonte: ERA-40.

Tabela II.5.1.3-7 - Ocorrência conjunta entre direção e período médio.

| Direção -> | | N | NE | E | SE | S | SW | W | NW | Total | Freq (%) |
|------------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|-------|----------|
| Tm (s) | | | | | | | | | | | |
| 5,00 | 6,00 | 0 | 52 | 1495 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1548 | 9,42 |
| 6,00 | 8,00 | 161 | 5899 | 4446 | 0 | 2 | 1 | 1 | 6 | 10516 | 63,98 |
| 8,00 | 10,00 | 1109 | 2571 | 57 | 0 | 6 | 0 | 10 | 2 | 3755 | 22,85 |
| 10,00 | 12,00 | 347 | 123 | 29 | 0 | 32 | 0 | 26 | 0 | 557 | 3,39 |
| 12,00 | 14,00 | 47 | 4 | 1 | 0 | 3 | 0 | 3 | 0 | 58 | 0,35 |
| > 14 | | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0,01 |
| Total | | 1666 | 8649 | 6028 | 1 | 43 | 1 | 40 | 8 | 16436 | |
| Freq (%) | | 10,14 | 52,62 | 36,68 | 0,01 | 0,26 | 0,01 | 0,24 | 0,05 | | |

Fonte: ERA-40.

Tabela II.5.1.3-8 - Ocorrência conjunta entre período médio e altura significativa.

| Tm (s) -> | | 5/6 | 6/7 | 7/8 | 8/9 | 9/10 | 10/11 | 11/12 | >12 | Total | Freq (%) |
|-----------|------|------|-------|-------|-------|------|-------|-------|------|-------|----------|
| Hs (m) | | | | | | | | | | | |
| 0,50 | 1,00 | 29 | 377 | 216 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 627 | 3,81 |
| 1,00 | 1,50 | 1354 | 3882 | 3129 | 1093 | 206 | 24 | 1 | 0 | 9689 | 58,95 |
| 1,50 | 2,00 | 165 | 1255 | 1574 | 1415 | 714 | 247 | 61 | 7 | 5438 | 33,09 |
| 2,00 | 2,50 | 0 | 12 | 71 | 156 | 159 | 126 | 89 | 40 | 653 | 3,97 |
| 2,50 | 3,00 | 0 | 0 | 0 | 1 | 6 | 4 | 5 | 11 | 27 | 0,16 |
| > 3 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 2 | 0,01 |
| Total | | 1548 | 5526 | 4990 | 2670 | 1085 | 401 | 156 | 60 | 16436 | |
| Freq (%) | | 9,42 | 33,62 | 30,36 | 16,24 | 6,60 | 2,44 | 0,95 | 0,37 | | |

Fonte: ERA-40.

Observam-se ondas predominantemente de NE (52,62%), com classes de altura e de período mais freqüentes variando de 1 a 1,5 m (58,95%) e de 6 a 8 s (63,96%), respectivamente. Esta condição de mar, quando sob influência do vento local, pode ser observada na **Figura II.5.1.3-44**.

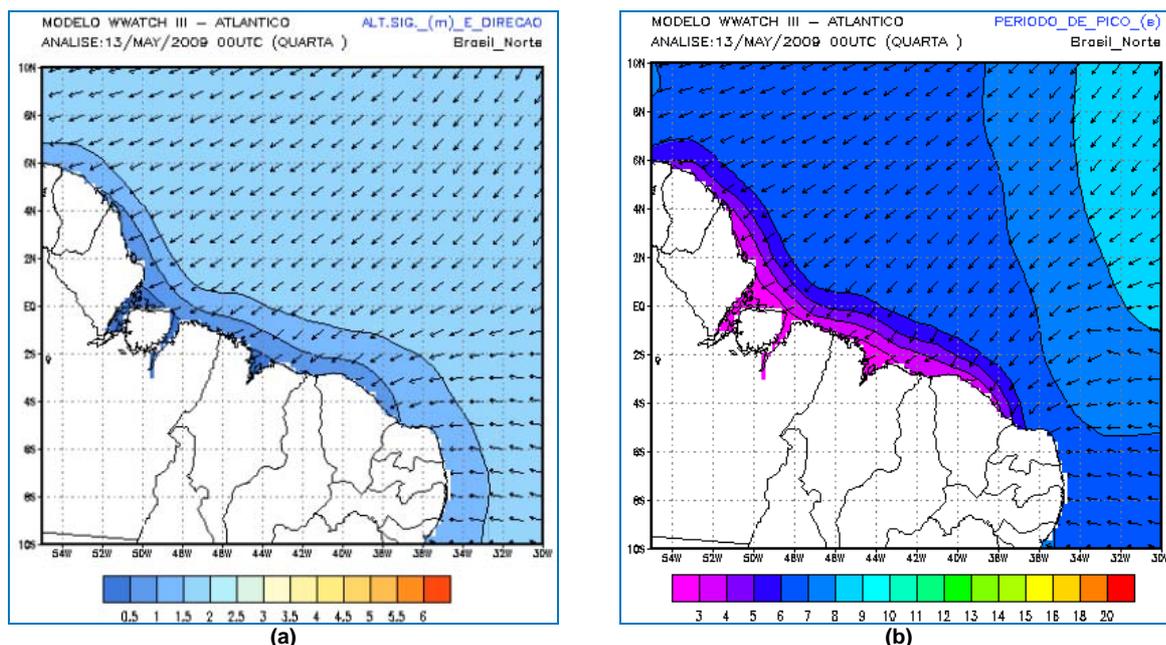


Figura II.5.1.3-44 - Altura significativa, em metros (a) e período de pico, em segundos (b) na costa Norte do Brasil.

Fonte: ATLASUL.

Os dados do Projeto ERA-40 também permitem identificar a presença de ondulações maiores, ultrapassando os 3 m de altura e 14 s de período. Essas ondas estão associadas a situações de *swell*, gerados por tempestades no Atlântico Norte.

Para avaliação da variação sazonal do regime de ondas, na **Tabela II.5.1.3-9** é apresentada a variação mensal de altura significativa e período médio (T_m), na região da Bacia do Pará-Maranhão, com os dados do Projeto ERA-40.

Tabela II.5.1.3-9 – Estatística mensal das ondas. Em vermelho, estão marcados os maiores valores para cada parâmetro analisado.

| Mês | Altura (Hs) (m) | | Período (T_m) (s) | |
|-----------|-----------------|--------|-----------------------|--------|
| | Média | Máxima | Média | Máxima |
| Janeiro | 1,64 | 2,95 | 8,50 | 13,45 |
| Fevereiro | 1,63 | 2,92 | 8,24 | 13,53 |
| Março | 1,55 | 2,69 | 8,14 | 13,28 |
| Abril | 1,39 | 2,32 | 7,76 | 12,14 |
| Maio | 1,25 | 2,16 | 7,22 | 11,34 |
| Junho | 1,19 | 2,12 | 6,68 | 8,80 |
| Julho | 1,22 | 2,18 | 6,50 | 8,50 |
| Agosto | 1,34 | 2,31 | 6,31 | 9,19 |
| Setembro | 1,44 | 2,32 | 6,46 | 10,18 |
| Outubro | 1,48 | 2,58 | 7,05 | 11,88 |
| Novembro | 1,53 | 2,67 | 7,70 | 13,74 |
| Dezembro | 1,57 | 3,21 | 8,29 | 14,88 |

Fonte: Projeto ERA-40.

O período de inverno (Hemisfério Norte) aparece como o mais energético, como evidenciado na **Tabela II.5.1.3-9**. O período de novembro a março detém os maiores valores de altura significativa e período médio.

