

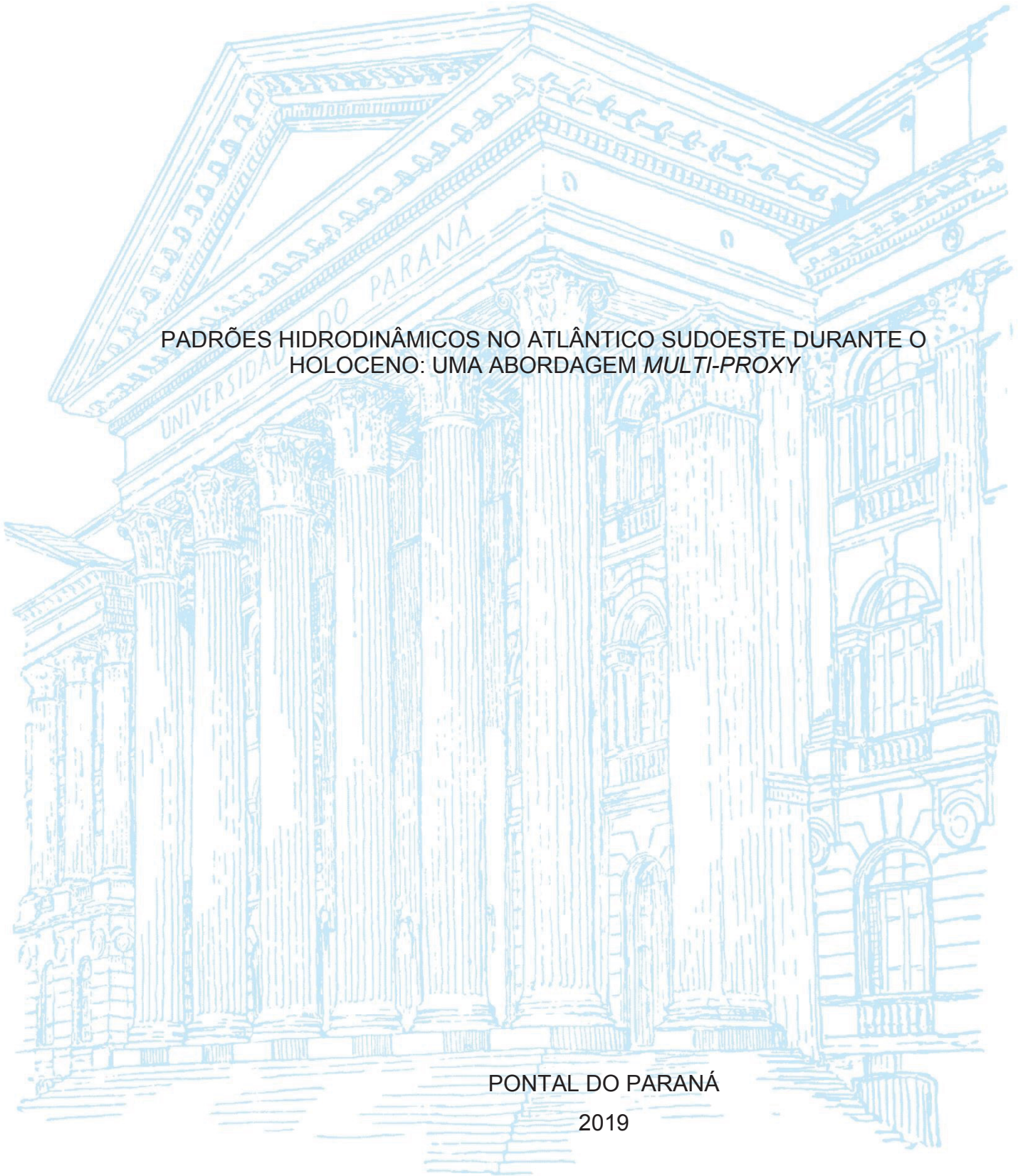
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MAYARA DA SILVA CAMPOS

PADRÕES HIDRODINÂMICOS NO ATLÂNTICO SUDOESTE DURANTE O
HOLOCENO: UMA ABORDAGEM *MULTI-PROXY*

PONTAL DO PARANÁ

2019



MAYARA DA SILVA CAMPOS

PADRÕES HIDRODINÂMICOS NO ATLÂNTICO SUDOESTE DURANTE O
HOLOCENO: UMA ABORDAGEM *MULTI-PROXY*

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Sistemas Costeiros e Oceânicos, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Sistemas Costeiros e Oceânicos.

