

Análise sismoestratigráfica das bacias de Barreirinhas e do Ceará como ferramenta para estudos paleoceanográficos no Cenozoico na Margem Equatorial Brasileira

Alves, D. P. V.*, IO-USP; Jovane, L. *, IO-USP; Figueiredo, J., UFRJ

Copyright 2018, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no VIII Simpósio Brasileiro de Geofísica, Salinópolis, 18 a 20 de setembro de 2018. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do VIII SimBGf, mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGf.

Resumo

The scope of this work is improve the comprehension of the oceanography of the Brazilian Equatorial Margin, through the study of the sedimentary evolution of the Ceará and Barreirinhas basins in the Paleocene and a seismic stratigraphic approach. Multichannel seismic lines and bore hole geophysical data were analyzed to the construction of a depositional model for both basins. We identified two distinct periods: (1) Paleogene and (2) Neogene and Quaternary. During the Paleogene, the sedimentation before dominated by continental and shallow water deposits became more controlled by marine influence, developing in a time of warm and humid climate and surface and bottom currents still incipient. During the Neogene and Quaternary, the North Brazil Current (NBC) and the Deep Western Boundary Current became more important in the sediment transport, erosion and rework in the BEM. During this period, it was also possible to identify the climatic changes effect on the sediment supply for both basins, and also the paleocirculation variations, especially with the weakening of the NBC and the Atlantic Meridional Overturning Circulation.

Introdução

As bacias sedimentares da Margem Equatorial Brasileira (MEB) não apenas acumularam sedimentos desde sua formação a partir do Eocretáceo, mas também foram palco de processos tectônicos que transformaram os depósitos sedimentares. Posicionadas há pelo menos 70 milhões de anos em uma região de clima equatorial, as bacias sedimentares de Barreirinhas e do Ceará registraram em seus conteúdos litológicos os resultados das variações climáticas de toda a era Cenozóica sob esta condição equatorial.

Este trabalho contribui com os incipientes estudos

paleoclimáticos e paleoceanográficos na MEB com a reconstrução da história oceanográfica de sua porção central no Cenozoico, por meio de sua análise sismoestratigráfica. As correntes de superfície e de fundo possuem papel essencial na distribuição de sedimentos nas duas bacias, assim como seu relevo. Este trabalho busca compreender o papel das correntes e das feições morfológicas de fundo na distribuição e acúmulo de sedimentos nas bacias do Ceará e Barreirinhas.

Uma das características mais importantes da MEB que lhe concede importância para a paleoceanografia é sua posição latitudinal ao longo do Cenozoico. A posição relativamente constante da MEB desde o início do processo de abertura do Atlântico Equatorial possibilita que ela ofereça bons registros das variações paleoceanográficas e paleoclimáticas, já que, excluídas as variações latitudinais, podemos supor que toda variação climática aferida nos registros sedimentares representam as condições reais da região Equatorial ao longo do tempo.

Área de estudo

A área de estudo deste trabalho (Fig. 1) é composta por trechos da Bacia Potiguar, do Ceará e de Barreirinhas. As linhas sísmicas analisadas aqui estão distribuídas aproximadamente entre 34,5° e 43,8° W e 4° S e 3° N. As linhas sísmicas e poços utilizados estão também apresentados na Fig. 1.

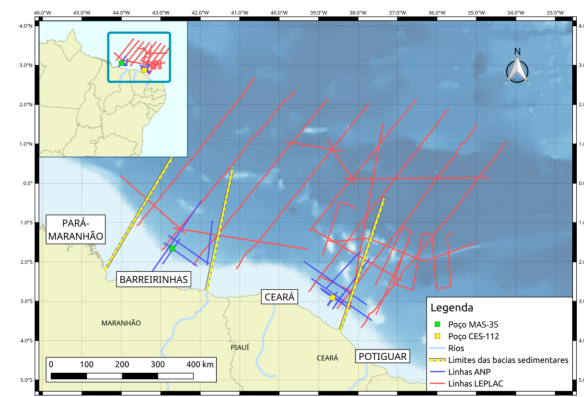


Fig. 1: Área de estudo: Bacias de Barreirinhas e do Ceará, na Margem Equatorial Brasileira, bem como as linhas sísmicas e poços utilizados neste trabalho.