Para análise do clima de ondas na região do Bloco BM-PAMA-8, também foram utilizados os dados disponíveis no BNDO (**Figura II.5.1.3-45**), no período de 1963 a 1999.

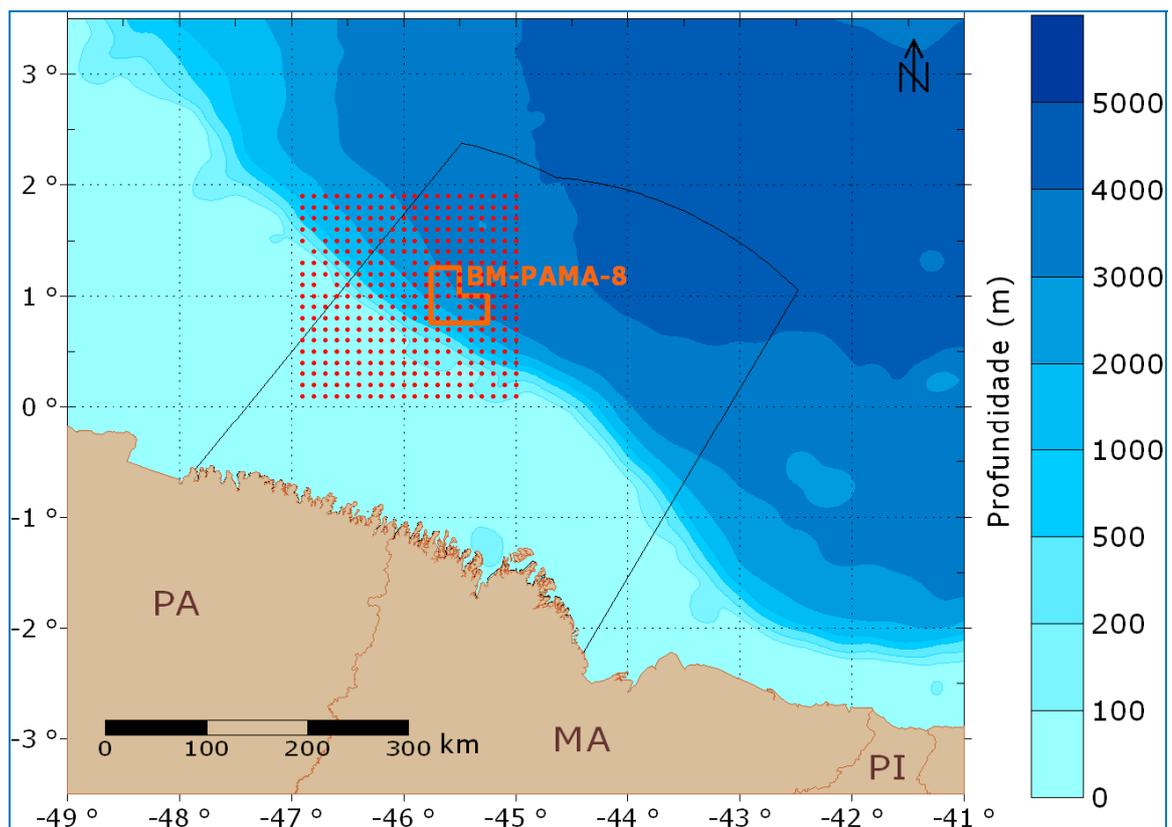


Figura II.5.1.3-45 - Localização dos dados de ondas do BNDO utilizados para análise do clima de ondas na região do Bloco BM-PAMA-8.

Na **Figura II.5.1.3-46**, **Figura II.5.1.3-47** e **Figura II.5.1.3-48** são apresentados os histogramas de altura e período de ondas elaborados com os dados do BNDO. Em cada figura é também apresentado o número de dados amostrados em cada mês.

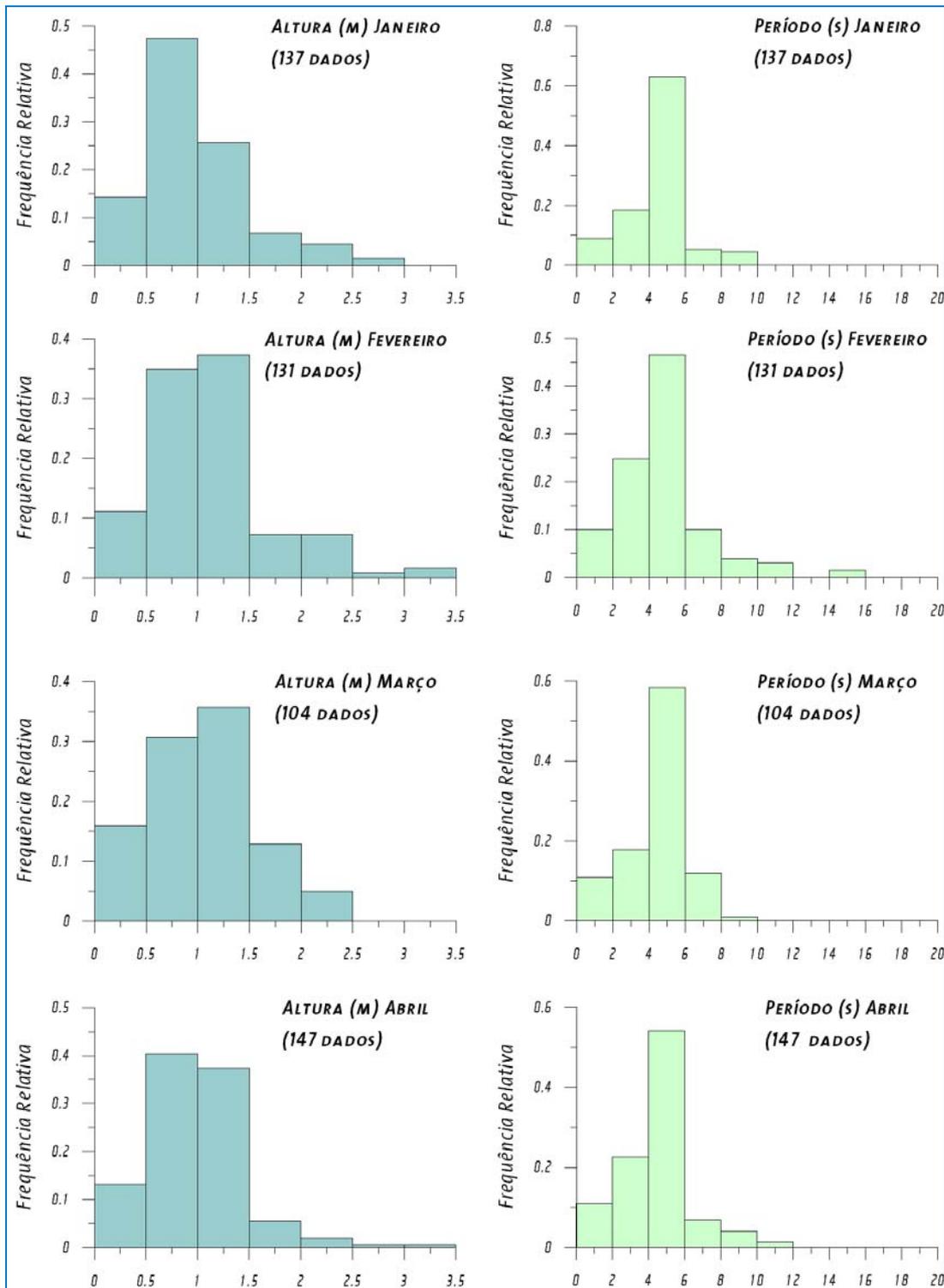


Figura II.5.1.3-46 - Histogramas de altura e período das ondas, para os meses de janeiro a abril, elaborados com os dados do BNDO para região do Bloco BM-PAMA-8.