Orientador(a): Prof(a). Dr(a). Renata Hanae Nagai

Coorientador(a): Prof(a). Dr(a). Silvia Helena de Mello e Sousa

PONTAL DO PARANÁ

2019

CATALOGAÇÃO NA FONTE:
UFPR / SiBi - Biblioteca do Centro de Estudos do Mar
Fernanda Pigozzi – CRB 9/1151

C198p Campos, Mayara da Silva
Padrões hidrodinâmicos no Atlântico Sudoeste durante o Holoceno: uma abordagem *multi-proxy*. / Mayara da Silva Campos. – Pontal do Paraná, 2019.
44 f.: il.; 29 cm.

Orientadora: Prof^a. Dra. Renata Hanae Nagai.
Coorientadora: Prof^a. Dra. Silvia Helena de Mello e Sousa.

Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Sistemas Costeiros e Oceânicos, Centro de Estudos do Mar, Setor Reitoria, Universidade Federal do Paraná.

1. Hidrodinâmica. 2. Holoceno. I. Título. II. Nagai, Renata Hanae. III. Sousa, Silvia Helena de Mello e. IV. Universidade Federal do Paraná.

CDD 551.46



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR REITORIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO SISTEMAS COSTEIROS
E OCEÂNICOS - 40001016054P6

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em SISTEMAS COSTEIROS E OCEÂNICOS da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **MAYARA DA SILVA CAMPOS** intitulada: **Padrões hidrodinâmicos no Atlântico Sudoeste durante o Holoceno: uma abordagem multi-proxy**, após terem inquirido a aluna e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Pontal do Paraná, 22 de Março de 2019.

RENATA HANAE NAGAI

Presidente da Banca Examinadora (UFPR)

CARLOS CONFORTI FERREIRA GUEDES

Avaliador Externo (UFPR)

MICHEL MICHAELOVITCH DE MAHIQUES
Avaliador Externo (USP)

Dedico este trabalho a força de duas grandes mulheres chamadas Marias, minha mãe Maria de Lurdes, e minha eterna amiga Maria Teresa (*em memória*).

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por colocar na minha vida oportunidades nada comuns para a realidade de onde eu vim. A minha mãe, o melhor exemplo de força e garra que eu já encontrei, que mesmo nos seus dias no hospital, nunca perdeu a fé, o amor e a força.

Agradeço a minha orientadora Prof. Renata Hanae Nagai, que sempre me aconselha com muita paciência e dedicação, mesmo nos seus dias de exaustão, e por me conceder muitas oportunidades, além de ser um belo exemplo como cientista.

Sou imensamente grata ao meu companheiro Daniel Alano, por sua calma, tranquilidade e compreensão durante esses dois anos, que foram de muita luta, dor e superação. E agradecer também a sua família, por me abrigar e ajudar em vários momentos.

Aos meus amigos de Pontal, que se tornaram uma família para mim durante esses 9 anos de convivência, em especial Bruna Fernanda, Laiza Faria, Amanda Câmara, Mariel Lopes, Danielle Ortiz e Cássio Padilha, por sempre tirarem de mim as melhores risadas. E a turma PGSISCO 2017 por todas as conversas e pessoas maravilhosas que eu pude conhecer.

Ao longo desses dois anos, muitas pessoas contribuíram para o meu projeto de mestrado, gostaria de agradecer aos amigos do LabPaleo², Aislyn Alvarenga, Mateus Mengatto, Ítalo Paladino, Amanda Gerotto, Christina Lazzarotto e Liciane Carla, pela ajuda, companhia e muita alegria.

Agradeço ao pessoal do IOUSP, Edilson Oliveira e Nancy Taniguchi, por me ajudarem com as amostras, sempre com boa disposição. A professora e co-orientadora Silvia Helena de Mello e Sousa, pela oportunidade, atenção e por me conceder as amostras utilizadas neste trabalho. Aos professores Michel Mahiques e Rubens Figueira, pelo uso dos laboratórios e pela oportunidade. Agradeço também a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela bolsa de suporte à Pós-Graduação, pois sem esse auxílio eu jamais poderia ter finalizado este mestrado.

Os testemunhos (CNT 311-2, 312-2, 313-2 e 314-2) aqui utilizados, também só puderam ser coletados graças a investimentos como o da FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) que viabilizou este trabalho através do projeto: “Evolução dos depósitos de contornitos no Quaternário Superior e sua interação com massas de água na Bacia de Santos, Atlântico Sudoeste”, de número: 16/03381-3.