Atualmente, a plataforma continental da MEB possui larguras que variam entre cerca de 30 km em Cabo de São Roque (RN), até mais de 300 km na foz do Rio Amazonas [10]. A menor largura na porção leste da MEB é consequência da conformidade das bacias em relação a linha de costa e da ausência de grandes rios, o que implica no atual baixo aporte sedimentar terrígeno na região. A maior parte dos sedimentos modernos são transportados até a porção oeste da MEB (Bacias de Pará-Maranhão e Foz do Amazonas) pela Corrente Norte do Brasil (CNB), que é a mais importante na região e que transporta sedimentos oriundos do aporte continental, sendo o principal contribuinte o Rio Parnaíba [11].

Uma das feições mais proeminentes do relevo da região é a Cordilheira Norte Brasileira [5, 6], que consiste numa série de montes submarinos, grosseiramente alinhados com os lineamentos das zonas de fraturas São Paulo e Romanche. Além de influências na circulação de fundo [4], esta cadeia de montanhas ainda parece ter atuado como anteparo aos sedimentos desde o Mioceno Inferior [10].

As circulações de superfície e de fundo são essenciais para disponibilização e distribuição de sedimentos na MEB. A Corrente Norte do Brasil (CNB) faz parte do giro equatorial, juntamente com a Corrente Sul-Equatorial (CSE) e a Contracorrente Norte-Equatorial (CCNE). A CNB não somente transporta sedimentos, mas é também responsável pelo transporte de calor entre o Atlântico Sul e o Atlântico Norte [12]. A CNB se forma em 10°S, ocupa os primeiros 1200 metros da coluna d'água e tem suas maiores velocidades entre as isóbatas de 100 e 200 metros [14]. Após cruzar o Equador, a CNB segue para o norte, rumo ao Golfo do México, mas uma parte dela sofre retroflexão para leste. Esta retroflexão acontece entre 5°N e 8°N, de forma sazonal (entre julho e dezembro), quando as camadas mais superficiais da CNB alimentam a CCNE [9]. Logo abaixo da CNB, em cerca de 800 metros, passa a atuar a Corrente de Contorno Oeste Profunda (CCOP), que leva a Água Profunda do Atlântico Norte (APAN) em direção ao sul e possui seu núcleo em torno de 4300 m, com velocidades de até 35 cm.s⁻¹ [7, 8].

As variações da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) são importantes para estudos climáticos não apenas atuais, mas também no passado. Seja por um deslocamento mais a norte ou mais a sul, seja por um tempo maior em um dos hemisférios, ou seja ainda por seu enfraquecimento, a variação na posição da ZCIT vem sendo estudada por diversos autores para a compreensão de sua atuação no paleoclima [13, 2, 16]. Da mesma forma, a variação do aporte de sedimentos para as bacias da MEB possui relação direta com estas variações.

Método

As linhas sísmicas utilizadas neste estudo são provenientes do Banco Nacional de Dados da DHN. Os dados foram coletados durante o projeto LE-PLAC e as linhas já se encontram no estado pós-empilhamento, com o processamento realizado por empresas da indústria do petróleo. Além dos dados da DHN, fazem parte deste trabalho outros dois conjuntos de dados junto à Agência Nacional do Petróleo (ANP). Ao todo, foram utilizadas 28 linhas sísmicas e 2 poços.

Os dois poços obtidos (Fig. 1) para este trabalho foram o 1-BRSA-729-MAS (MAS-35) e o 1-CES-0112 (CES-112). O poço MAS-35 está localizado na Bacia de Barreirinhas e o poço CES-112 na Bacia do Ceará, o que garante uma amarração para as duas bacias estudadas.

O pós-processamento (gráfico) e interpretação dos dados foram realizados nos softwares OpendTect e GSEGYView. O mapeamento dos horizontes sísmicos foi realizado utilizando conceitos de terminações de refletores, amplitude, fase e continuidade. A amarração sísmica *x* poço foi realizada no software OpendTect, por meio do poço CES-112 e a linha sísmica R0003-GRAND-NORTH.0222-479-FIN11, da ANP. Após a amarração, os dados sísmicos foram convertidos de tempo para profundidade por meio de um modelo de velocidades obtido no poço CES-112 e também de informações de *checkshot*.