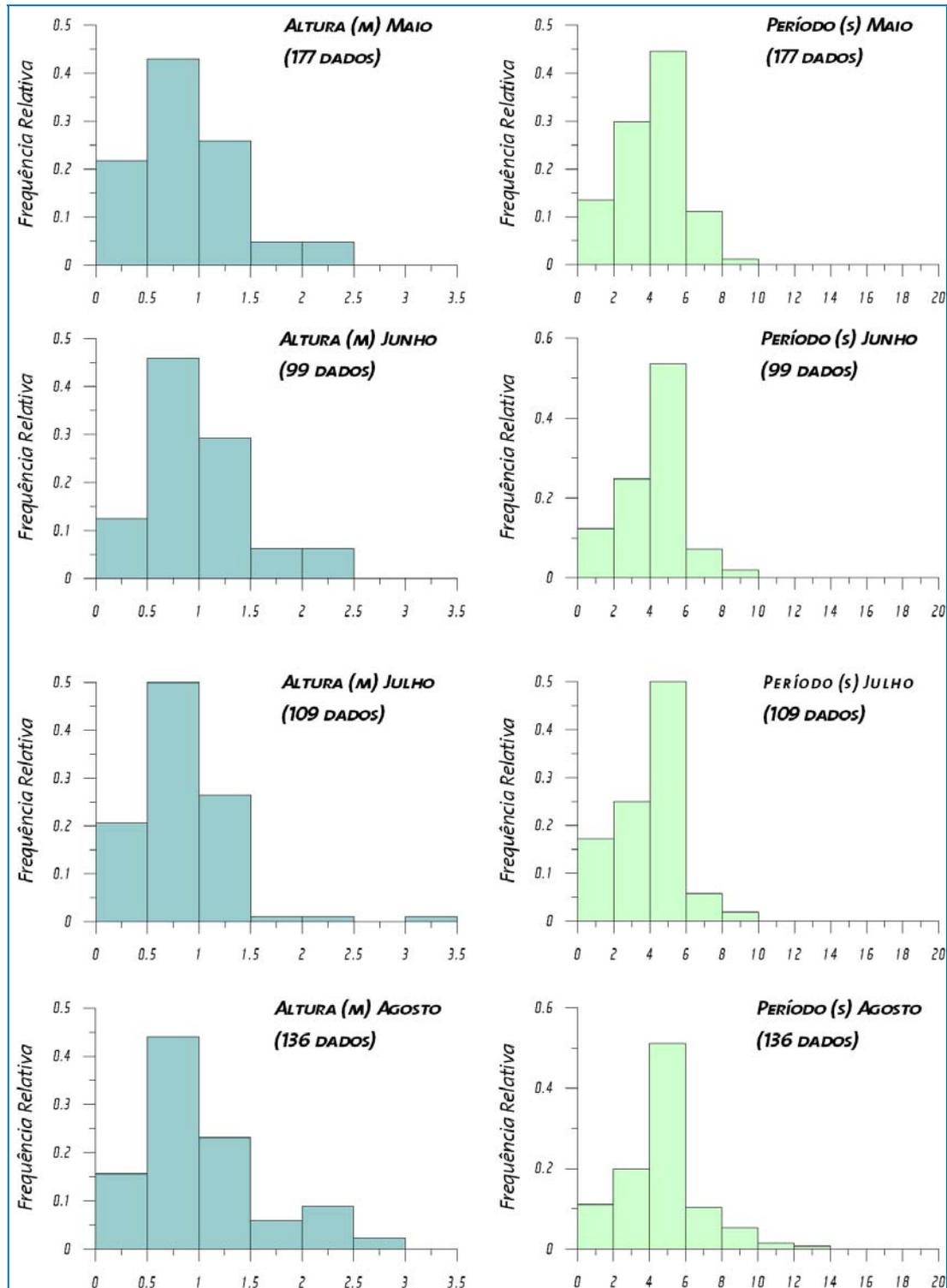


Figura II.5.1.3-47 - Histogramas de altura e período das ondas, para os meses de maio a agosto, elaborados com os dados do BND0 para a região do Bloco BM-PAMA-8.

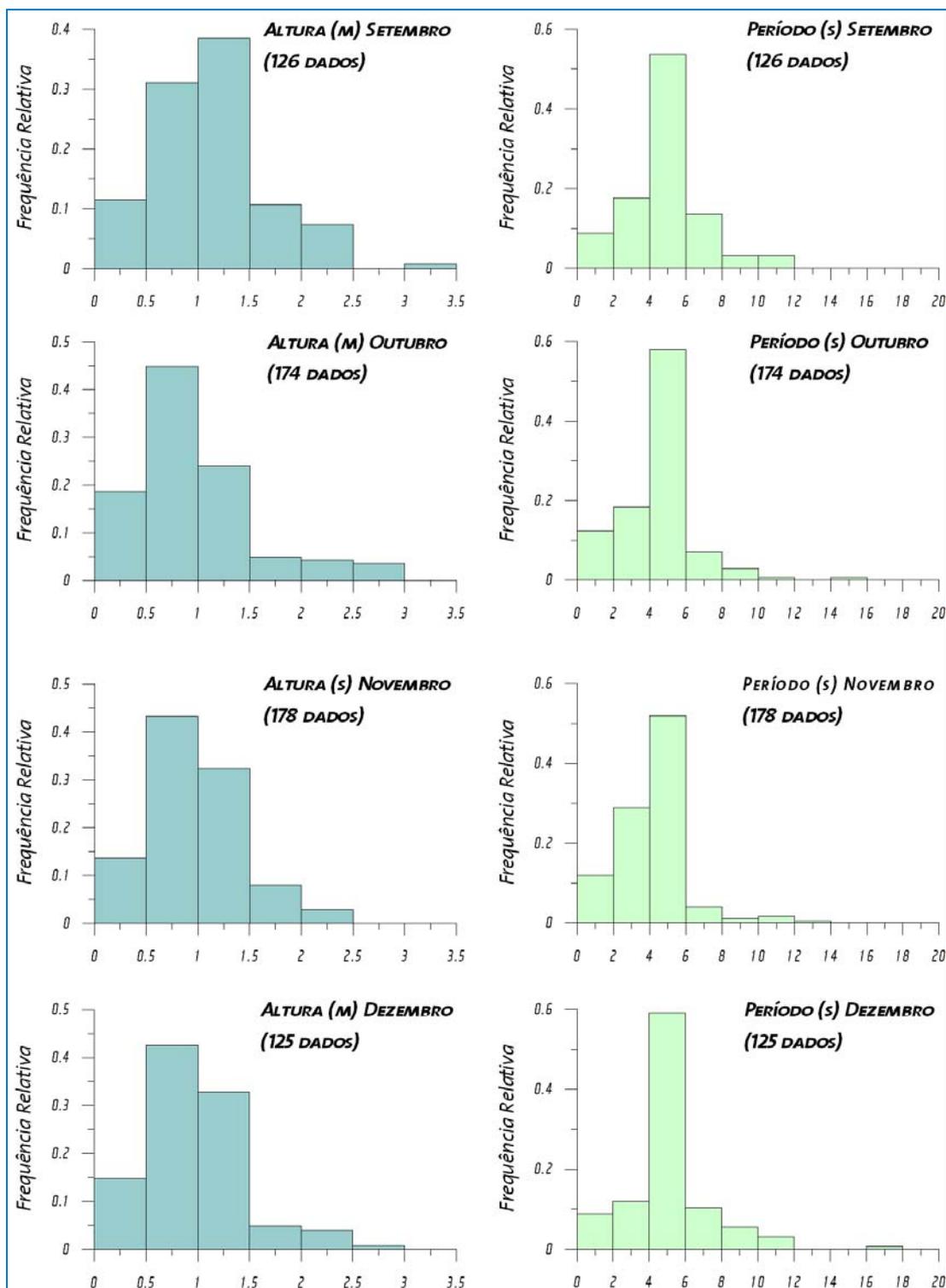


Figura II.5.1.3-48 - Histogramas de altura e período das ondas, para os meses de setembro a dezembro, elaborados com os dados do BNDO para a região do Bloco BM-PAMA-8.