*E passo a passo vai cumprindo a profecia do
beato que dizia que o Sertão ia alaga...
Vai ter barragem no salto do Sobradinho
E o povo vai-se embora com medo de se afogar.*

*O sertão vai virar mar, dá no coração
O medo que algum dia o mar também vire sertão.*

(Sá e Guarabyra, 1977)

RESUMO

A correntes oceânicas atuam como grandes reguladoras do clima global, e exercem a troca inter-hemisférica de calor, sal e nutrientes. No Oceano Atlântico essa troca inter-hemisférica ocorre através da Circulação Meridional do Atlântico (Atlantic Meridional Overturning Circulation - AMOC), considerada como uma das principais forçantes oceânicas que atuam diretamente no clima. A circulação da AMOC e a sua relação com as correntes oceânicas do Atlântico Sul, ainda é uma questão muito debatida nos estudos paleoceanográficos, e o papel do Atlântico Sul na circulação global começou a ser investigado apenas recentemente. O atual cenário das mudanças climáticas coloca em foco a necessidade de compreender os sistemas de *feedback* que atuam sobre o clima e, nesse contexto, a relação entre o Oceano Atlântico Sul e a AMOC ao longo do Holoceno são considerados como pontos que ainda precisam ser melhor compreendidos. A presente dissertação investigou as mudanças no fluxo das correntes oceânicas que compõem a hidrodinâmica do Atlântico Sudoeste ao longo do Holoceno, as suas relações com as mudanças na intensidade da AMOC e oscilações paleoclimáticas na região sudoeste brasileira. Utilizamos uma análise multi-proxy, composta por tamanho médio de grãos de silte entre 10 – 63 (sortable silt) e razões elementares (Fe/K e Fe/Ca), aplicadas sobre 4 registros sedimentares marinhos coletados Bacia de Santos (entre 23- 28°S) entre a isóbata de 400 e 1.550 m de profundidade de lâmina d' água. Os resultados obtidos nos mostram que a circulação oceânica do Atlântico Sudoeste ao longo do Holoceno apresentou uma relação direta com as mudanças na circulação do Hemisfério Norte, e este comportamento pode ser observado através de uma circulação enfraquecida da Corrente do Brasil (CB), e mudanças antifásicas entre a intensidade da Corrente de Contorno Intermediária (CCI) e Corrente de Contorno Profunda (CCP), além do mais, os nossos registros apresentam de forma clara a migração para sul da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) durante o Holoceno tardio, que expressa o crescente aporte terrígeno resultante do aumento na precipitação para a região sudoeste brasileira.

Palavras-chave: Holoceno; Atlântico Sudoeste; sortable silt; razão Fe/K; razão Fe/Ca; AMOC; intensidade de fluxos; circulação oceânica.

ABSTRACT

Ocean currents are regulators of the global climate and make the overturning and recirculation exchange of heat, salt, and nutrients. In the Atlantic Ocean, this inter-hemispheric exchange occurs through the Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC), considered as one of the main oceanic forces that act directly on the climate. The AMOC circulation and its relationship with the South Atlantic ocean currents is still a much-debated issue in paleoceanographic studies, and the role of the South Atlantic in the global circulation has only recently been investigated. The current scenario about climate change focuses on the need to understand feedback systems that act on the climate, and in this context, the relationship between the South Atlantic Ocean and the AMOC along the Holocene are considered as points that still need to be worked on. The present dissertation investigated the changes in the flow of the ocean currents that compose the hydrodynamics of the Southwest Atlantic along the Holocene, and its relations with the changes in the AMOC force and paleoclimatic oscillations in the southwestern region of Brazil. We used a multi-proxy analysis, consisting of average silt grains size between 10-63 (sortable silt) and ratios (Fe / K and Fe / Ca), applied on 4 cores collected from the Santos Basin (between 23- 28 ° S) in the isobath of 400 and 1,550 m of depth. The results show that the oceanic circulation of the Southwest Atlantic along the Holocene was directly related to the changes in the circulation of the Northern Hemisphere, and this behavior can be observed through a weakened circulation of the Brazilian Current (CB), and the antiphase about Western Boundary Current (IWBC) and Deep Western Boundary Current (DWBC), in addition, our records clearly show the migration south of the Intertropical Convergence Zone (ITCZ) during the late Holocene, which expresses the increasing terrigenous contribution resulting from the increase in precipitation for the southwestern region of Brazil.