Horizontes sísmicos, espessuras e taxas de sedimentação

Após a amarração sísmica-poço realizada via software, a correlação entre estes dados foi confirmada por meio da análise dos dados de litologia presentes no perfil composto do poço CES-112.

Foram identificados 5 horizontes sísmicos, representando 5 marcadores cronoestratigráficos: H1, topo do Maastrichtiano; H2, topo do Thanetiano; H3, base do Chattiano; H4, topo do Aquitaniano; e H5 topo do Serravalliano. Este horizontes definiram, então, 5 Unidades Cronoestratigráficas (UC): UC1, base em H1 e topo em H2, representando o Paleoceno; UC2, base em H2 e topo em H3, representando o Eoceno e Oligoceno Inferior; UC3, base em H3 e topo em H4, representando o Oligoceno e parte do Mioceno Inferior; UC4, base em H4 e topo em H5, representando o restante do Mioceno Inferior; e UC5, base em H5 e topo no leito marinho, representando o Mioceno Médio até o presente.

As profundidades (em tempo) dos horizontes sísmicos foram exportadas para arquivos de texto do

tipo XYZ/ASCII, contendo informações de latitude, longitude e tempo. A partir do modelo de velocidades, os valores em tempo foram convertidos para profundidades em metros. A seguir, os dados foram interpolados no software Surfer 13.0 pelo método TIN (Rede Irregular de Triangulação) para a geração de superfícies para cada um dos horizontes.

De posse das profundidades de cada horizontes sísmicos, o software QGIS 2.14 foi utilizado para o cálculo das espessuras das camadas sedimentares de cada UC e também as taxas de sedimentação para o Paleógeno e para o Neógeno. Cálculos de taxa de sedimentação a partir de dados sísmicos são realizados a partir de complexas operações matemáticas da técnica conhecida por *backstripping* [15]. Entretanto, como o escopo deste trabalho não envolve esta técnica e os registros sísmicos adquiridos não possuem qualidade para essa análise, os valores aqui apresentados são aproximações das taxas de sedimentação para cada um dos períodos, que não quantificam nem a erosão nem os processos de subsidência e de compactação das camadas sedimentares.

Discussão e Conclusões

A Margem Equatorial Brasileira é uma margem do tipo passiva e está posicionada há pelo menos 70 milhões de anos na região equatorial, em latitudes praticamente constantes. Estas duas características proporcionam às bacias que a compõem a possibilidade de serem fontes de registros paleoclimáticos e paleoceanográficos de grande importância científica para o estudo do continente sul-americano e do Atlântico Equatorial.

As pequenas bacias de drenagens dos rios com foz na MEB, quando comparadas a rios de outras bacias hidrológicas, possuem regimes fortemente influenciados por variações climáticas. O Delta do Rio Parnaíba passou por modificações morfológicas e hidrodinâmicas ao longo do tempo por conta de variações climáticas [1]. Além disso, períodos de maior umidade no Holoceno no continente estão relacionados diretamente com maior aporte de sedimentos para a Bacia do Ceará [3].

Estudar e melhor compreender como se deu o preenchimento sedimentar de uma região como esta é uma ferramenta de grande valia para o estudo do paleoclima e a da paleoceanografia da região. Por esta razão, o principal resultado deste trabalho foi propor um modelo deposicional para as duas bacias sedimentares centrais da MEB, baseando-se em uma análise sismoestratigráfica e contribuindo para a evolução dos estudos na margem. Este modelo considerou forçantes climáticas e oceanográficas como contribuintes para o aporte, redistribui-

ção e deposição de sedimentos na plataforma, talude e planície abissal das Bacias de Barreirinhas e do Ceará.