Observa-se que as classes de altura e de período mais frequentes são de 0,5 a 1 m e de 4 a 6 s, respectivamente.

Os dados do BNDO também permitem identificar a presença de ondulações maiores, geradas por tempestades no Atlântico Norte, chegando a 3,5 m de altura e 18 s de período.

Os dados de Hs localizados em 1° N de latitude e 46° W de longitude, obtidos dos satélites JASON e GFO, podem ilustrar o ciclo sazonal de alturas de ondas observadas na região Norte do Brasil. Estes dados apresentam diferenças de alguns dias, devido aos diferentes ciclos de repetição de cada satélite (10 dias – JASON; 17 dias –GFO).

Os algoritmos para estimar as alturas significativas das ondas (SWH) a partir de dados altimétricos realizam a análise da “Forma de Onda de RADAR” recebida pelo altímetro, que depende da diferença de tempo entre o pulso refletido pela crista e pelo cavado, bem como da influência da inclinação da onda (BARRICK, 1977). Estes algoritmos supõem que as distribuições estatísticas destes parâmetros são gaussianas, o que responde melhor para alturas de onda moderadas. A Forma de Onda de RADAR depende da distribuição de probabilidade conjunta da elevação e da inclinação da superfície. Esta tecnologia permite, atualmente, estimar, por exemplo, como o *swell* se propaga a partir da área onde foi produzido, através de mapeamento em grade do campo de SWH (JANSSEN, 2000).

O ciclo sazonal, ilustrado na **Figura II.5.1.3-49**, entre o inverno de 2004 e o inverno de 2005, se repete todos os anos.

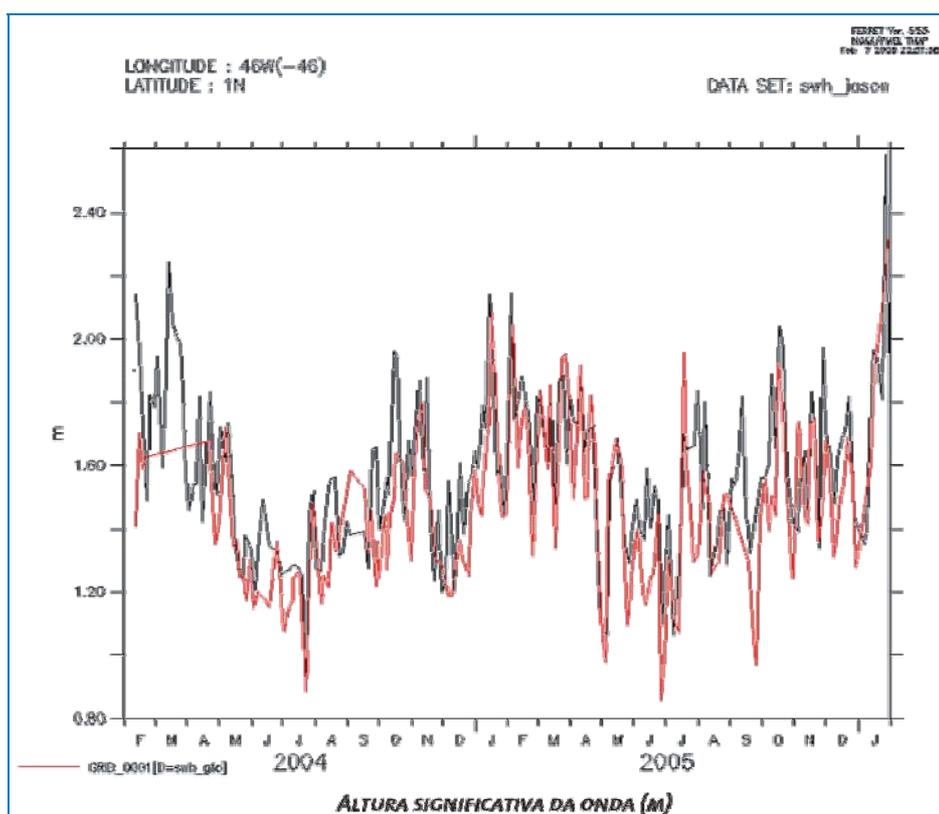


Figura II.5.1.3-49 - Série temporal de dados de altura significativa de onda medidos entre fevereiro de 2004 e janeiro de 2006. Em vermelho está representado o satélite GFO e em preto o JASON.

Fonte: GFO e JASON.

É possível notar que, no inverno do Hemisfério Norte, as alturas significativas (H_s) atingem no máximo 2,4 m, segundo os dados do JASON (preto) e GFO (vermelho), em janeiro e fevereiro.

Na **Figura II.5.1.3-50** e na **Figura II.5.1.3-51**, são apresentadas seções meridionais com a evolução temporal da H_s nas longitudes $38^\circ W$ e $46^\circ W$, respectivamente. Mais uma vez fica evidenciado o padrão sazonal, com ondas mais energéticas ocorrendo no período de inverno (Hemisfério Norte).

Os resultados indicam que parte das ondas de inverno mais intensas observadas na região de estudo estão ligadas às tempestades que ocorrem em regiões extratropicais do Hemisfério Norte nesta época do ano.