Keywords: Holocene; Atlantic Southwest; sortable silt; ratio Fe/K; ratio Fe/Ca; AMOC; ocean circulation.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	12
REFERÊNCIAS	16

Capítulo: Padrões hidrodinâmicos e inferências paleoclimáticas no Atlântico Sudoeste durante o Holoceno: uma abordagem <i>multi-proxy</i>	18
--	-----------

Resumo	18
---------------------	-----------

Abstract	19
-----------------------	-----------

1. Introdução	20
----------------------------	-----------

2. Área de estudo	22
--------------------------------	-----------

3. Materiais e métodos	24
-------------------------------------	-----------

<i>3.1 Cronologia</i>	25
-----------------------------	-----------

<i>3.2 Granulometria</i>	25
--------------------------------	-----------

<i>3.3 Sortable silt e calibração</i>	26
---	-----------

<i>3.4 Razões Fe/K e Fe/Ca</i>	27
--------------------------------------	-----------

4. Resultados	27
----------------------------	-----------

<i>4.1 Calibração do sortable silt</i>	27
--	-----------

<i>4.2 Proxies de reconstrução</i>	28
--	-----------

5. Discussão	32
---------------------------	-----------

<i>5.1. Calibração do sortable silt</i>	32
---	-----------

<i>5.2 Variações na intensidade da CB, CCI e CCP na margem SE brasileira no Holoceno médio e tardio</i>	33
---	-----------

<i>5.3 Oscilações paleoclimáticas na região sudoeste brasileira ao longo do Holoceno</i>	37
--	-----------

6. Conclusão	41
---------------------------	-----------

Referências	42
--------------------------	-----------

Anexos	47
---------------------	-----------

INTRODUÇÃO

O Holoceno (últimos 11,7 mil anos – ka AP), antes considerado como uma Época de pequena variação climática quando comparado com a magnitude dos ciclos glaciais e interglaciais do Quaternário (últimos 2,56 milhões de anos – Ma AP), apresenta padrões climáticos complexos (Wanner et al., 2015). A existência destes padrões climáticos complexos levou a subdivisão da Época Holoceno pela Comissão Internacional de Estratigrafia (International Commission on Stratigraphy - ICS) em três Estágios: i) Greenlandia (ou Holoceno inferior - 11,7 a 8,3 ka AP) que marca o fim do Younger-Dryas (YD); ii) Northgrippia (ou Holoceno médio - 8,3 a 4,2 ka AP), definido pelo aporte de água doce e fria no Hemisfério Norte, proveniente do derretimento de icebergs e geleiras; e Meghallaya (ou Holoceno tardio - 4,2 ka AP até o atual), marcado por seca severa, seguida de um resfriamento identificado em todos os continentes (Gibbard, 2018). Compreender as variações climáticas ao longo do Holoceno tem sido um dos principais objetivos da comunidade paleoclimática atualmente, tanto devido as mudanças climáticas atuais, como devido ao contexto do aquecimento climático futuro e suas consequências (Marcott e Shakun, 2014). As reconstruções paleoceanográficas e paleoclimáticas são as grandes responsáveis pelo avanço na compreensão da evolução da Terra ao longo do Holoceno nos últimos 30 anos, entretanto, a grande maioria dessas reconstruções está baseada em diversos registros sedimentares marinhos coletados no Hemisfério Norte (Marcott et al., 2013), enquanto que, a região do Atlântico Sul tropical e subtropical apresenta uma escassez de registros marinhos em relação ao Holoceno (Wanner et al., 2011).

O desequilíbrio em relação aos inúmeros estudos concentrados no Hemisfério Norte, estão em grande parte associados ao interesse nos fluxos frios e salgados formados no Atlântico Norte, que entram no sistema oceânico, contribuindo para o fluxo de calor, nutrientes e sal dos polos em direção ao equador através da Circulação Meridional do Atlântico (Atlantic Meridional Overturning Circulation – AMOC) (Garzoli e Matano, 2011). Esse transporte de fluxos de norte-sul ocorre através da Água Profunda do Atlântico Norte (APAN), sendo que, seus fluxos são compensados pela entrada de águas superficiais e intermediárias vindas do Atlântico Sul (Chiessi et al., 2014). Sendo assim, o Atlântico Sul, não representa apenas um canal passivo para AMOC, mas influencia significativamente a sua formação (Garzoli e Matano, 2011). Considerar a AMOC como uma das principais forçantes climáticas dentro do Holoceno, nos leva a necessidade de compreender mais a fundo o papel do Atlântico Sul na

circulação global, que despertou a atenção da comunidade paleoceanográfica apenas recentemente (desde a década de 90) (Chiessi, 2013).