Dentre fatores importantes no estudo da sedimentação nas bacias da MEB, estão a curta extensão da plataforma continental na região equatorial da margem brasileira - desconsiderando a Bacia da Foz do Amazonas, fazendo com que o espaço de acomodação dos sedimentos seja pequeno (quando comparado a outras bacias, como as da margem sudeste do Brasil). Assim, os sedimentos atingem o talude e sopé continental mais facilmente e as variações do nível relativo do mar se tornam ainda mais importantes no espaço total disponível para a sedimentação.

Outra característica importante da plataforma continental na MEB é sua baixa profundidade, que a expõe totalmente em períodos de nível do mar mais baixo e também coloca praticamente toda sua extensão dentro da zona fótica, propiciando condições para a formação de plataformas carbonáticas. Na Bacia de Barreirinhas, a sedimentação carbonática é especialmente importante, com a Fm. Ilha de Santana no Paleógeno e a Fm. Pirabas no Neógeno.

Finalmente, uma terceira característica importante da MEB é a presença de diversos montes submarinos, que ajudam a definir uma morfologia irregular para as bacias - especialmente a do Ceará -, morfologia esta que tem influência direta na distribuição e deposição dos sedimentos.

A hipótese científica na qual se baseou este trabalho é a de que a sedimentação na MEB possui três fases bastante distintas:

- **Fase 1.** Anterior ao Paleoceno, em que a sedimentação era dominada por processos continentais, lacustres e de mar restrito.
- **Fase 2.** Se desenvolveu desde o final do Cretáceo e durante o Paleógeno, com um clima ainda quente e úmido, e uma circulação de superfície e fundo restritas, que não permitiam a remobilização dos sedimentos.
- **Fase 3.** Quando ocorre o estabelecimento da CNB e a CCOP em níveis perto dos atuais, atuando na remobilização dos sedimentos e erosão de depósitos de águas profundas. Além disso, nesta terceira fase é possível também identificar os efeitos das variações climáticas na atuação das correntes oceânicas, no aporte sedimentar e, consequentemente, no padrão deposicional.

Neste contexto, as Bacias de Barreirinhas e do Ceará foram de fundamental importância para a compreensão da evolução paleoceanográfica da região, principalmente devido à sua localização cen-

tral na MEB, próximo a inúmeros montes submarinos a leste e a um grande aporte continental (Rio Amazonas, após o Mioceno) a oeste. Além disso, o grau de preservação da coluna sedimentar nestas duas bacias é bastante grande, com colunas de mais de 1 km de espessura, que permitiram o mapeamento de marcadores cronoestratigráficos até o Paleoceno.

Ao se observar as espessuras dos dois períodos, é possível identificar diferenças importantes que estão relacionadas diretamente com a história deposicional das bacias. Durante o Paleógeno (Fig. 2, acima), nota-se uma nítida diferença nas espessuras quando comparadas as porções leste e oeste das bacias de Barreirinhas e do Ceará. Tomando-se como base os montes submarinos centrados na longitude 38,5°W, as espessuras a leste possuem valores médios entre 150 e 300 metros. Por outro lado, a oeste dos montes submarinos, as espessuras aumentam para valores entre 450 e 600 metros em águas profundas.