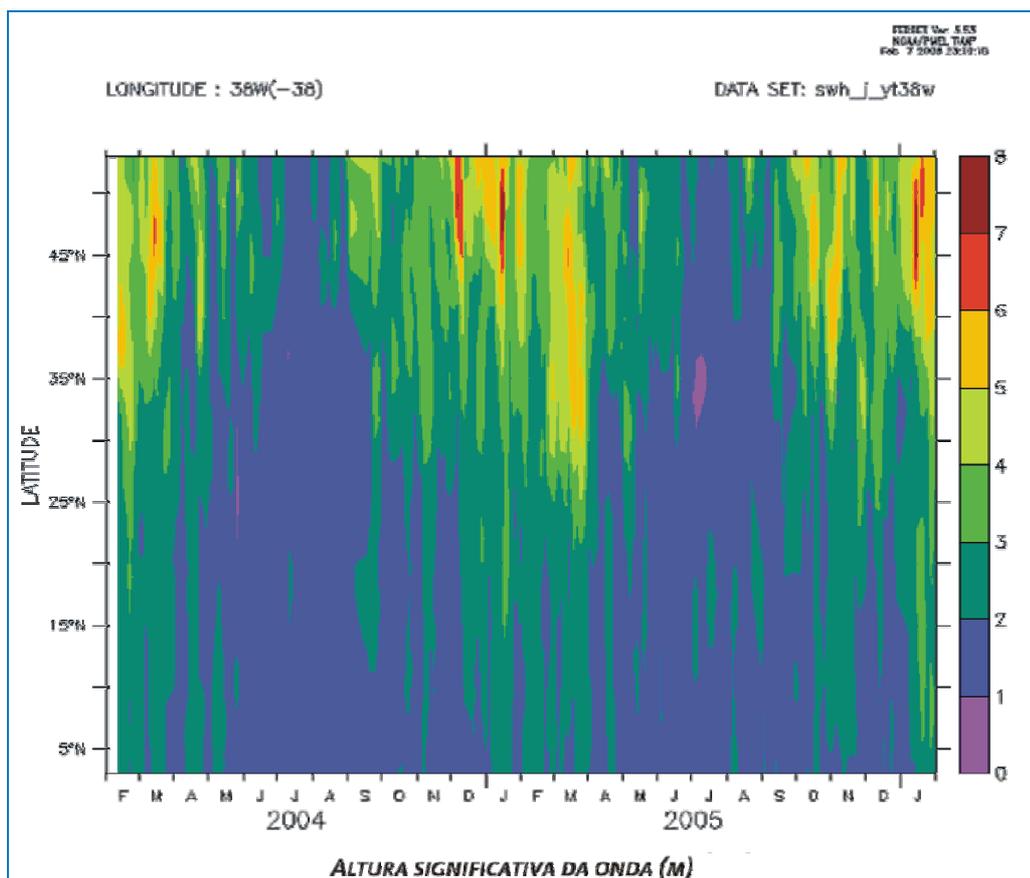


Figura II.5.1.3-50 - Tempo x Latitude, ilustrando o swell mais alto de inverno observado em 38° W como tendo origem em regiões extra tropicais no Atlântico Norte.

Fonte: JASON.

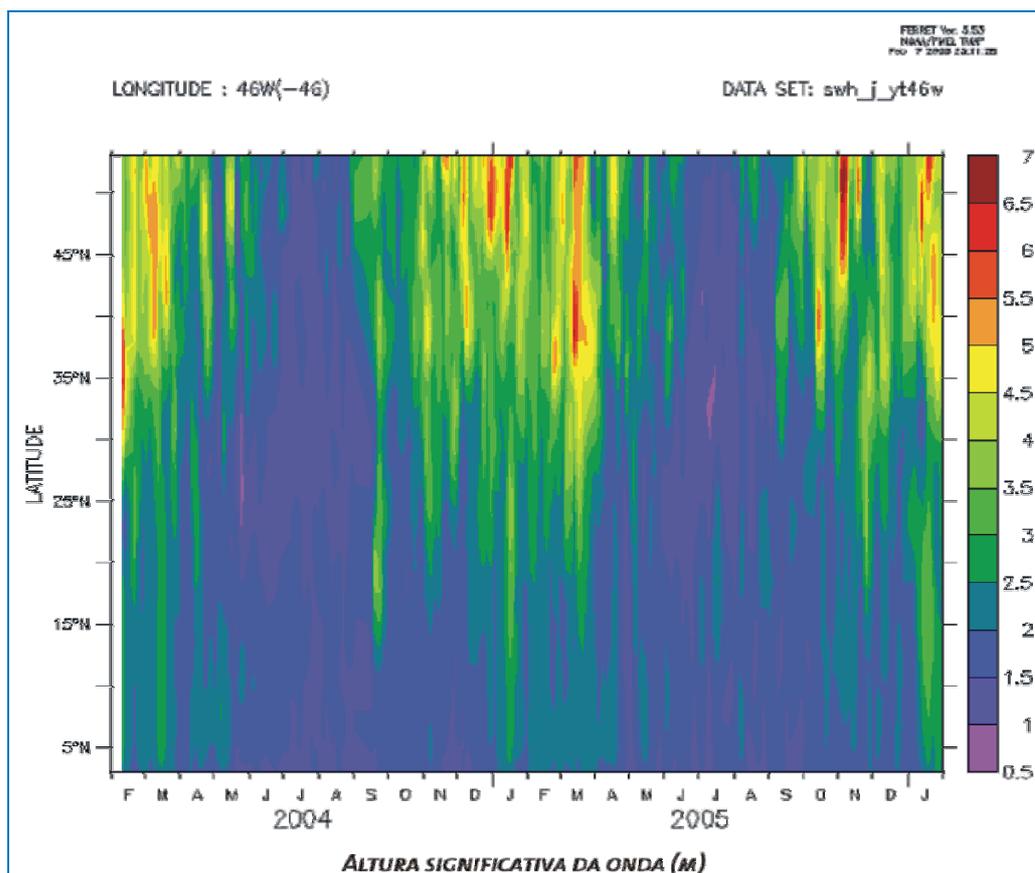


Figura II.5.1.3-51 - Tempo x Latitude, ilustrando o swell mais alto de inverno observado em 46° W como tendo origem em regiões extra tropicais no Atlântico Norte.

Fonte: JASON.

Na **Figura II.5.1.3-52**, é apresentada uma seção zonal, com a evolução temporal da Hs sobre a latitude de 1° N. É possível observar a presença de um ciclo sazonal associado à migração da ZCIT. No inverno (Hemisfério Norte), quando esta se encontra ao sul do equador, ventos mais intensos próximos a 35° W forçam ondas de mar local (*windsea*) e *swell*, vindas de Leste, que atingem a região da Bacia do Pará-Maranhão.

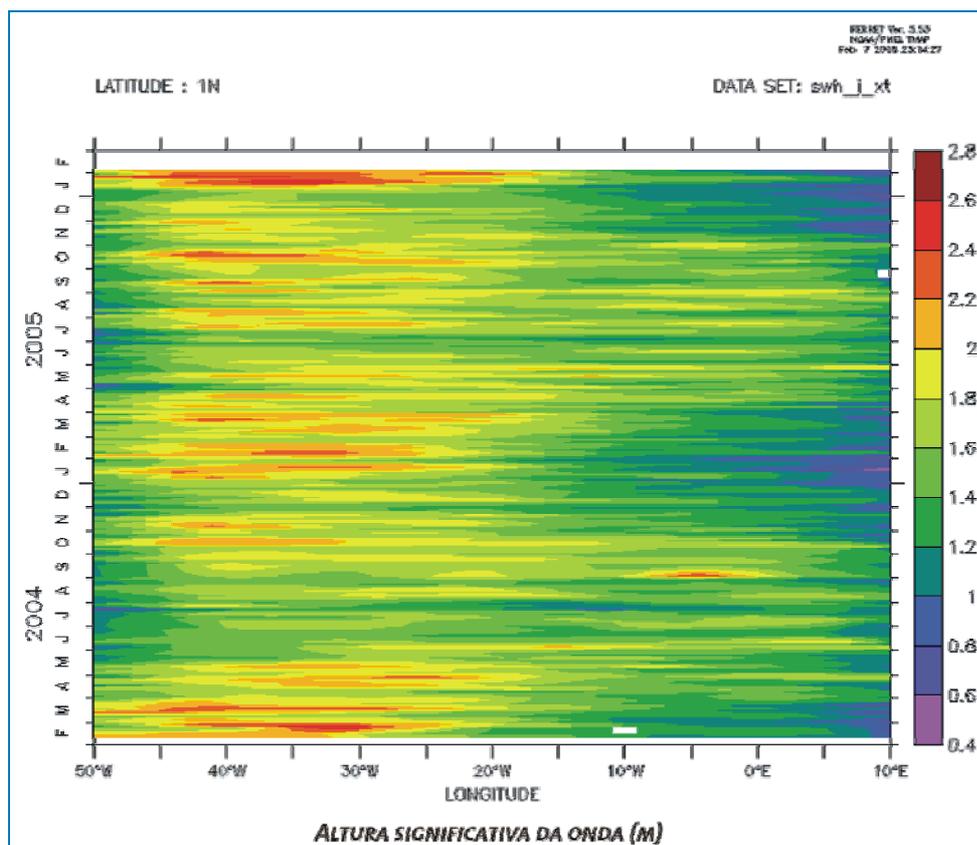


Figura II.5.1.3-52 - Tempo x Longitude, ilustrando o swell mais alto de inverno observado em 1° N, como tendo origem em regiões equatoriais a Leste, centradas em 35° W.