Para compreender o comportamento do Atlântico Sul e o seu papel na circulação oceânica global através de estudos paleoceanográficos, podemos inferir as variações ao longo do tempo nas velocidades de correntes oceânicas intermediárias e profundas através de *proxies* sedimentológicos, assim como podemos utilizar *proxies* geoquímicos para fornecer informações sobre fonte e/ou origem dos sedimentos, direção, modo de transporte sedimentar e condições hidrográficas do mar (Fischer e Wefer, 1999).

O uso de processos de transporte e deposição de sedimentos como um *proxy* sedimentológico, vem sendo debatido desde pelo menos a década de 1960 quando Heezen e Hollister (1964) evidenciaram a existência de feições sedimentares associadas às correntes oceânicas profundas, os autores inferiram que estas correntes oceânicas poderiam ser observadas através do estudo das feições recém-identificadas, posteriormente, Heezen et al. (1966) associaram a formação dessas feições as correntes de contorno profundas e os seus sedimentos depositados de contornitos, justamente por serem depositados ou significativamente afetados pelas correntes de contorno (Rebesco e Stow, 2002). Por apresentarem taxas de sedimentação muito mais elevadas do que a média global para os oceanos (McCave et al., 2017) os depósitos contorníticos permitem o registro de mudanças oceânicas passadas em nítida resolução temporal (Spooner et al., 2018).

Através da observação de Heezen e Hollister (1964), Ledbetter e Johnson (1976) e McCave e Swift (1976) iniciaram o debate sobre a utilização dos sedimentos finos como indicadores da intensidade de paleocorrentes. Atualmente a proposta de McCave e Swift (1976) de que a deposição de sedimentos possui uma relação positiva direta à velocidade dos fluxos de fundo (ou seja, quanto maior o tamanho médio da partícula, maior a intensidade da corrente) ainda é aceita. Em 1995, McCave et al. propuseram o uso do tamanho médio da fração silte correspondente a 10 - 63 μm , ou *sortable silt* (\overline{SS}), como o *proxy* mais adequado para inferir a intensidade de paleocorrentes. Os autores também constataram que os sedimentos mais finos do que 10 μm não eram considerados adequados para estudos voltados a inferência de paleocorrentes, uma vez que nestes casos, a agregação com matéria orgânica alteraria a fluabilidade e a deposição da partícula, e desta forma, alterariam a característica de assinatura sobre as condições na área de origem durante o momento em que foram depositados (McCave et al., 2017). Utilizar o \overline{SS} como um *proxy* para reconstrução de paleocorrentes passou a ser um método amplamente aplicado pela comunidade

paleoceanográfica (McCave et al., 2006) devido à alta resolução temporal que pode ser obtida, entretanto, alta resolução temporal também significa taxa de sedimentação por materiais finos continuamente depositados (McCave, 2008). Por fim, como o tamanho de partícula não é sensível à direção do fluxo, e apenas responde à velocidade do fluxo escalar (McCave, 2008) a aplicação do \overline{SS} ainda que de alta resolução é utilizada para inferir somente velocidade de fluxo.

Em referência ao uso de elementos químicos inorgânicos presentes nos sedimentos marinhos utilizados como *proxies* geoquímicos para inferir mudanças no aporte de sedimentos terrígenos, produtividade marinha e direção/modo de transporte sedimentar, as razões elementares são amplamente utilizadas neste caso, por serem menos sensíveis aos efeitos de dissolução, tornando-se mais úteis do que os elementos isolados (Govin et al., 2012). Dentre as razões elementares mais utilizadas estão: ferro/cálcio (Fe/Ca), titânio/cálcio (Ti/Ca), titânio/alumínio (Ti/Al), ferro/potássio (Fe/K) e alumínio/silício (Al/Si) (Govin et al., 2012). O Fe e Ti são relacionados aos sedimentos siliciclásticos e variam com a fração terrígena do sedimento (Arz et al., 1998), Ca normalmente está relacionado ao conteúdo de carbonato presente nos sedimentos marinhos (Govin et al., 2012), o elemento Si representa a presença de sedimentos com minerais argilosos, em particular grãos de quartzo, enquanto Al é principalmente associado aos sedimentos com minerais de argila mais finos (Govin et al., 2012). O elemento K pode ser associado a entrada de material por transporte eólico ou até mesmo um indicador da entrada de material por vias fluviais vindos de ambientes sobre condições úmidas (Govin et al., 2012). As razões elementares variam de acordo ao ambiente e condições climáticas, razões como Fe/Ca e Ti/Ca por exemplo, foram usadas para inferir variações em insumos terrígenos de origem fluvial no Nordeste do Brasil (Arz et al., 1998).