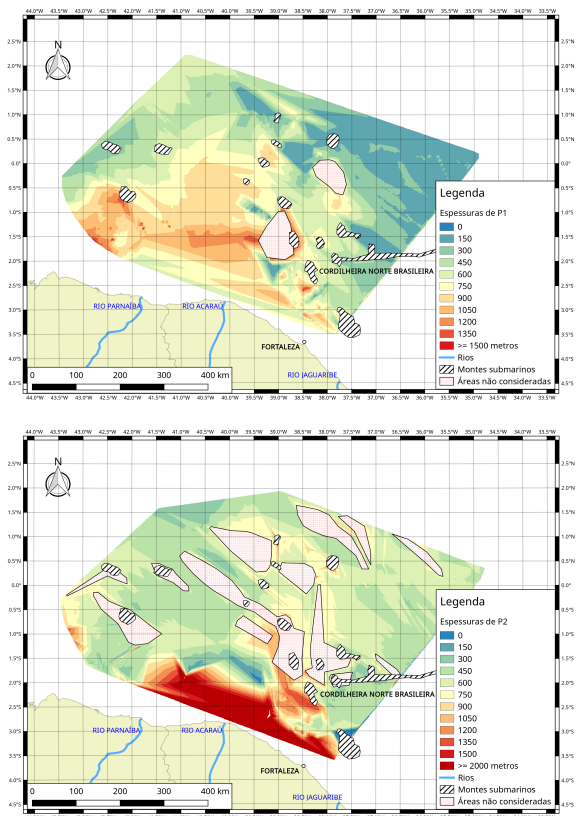


Fig. 2: Mapas de espessuras para o Paleógeno (P1, acima) e Neógeno (P2, abaixo).

Aproximando-se das águas mais rasas e da plataforma continental, as espessuras do Paleógeno assumem valores maiores, indicando uma maior concentração da deposição na região mais central da área de estudo, com espessuras entre 900 e 1300 metros. De fato, as taxas de sedimentação nesta região central (Fig. 3, acima) mostram valores de até 3,5 cm/mil anos. Outra característica interessante de se notar é que o acúmulo de sedimentos

nesta região parece ter relação direta com a presença dos montes submarinos. Estas feições morfológicas agiriam como um anteparo ao transporte de sedimentos para sudeste em águas profundas.

No Neógeno, a sedimentação se concentrou mais na plataforma, quando comparada à sedimentação em águas profundas (Fig. 3, abaixo). Enquanto os valores ao longo da maior parte da área de estudo ficam em torno de 1,5 a 2,0 cm/mil anos, na plataforma estes valores ultrapassam os 5,0 cm/mil anos. Além disso, assim como no Paleógeno, parece ser também importante o efeito da presença dos montes submarinos na sedimentação no Neógeno, com taxas maiores em suas proximidades.

As altas taxas de sedimentação na plataforma levaram ao desenvolvimento de colunas sedimentares de grande espessura, com mais de 1500 metros (Fig. 2, abaixo). Mesmo assim, o padrão de maiores espessuras a oeste dos montes submarinos da Cordilheira Norte Brasileira não parece se manter no Neógeno e no Quaternário. Pelo contrário, ao longo da área estudo, observa-se uma maior homogeneidade nos valores de espessura nestas regiões quando comparados ao Paleógeno. Ainda assim, os valores médios das espessuras no Neógeno são maiores que no Paleógeno, o que também fica claro ao se observar as taxas de sedimentação para os dois períodos.

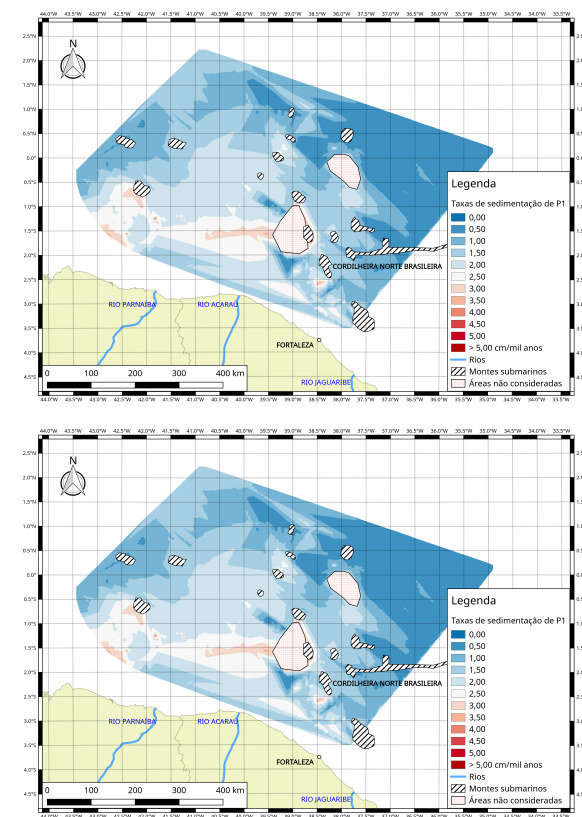


Fig. 3: Mapas dos valores de taxa de sedimentação para o Paleógeno (P1, acima) e Neógeno (P2, abaixo).