Fonte: JASON.

Na **Figura II.5.1.3-53**, apresenta-se a agitação marítima observada na bacia Norte do Atlântico em 15 de fevereiro de 2004, ilustrando a propagação de ondas geradas em uma tempestade no Hemisfério Norte indo em direção à região da Bacia do Pará-Maranhão, com Hs entre 2 e 2,5 m.

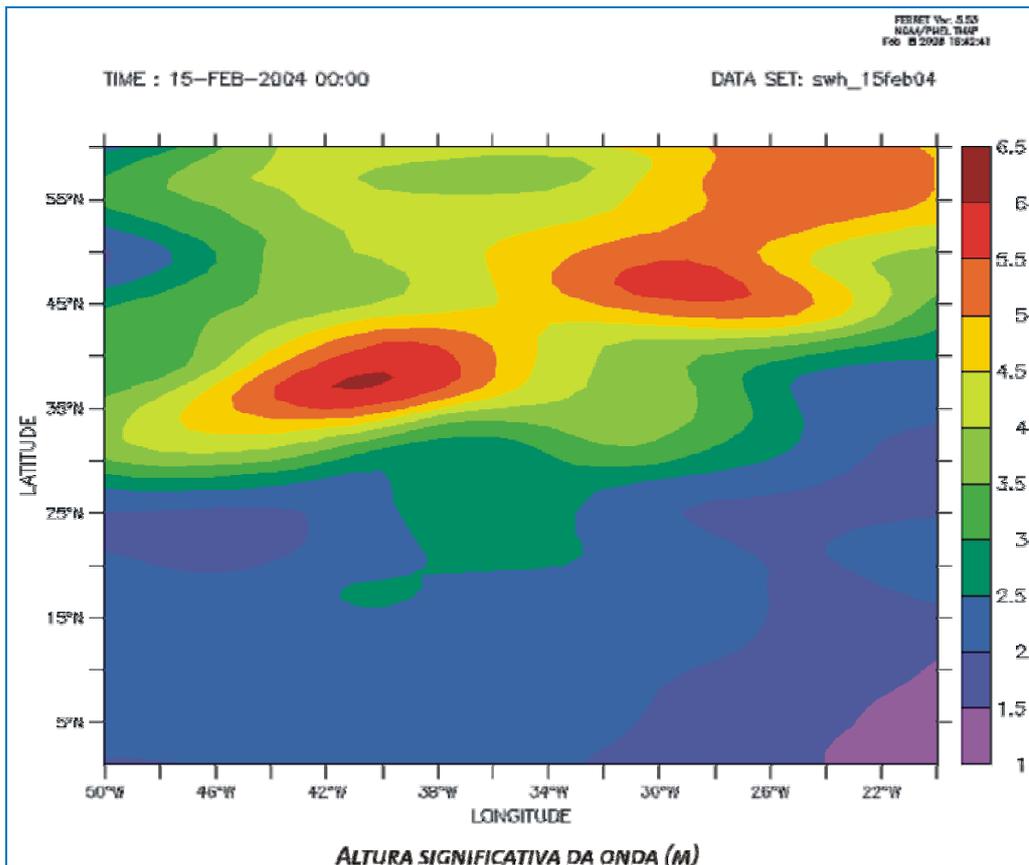


Figura II.5.1.3-53 - Mapa de altura de ondas para o dia 15 de fevereiro de 2004.

Fonte: JASON.

Na **Figura II.5.1.3-54** e na **Figura II.5.1.3-55**, são apresentados os espectros polares oriundos do Projeto ATLASUL, para região da Bacia Pará-Maranhão, exemplificando as condições de mar citadas anteriormente. O Projeto ATLASUL tem como objetivo fornecer produtos operacionais de previsão oceânica e atmosférica através de modelos numéricos consagrados, como o WAVEWATCH-III, em diferentes escalas espaciais e temporais, visando a melhor representação das particularidades de cada região de interesse.

A paleta de cores apresentada na **Figura II.5.1.3-54** indica a energia presente nas ondas da região em um dado momento, a localização da energia indica a direção para a qual a energia se desloca, ou seja, direção para onde as ondas vão, e os raios identificam os períodos das ondas. A partir do espectro da região oceânica ao largo da área de estudo verifica-se a presença de energia vinda de Nordeste, com os períodos mais energéticos entre 6 e 8 s. Este espectro

caracteriza bem a condição de mar sob influência das ondas geradas pelo vento local, no caso, os ventos alísios de Nordeste. A condição de mar apresentada na **Figura II.5.1.3-55** exemplifica a chegada de ondas com períodos mais longos, atingindo 18 s, vindas de N, supostamente geradas por uma tempestade no Hemisfério Norte. Também é possível observar a energia proveniente de E, com períodos mais curtos, associada aos ventos alísios.

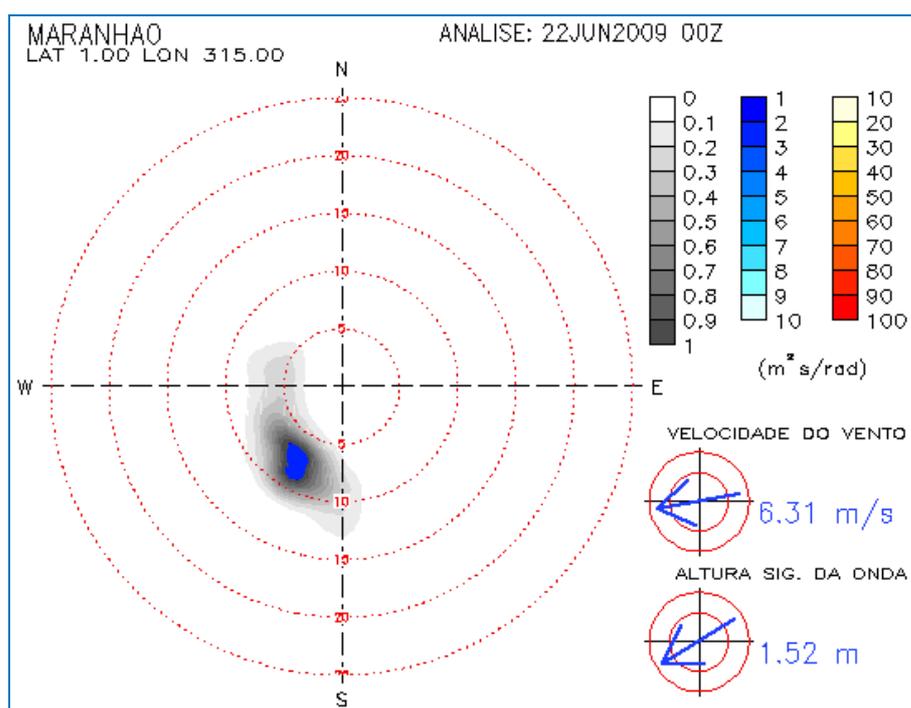


Figura II.5.1.3-54 - Espectro polar na região da Bacia Pará-Maranhão mostrando a presença de ondas de NE com energia mais concentrada em períodos entre 6 e 9 s.