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo principal compreender as variações na circulação subsuperficial, intermediária e profunda do Atlântico Sudoeste ao longo do Holoceno, através de *proxies* sedimentares e geoquímicos, a fim de contribuir para o avanço dos estudos paleoceanográficos no Atlântico Sul através de variáveis reconstituídas. A área de estudo está concentrada na porção sudoeste do Atlântico Sul, que apresenta um sistema hidrodinâmico amplamente complexo com transporte de fluxos a níveis intermediários para norte, em oposição ao transporte de fluxos superficiais e profundos para sul, e desta forma, o uso de *proxies* sedimentológicos e geoquímicos podem ser aplicados para distinguir os fluxos entre si. Para realizar este trabalho 4 testemunhos curtos (< 40 cm) foram coletados na região da Bacia de Santos (23°- 28°S) no Atlântico SE, a estrutura deste trabalho

encontrasse na forma de um capítulo (Padrões hidrodinâmicos e inferências paleoclimáticas no Atlântico SE durante o Holoceno: uma abordagem *multi-proxy*) de acordo com as diretrizes estabelecidas pelo Manual do Aluno do Programa de Pós-Graduação em Sistemas Costeiros e Oceânicos – PGSISCO. Este trabalho também está inserido no projeto "Evolução dos depósitos de contornitos no Quaternário superior e sua interação com massas de água na Bacia de Santos, Atlântico Sudoeste", coordenado pela Prof.^a Dra. Silvia Helena de Mello e Sousa (IOUSP) e financiado pela FAPESP.

REFERÊNCIAS

ARZ, H. W.; PÄTZOLD, J.; WEFER, G. Correlated Millennial-Scale Changes in Surface Hydrography and Terrigenous Sediment Yield Inferred from Last-Glacial Marine Deposits off Northeastern Brazil. **Quaternary Research**, v. 50, n. 02, p. 157–166, 1998.

CHIESSI, C. M. Late Quaternary paleoceanography of the western South Atlantic: recent achievements and future research directions. **Palcomm workshop reports**, September, 2013.

CHIESSI, C. M.; MULITZA, S.; GROENEVELD, J.; et al. Variability of the Brazil Current during the late Holocene. (G. Fischer & G. Wefer, Orgs) **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 415, n. 13, p. 28–36, 2014.

FISCHER, G.; WEFER, G. **Use of Proxies in Paleoceanography**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1999.

GARZOLI, S. L.; MATANO, R. The South Atlantic and the Atlantic Meridional Overturning Circulation. **Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography**, v. 58, n. 17–18, p. 1837–1847, 2011.

GIBBARD, PHIL. Formal subdivision of the Holocene Series/Epoch. Secretary General ICS, Cambridge 19.6.18. Acesso em: 04/02/2019.

GOVIN, A.; HOLZWARTH, U.; HESLOP, D.; et al. Distribution of major elements in Atlantic surface sediments (36°N-49°S): Imprint of terrigenous input and continental weathering. **Geochemistry, Geophysics, Geosystems**, v. 13, n. 1, p. 1–23, 2012.

HEEZEN, B. C.; HOLLISTER, C. Deep-sea current evidence from abyssal sediments. **Marine Geology**, v. 1, n. 2, p. 141–174, 1964.

HEEZEN, B. C.; HOLLISTER, C. D.; RUDDIMAN, W. F. Shaping of the continental rise by deep geostrophic contour currents. **Science**, v. 152, n. 3721, p. 502–508, 1966.

LEDBETTER, M. T., & JOHNSON, D. A. Increased transport of Antarctic Bottom Water in the Vema Channel during the last ice age. **Science**, v. 194, n. 4267, p. 837- 839, 1976.

MCCAIVE, I. N. Chapter 8 Size Sorting During Transport and Deposition of Fine Sediments. Sortable Silt and Flow Speed. **Developments in Sedimentology**, 2008.

MCCAIVE, I. N., HALL, I. R., & BIANCHI, G. G. Laser vs. settling velocity differences in silt grain-size measurements: estimation of palaeocurrent vigour. **Sedimentology**, v. 53, n. 4, p. 919-928, 2006.

MCCAIVE, I. N.; MANIGHETTI, B.; ROBINSON, S. G. Sortable silt and fine sediment size/composition slicing: Parameters for palaeocurrent speed and palaeoceanography. **Paleoceanography**, v. 10, n. 3, p. 593–610, 1995.