Durante o Paleógeno, o planeta vinha de um clima de altas temperaturas, alta concentração de CO₂

na atmosfera e, no caso do Atlântico Sul e Equatorial, circulação de fundo muito restrita. No Neógeno, e em direção ao Quaternário, o resfriamento do planeta se acelerou, e a maior abertura do Atlântico, aliada às novas características climáticas, permitiu o estabelecimento da circulação termohalina e o início do desenvolvimento da AMOC.

Os dados analisados neste trabalho permitem concluir que a circulação de fundo na MEB passou a existir de forma mais atuante apenas no Neógeno. Antes disso, no Paleógeno, observa-se nos dados de espessura e taxa de sedimentação, que há pouca redistribuição dos sedimentos, que se acumulam a norte da plataforma continental. Ainda no Paleógeno, com o Istmo do Panamá aberto, a Água Superior do Pacífico percorria toda a MEB até o Atlântico Sul, transportando parte dos sedimentos para E-SE. Parte destes sedimentos ficaram aprisionados junto à Cordilheira Norte Brasileira e outros montes submarinos da região.

No final do Paleógeno, a transição Oligoceno-Mioceno ficou marcada nas bacias sedimentares do Ceará e de Barreirinhas por uma importante superfície erosiva. Esta transição, que marca um evento interglacial com registros de descida do nível do mar em diversas áreas do planeta, é seguida por uma nova transgressão marinha, marcada pelas terminações em *onlap* dos horizontes sísmicos H4 e H5, durante o Mioceno.

Com a continuação do resfriamento do planeta e das águas oceânicas, no Neógeno passa a se desenvolver a circulação termohalina, com a formação de massas d'água e correntes de fundo na Antártica e no Atlântico Norte. A APAN passa a chegar até MEB e o Atlântico Sul através da CCOP, que começa a atuar na redistribuição dos sedimentos em águas de média e grande profundidades. Por sua direção E-SE, parte dos sedimentos remobilizados e transportados por ela ainda ficam aprisionados nos montes submarinos.

Durante o Neógeno, o nível do mar continua em diminuição, quando comparado ao Paleógeno, ainda que existam variações de alta frequência, principalmente no Quaternário. Com a circulação de fundo e de superfície estabelecidas, a deposição dos sedimentos nas bacias de Barreirinhas e do Ceará passa a se concentrar em maiores taxas na plataforma e talude.

No Mioceno, a carga de sedimentos do Rio Amazonas passa a chegar na MEB, e parte desta carga também chega até as bacias estudadas, principalmente pelo transporte de fundo. Este fato é corroborado pelas maiores taxas de sedimentação na região mais a oeste de Barreirinhas. Ainda nesta região, as transgressões do Mioceno ficaram marcadas em *onlaps* nos registros sísmicos. As regressões anteriores a cada uma destas três gran-

des transgressões podem também ser responsáveis pelas maiores taxas de sedimentação na parte oeste de Barreirinhas.

Períodos de ótimos climáticos durante o Eoceno (EECO e MECO, por exemplo), não puderam ser identificados nos dados sísmicos, principalmente por conta de sua resolução. Por outro lado, durante o MMCO, o enfraquecimento da AMOC levou à diminuição da intensidade da CNB, diminuindo assim o transporte de sedimentos para NO. Esta diminuição, atrelada ao maior aporte sedimentar por conta do aumento da pluviosidade no continente sul-americano, pode também ter contribuído para as maiores espessuras e taxas de sedimentação na porção oeste da Bacia de Barreirinhas. Ainda nesta bacia, a deposição autóctone e a formação de plataformas carbonáticas parecem ter relação com o MMCO e as maiores taxas de sedimentação e espessuras da bacia no Neógeno.

Estudos do Cenozoico na MEB ainda são incipientes e há poucos exemplos, sejam eles na porção imersa ou emersa das bacias sedimentares. Iniciativas para envio de propostas de perfuração na MEB para o *International Ocean Drilling Program* (IODP) são de fundamental importância para o desenvolvimento da compreensão dos efeitos das variações climáticas e oceanográficas no preenchimento das bacias sedimentares da Margem Equatorial Brasileira.