Fonte: ATLASUL.

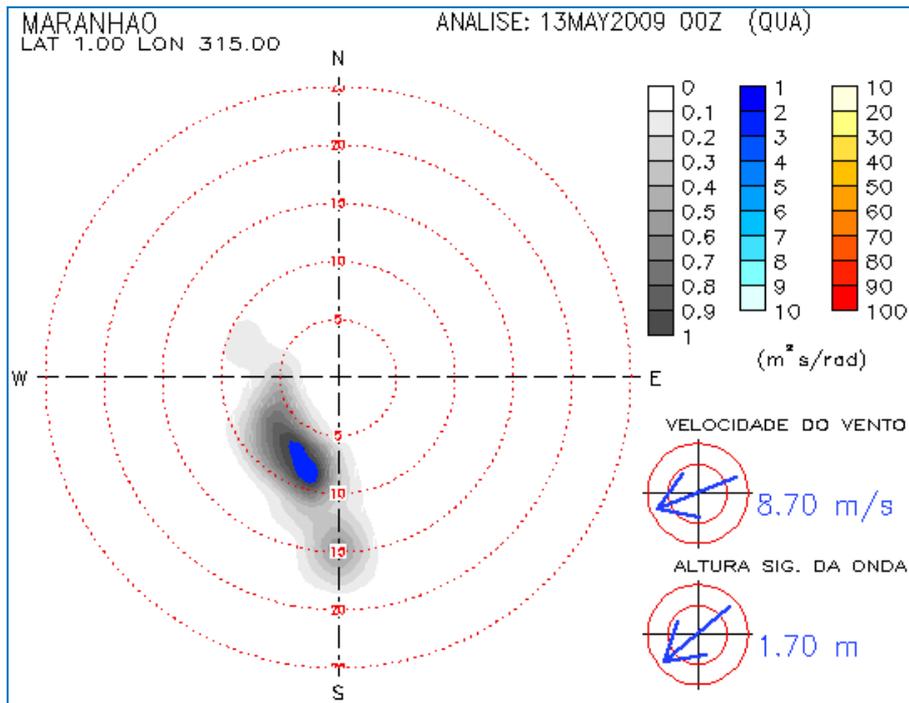


Figura II.5.1.3-55 - Espectro polar na região da Bacia Pará-Maranhão mostrando a presença de ondas de E, NE e N.

Fonte: ATLASUL.

II.5.1.3.5 - Regime de Marés

A maré pode ser classificada quanto ao seu período como diurna, semi-diurna, mista (principalmente diurna) ou mista (principalmente semi-diurna) (POND & PICKARD, 1978).

Para classificar a maré, calcula-se um fator que considera a amplitude das principais componentes diurnas e semi-diurnas. Esse fator é definido por:

$$F = \left[\frac{(K_1 + O_1)}{(M_2 + S_2)} \right] \text{ (POND \& PICKARD, 1978).}$$

Onde K1, O1, M2 e S2 são as amplitudes das constantes harmônicas correspondentes.

De acordo com essa classificação tem-se:

$F = 0$ a $0,25$: Maré semi-diurna, cujo período é de aproximadamente 12h. Neste caso, tem-se duas marés altas e duas marés baixas em 24 horas. A altura de uma preamar é praticamente igual a outra, o mesmo acontecendo com a baixamar.

$F = 0,25$ a $1,5$: Maré mista, principalmente semi-diurna: grandes diferenças de altura entre suas preamares e baixamares. Essa maré é, na maioria das vezes, semi-diurna, podendo ser diurna em algumas épocas do ano.

$F = 1,5$ a $3,0$: Maré mista, principalmente diurna: grandes diferenças de altura entre suas preamares e baixamares. Essa maré é, na maioria das vezes, diurna, podendo ser semi-diurna ou diurna em algumas épocas do ano.

$F > 3,0$: Maré diurna, cujo período é de aproximadamente 24h. Nesse caso, tem-se apenas uma maré alta e uma maré baixa em 24 horas.

Para a caracterização da maré na região próxima ao Bloco BM-PAMA-8 foram utilizadas as constantes harmônicas obtidas do modelo global de marés FES95 (de "*Finite Element Solutions*"). As equações governantes do FES-95 são as equações de águas rasas, barotrópicas e não-lineares, resolvidas utilizando método de elementos finitos. Para a fricção com o fundo é utilizada parametrização quadrática, mais adequada para regiões de águas rasas. A forçante de maré é baseada no desenvolvimento astronômico do potencial de maré, considerando as correções dos efeitos de maré terrestre (*earth tides*) e maré de carga (*load tides*) sendo ainda realizada assimilação de dados de altimetria de satélite (LE PROVOST *et al.*, 1999). A batimetria é retirada do banco de dados ETOPO5 do *National Geophysical Data Center* (NGDC) do *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA).

São simuladas oito constituintes de maré (M2, S2, N2, K2, N2, K1, O1 e Q1) em todo globo, excluindo-se alguns mares interiores e baías como a Baía de Fundy. A grade do modelo FES-95 apresenta resolução variável, porém os resultados que foram colocados à disposição da comunidade científica estão em grades de $0,5^{\circ} \times 0,5^{\circ}$. A partir destes, foram obtidos os dados de fase e amplitude de sete componentes (M2, S2, N2, K2, K1, O1 e Q1) para o ponto localizado na latitude 1° N e longitude $45^{\circ}30'$ W (**Figura II.5.1.3-56**). As constantes harmônicas estão apresentadas na **Tabela II.5.1.3-10**.