McCave, I. N., & Swift, S. A. A physical model for the rate of deposition of fine-grained sediments in the deep sea. **Geological Society of America Bulletin**, v. 8, n. 4, p. 541- 546, 1976.

MCCAIVE, I. N.; THORNALLEY, D. J. R.; HALL, I. R. Relation of sortable silt grain-size to

deep-sea current speeds: Calibration of the 'Mud Current Meter'. **Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers**, v. 127, n. May, p. 1–12, 2017.

MARCOTT, S. A., SHAKUN, J. D., CLARK, P. U., & MIX, A. C. A reconstruction of regional and global temperature for the past 11,300 years. **Science**, v. 339, n. 6124, p. 1198-1201, 2013.

REBESCO, M.; STOW, D. Seismic expression of contourites and related deposits: A preface. **Marine Geophysical Researches**, v. 22, n. 5–6, p. 303–308, 2002.

SPOONER, P. T.; THORNALLEY, D. J. R.; ELLIS, P. Grain Size Constraints on Glacial Circulation in the Southwest Atlantic. **Paleoceanography and Paleoclimatology**, v. 33, n. 1, p. 21–30, 2018.

WANNER, H.; MERCOLLI, L.; GROSJEAN, M.; RITZ, S. P. Holocene climate variability and change; a data-based review. **Journal of the Geological Society**, v. 172, n. 2, p. 254–263, 2015.

WANNER, H.; SOLOMINA, O.; GROSJEAN, M.; RITZ, S. P.; JETEL, M. Structure and origin of Holocene cold events. **Quaternary Science Reviews**, v. 30, n. 21–22, p. 3109–3123, 2011.

Capítulo

Padrões hidrodinâmicos e inferências paleoclimáticas no Atlântico Sudoeste durante o Holoceno: uma abordagem *multi-proxy*

Mayara da Silva Campos^a, Silvia Helena de Mello e Sousa^b, Renata Hanae Nagai^a Potenciais

colaboradores: Michel M. de Mahiques^b e Rubens C. L. Figueira^b

^aCentro de Estudos do Mar, Universidade Federal do Paraná, Av. Beira Mar, s/n, Pontal do Paraná 83255-000, PR Brasil

^bInstituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, Praça do Oceanográfico, 191, Cidade Universitária 05508-120, SP Brasil

Revista pretendida: *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, ISSN (0031-0182), Fator de Impacto (JCR, 2018) = 2.375, Qualis CAPES = Biodiversidade A2

Resumo

Utilizamos 4 testemunhos sedimentares coletados no Atlântico Sudoeste para analisar as variações na circulação oceânica de correntes subsuperficiais, intermediárias e profundas ao longo do Holoceno e observar as suas relações com a circulação meridional do Atlântico (AMOC). A partir do diâmetro médio da fração silt entre 10 - 63 μm (sortable silt - \overline{SS}) e as razões elementares Fe/K e Fe/Ca, podemos inferir que o fluxo da Corrente do Brasil ao longo do Holoceno é enfraquecido, e apresenta um comportamento similar ao fluxo da Corrente Norte do Brasil (CB). Observamos também, que um comportamento antifásico entre a Corrente de Contorno Intermediária (CCI) e a Corrente de Contorno Profunda (CCP) parece ser condizente aos nossos dados, que expressam oscilações em escala de tempo multicientenária para os fluxos intermediários e profundos. Os dados geoquímicos por sua vez (razão Fe/K e Fe/Ca), refletem o aporte terrígeno crescente durante o Holoceno tardio e parecem responder de forma clara as mudanças na Zona de Convergência Intertropical (ZCIT).

Palavras-chave: Holoceno, Atlântico Sudoeste, sortable silt, Corrente do Brasil, Corrente de Contorno Intermediária, Corrente de Contorno Profunda, AMOC.

Abstract

We used 4 sedimentary records collected in the Southwest Atlantic to analyze the variations in the ocean circulation of subsurface, intermediate and deep currents along the Holocene and to observe their relations with the Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC). From the mean size of silt grains with size between 10 - 63 μm (sortable silt - \overline{SS}) and the ratios Fe / K and Fe / Ca, we can infer that the flow of the Brazil Current along the Holocene is weakened and presents a behavior similar to the flow of the Northern Brazil Current (BC). We also observed that an antiphase behavior between the Intermediate Western Boundary Current (IWBC) and the Deep Western Boundary Current (DWBC) seems to be consistent with our data, which express multicentury-scale oscillations for intermediate and deep flows. The geochemical data (Fe / K and Fe / Ca) reflect the increasing terrigenous contribution during the late Holocene and appear to change clearly in the Intertropical Convergence Zone (ITCZ).