Agradecimentos

Agradecemos ao IODP-CAPES pela bolsa de doutorado durante a realização do projeto, bem como à ANP (Agência Nacional do Petróleo) e a Marinha do Brasil, pela cessão dos dados sísmicos e de poços e ao CAPESP/Ciências do Mar.

Referências

- [1] A. G. Aquino da Silva, K. Stattegger, K. Schwarzer, H. Vital, and B. Heise. The Influence of Climatic Variations on River Delta Hydrodynamics and Morphodynamics in the Parnaíba Delta, Brazil. *Journal of Coastal Research*, 314:930–940, 2015.
- [2] H. A. Armstrong and M. B. Allen. Shifts in the intertropical convergence zone, Himalayan exhumation, and late Cenozoic climate. *Geology*, 39(1):11–14, 2011.
- [3] H. W. Arz, J. Pätzold, and G. Wefer. Climatic changes during the last deglaciation recorded in sediment cores from the northeastern brazilian continental margin. *Geo-Marine Letters*, 19(3):209–218, 1999.

- [4] M. Dengler, F. A. Schott, C. Eden, P. Brandt, J. Fischer, and R. J. Zantopp. Break-up of the atlantic deep western boundary current into eddies at 8 s. *Nature*, 432(7020):1018–1020, 2004.
- [5] D. Hayes and M. Ewing. North brazilian ridge and adjacent continental margin. *Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull.*, 54(5):2120–2150, 1970.
- [6] R. E. Houtz, W. J. Ludwig, J. D. Milliman, and J. A. Grow. Structure of the northern Brazilian continental margin. *Bulletin of the Geological Society of America*, 88(5):711–719, 1977.
- [7] W. E. Johns, D. M. Fratantoni, and R. J. Zantopp. Deep western boundary current variability off northeastern brazil. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 40(2):293–310, 1993.
- [8] W. E. Johns, T. N. Lee, R. C. Beardsley, J. Candela, R. Limeburner, and B. Castro. Annual cycle and variability of the north brazil current. *Journal of Physical Oceanography*, 28(1):103–128, 1998.
- [9] W. E. Johns, T. N. Lee, F. A. Schott, R. J. Zantopp, and R. H. Evans. The North Brazil Current Retroflection: Seasonal Structure and Eddy Variability Seasonal. *Journal of Geophysical Research*, 95(C12):22,103–22,120, 1990.
- [10] L. R. Martins and P. N. Coutinho. The brazilian continental margin. *Earth-Science Reviews*, 17(1-2):87–107, 1981.
- [11] T. E. Nace, P. A. Baker, G. S. Dwyer, C. G. Silva, C. A. Rigsby, S. J. Burns, L. Giosan, B. Otto-Bliesner, Z. Liu, and J. Zhu. The role of north brazil current transport in the paleoclimate of the brazilian nordeste margin and paleoceanography of the western tropical atlantic during the late quaternary. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 415:3–13, 2014.
- [12] S. G. Philander. *Atlantic Ocean equatorial currents*, volume 188. Academic Press, 2001.
- [13] J. M. Russell and T. C. Johnson. Late Holocene climate change in the North Atlantic and equatorial Africa: Millennial-scale ITCZ migration. *Geophysical Research Letters*, 32(17):1–4, 2005.
- [14] I. C. A. da Silveira, L. B. Miranda, and W. S. Brown. On the origins of the north brazil current. *Journal of Geophysical Research*, 99:22–501, 1994.
- [15] M. S. Steckler and A. B. Watts. Subsidence of the Atlantic-type continental margin off New York. *Earth and Planetary Science Letters*, 41(1):1–13, 1978.
- [16] Y. Zhang, C. M. Chiessi, S. Mulitza, M. Zabel, R. I. F. Trindade, M. H. B. M. Hollanda, E. L. Dantas, A. Govin, R. Tiedemann, and G. Gerold Wefer. Origin of increased terrigenous supply to the ne south american continental margin during heinrich stadial 1 and the younger dryas. *Earth and Planetary Science Letters*, 432:493–500, 2015.