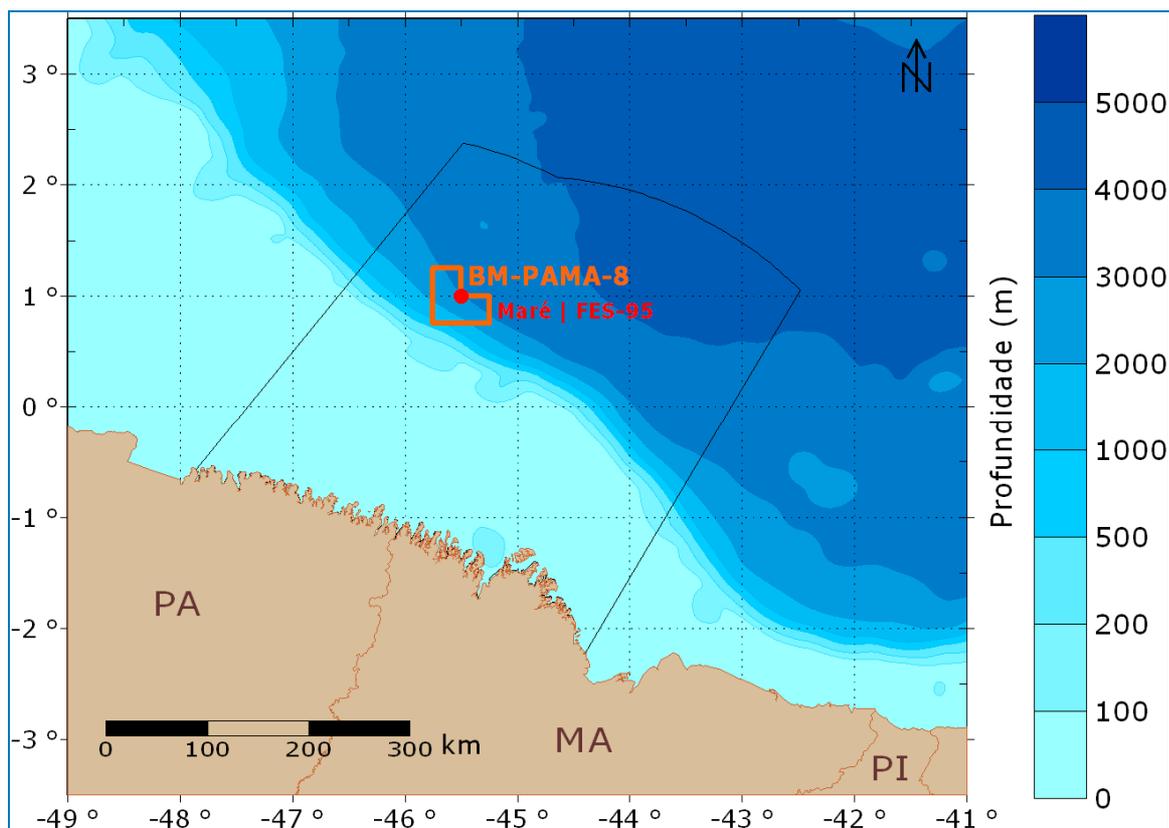


Figura II.5.1.3-56 - Localização do ponto do FES-95 de onde foram obtidas as constantes harmônicas.

Tabela II.5.1.3-10 - Constantes harmônicas obtidas pelo modelo global de marés FES-95 no ponto de latitude 1° N e 45,5° W.

| Componente | Amplitude (cm) | Fase (em relação a Greenwich) (em graus) |
|------------|----------------|--|
| K1 | 4,2 | 212,3 |
| O1 | 7,8 | 232,9 |
| N2 | 18,7 | 207,5 |
| M2 | 86,3 | 223,6 |
| S2 | 28,5 | 245,1 |
| K2 | 7,5 | 246,8 |

Para a região de interesse, tem-se:

$$F = (4,2+7,8) / (86,3+28,5) = 0,105 \rightarrow \text{maré semi-diurna}$$

Podemos calcular também, segundo a formulação de Pond & Pickard (1978), a média da amplitude das marés de sizígia, que nesse caso será:

$2(M_2+S_2) = 229,6$ cm para a Estação Plataforma Penrod - AP;

Portanto, podemos classificar a maré na área do Bloco BM-PAMA-8 como sendo semi-diurna e com amplitudes médias de sizígia da ordem de 229,6 cm.

Na **Figura II.5.1.3-57**, é apresentado um gráfico com a elevação da superfície do mar calculada com as constantes harmônicas obtidas pelo FES-95, para o ano de 2009, com os valores máximos e mínimos para cada série, identificados pelas linhas tracejadas.

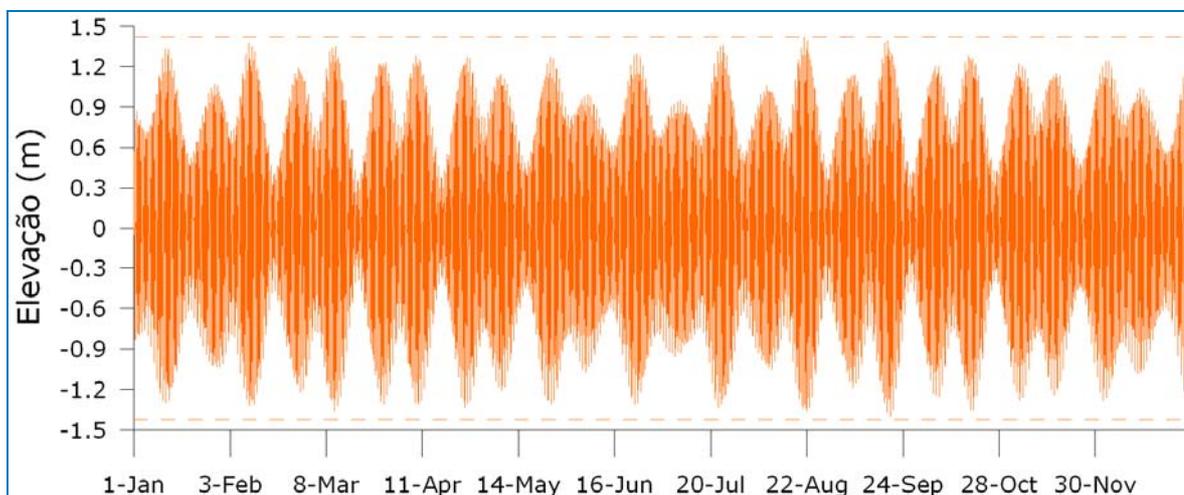


Figura II.5.1.3-57 - Elevação da superfície do mar (m) para o ano de 2009.

Fonte: FES-95.

Observa-se que as alturas máximas (1,42 m) e mínimas (-1,40 m) da série ocorreram, respectivamente nos meses de agosto e setembro.

II.5.1.3.6 - Condições Extremas

Baseado nas análises de dados de ventos, ondas e correntes, pode-se inferir que o período de inverno no Hemisfério Norte (dezembro a março) é o que possui maior probabilidade de apresentar condições meteo-oceanográficas extremas. É neste período que as ondas atingem seus valores máximos. Quando a ZCIT atinge sua posição mais ao Sul, os ventos alísios de Nordeste se intensificam, gerando as maiores alturas significativas de onda associadas ao mar local. É também nessa época que o *swell* gerado por tempestades na região extratropical

do Atlântico atinge a região do Bloco BM-PAMA-8 com alturas significativas que podem ultrapassar 3,5 m. Com relação às correntes, verifica-se que a região sofre influência da CNB, apresentando fluxo preferencial para Oeste/Noroeste, com velocidades máximas que podem atingir 2 m/s.

II.5.1.3.7 - Síntese Conclusiva

A análise dos dados oceanográficos da região adjacente ao Bloco BM-PAMA-8, na Bacia do Pará-Maranhão, demonstrou a presença de uma termoclina permanente na região, que se inicia a partir de aproximadamente 100 m de profundidade, até 700-800 m. Nesta profundidade também é encontrado o mínimo de salinidade (~34,5), em profundidade, associado à AIA. Na primavera do Hemisfério Norte, ocorrem os maiores índices de precipitação na região, com médias acima de 400 mm nos meses de março e abril, fazendo com que salinidades mais baixas sejam encontradas em superfície. A análise do diagrama T-S mostrou a presença na região de todas as massas d'água encontradas por Silva *et al.* (2005), Água Costeira, Água Tropical, Água Central do Atlântico Sul e Água Intermediária Antártica.

Com a análise do clima de ondas da região foi observado que a classe de altura mais frequente foi de 0,5 a 1,5 m, enquanto que o período foi de 4 a 8 s. Notou-se também a presença de ondulações maiores, ultrapassando 3,5 m de altura e 18 s de período médio, associadas a situações de *swell*, gerados por tempestades no Atlântico Norte, mais frequentes no período de inverno.

Os dados de correntes mostram que a região é influenciada principalmente pela Corrente Norte do Brasil. Até aproximadamente 700 m de profundidade o fluxo tem direção preferencial para NW. A partir dessa profundidade há uma inversão no sentido das correntes devido ao transporte da APAN. Durante o período mais seco e quente na região, julho a dezembro, as correntes são mais intensas que na primeira metade do ano, atingindo velocidades próximas a 1,70 m/s. A variação infra-sazonal (período de poucos dias a um mês) parece mais importante que as variações sazonais nas correntes da região do BM-PAMA-8.