Keywords: Holocene; Southwest Atlantic; sortable silt; Brazil Current; Western Boundary Current; Deep Western Boundary Current (DWBC); AMOC.

1. Introdução

A circulação meridional do Atlântico (AMOC) e os fluxos horizontais de calor, nutrientes, sal e carbono no Oceano Atlântico atuam como mecanismos fundamentais de controle do clima planetário (Dahl et al., 2005; Zhang e Delworth, 2005). Mudanças futuras na AMOC poderão levar a importantes impactos climáticos afetando, por exemplo, o sequestro de CO₂ realizado pelos oceanos e regimes de precipitação regionais e globais (Srokosz et al., 2012). No Atlântico Sul, o fluxo de saída para sul das águas frias e profundas do Atlântico Norte (Água Profunda do Atlântico Norte, APAN) é compensado pela entrada para norte de águas superficiais (50-500m) mais quentes e salgadas e, em níveis intermediários (500-1200m), de águas mais frias e menos salinas como a Água Intermediária Antártica (AIA) (Garzoli e Matano, 2011).

A circulação de larga escala do Atlântico Sul conta com a presença do Giro Subtropical, limitado meridionalmente ao sul pela Corrente do Atlântico Sul e pela Corrente Sul Equatorial (CSE) em seu limite norte; e a leste pela Corrente de Benguela e a oeste pela Corrente do Brasil (CB) (Stramma e England, 1999). A CB e sua equivalente para norte, a Corrente Norte do Brasil (CNB), que contribui em parte para o transporte líquido de águas em níveis superiores da AMOC, originam-se na bifurcação da CSE entre 10 e 15°S (Peterson e Stramma, 1991). Entre 10 e 28°S, o Atlântico Sudoeste, apresenta padrão hidrodinâmico complexo, com a oposição do fluxo para norte das águas intermediárias, transportadas pela Corrente de Contorno Intermediária (CCI), e dos fluxos das águas rasas e profundas, para sul, transportadas pela CB e Corrente de Contorno Profunda (CCP), respectivamente (Silveira et al., 2004). Este complexo sistema hidrodinâmico, controla os processos sedimentares do talude continental da margem SE brasileira, e confere aos sedimentos depositados nessa região assinaturas físicas e geoquímicas distintas (Mahiques et al., 2017), que se preservadas podem permitir a reconstituição da região no passado, através do uso de *proxies* em registros sedimentares marinhos.

Apesar de seu importante papel, o Atlântico SE ainda é uma das regiões onde o número de registros paleoceanográficos é reduzido, e o interesse pela Paleoceanografia do Atlântico SE recebeu um aumento significativo de estudos apenas nos últimos 15 anos (Chiessi, 2013). O principal foco dos estudos paleoceanográficos realizados nesta porção do Atlântico está na compreensão dos padrões de circulação superficial (0-100 m) e profunda (>2000 m) nos últimos 21 mil anos (ka), com foco no Último Máximo Glacial e no Deglacial (p.e., Oppo e Horowitz, 2000; Curry e Oppo, 2005; Lynch-Stieglitz et al., 2006; Toledo et al., 2007, 2008;

Nagai et al., 2010; Hendry et al., 2012; Chiessi et al., 2008, 2009, 2015; Tessin e Lund, 2013; Lund et al., 2015; Oppo et al., 2015; Wei et al., 2016; Howe et al., 2016), e no Holoceno (p.e., Mahiques et al., 2009; Nagai et al., 2009; Chiessi et al., 2010, 2014; Pivel et al., 2013; Razik et al., 2013; Bender et al., 2013; Lessa et al., 2014, 2016; Chapori et al., 2015; Albuquerque et al., 2016; Voigt et al., 2016).

De acordo Chiessi et al. (2014), as alterações na intensidade da AMOC são consideradas como a principal forçante das oscilações que ocorreram em escala de tempo secular na temperatura da superfície do mar (TSM) do Atlântico SE durante o Holoceno tardio, os autores apresentam a hipótese da existência de uma relação antifásica entre CB e CNB ao longo do Holoceno tardio, sendo que, o enfraquecimento na intensidade da CB teria sido caracterizado por anomalias negativas na TSM, conseqüentemente relacionadas a intensificação da AMOC, na qual em momentos de AMOC enfraquecida, anomalias positivas de TSM no Atlântico SE estariam relacionadas ao fortalecimento da CB em detrimento da CNB.

Uma relação antifásica na circulação oceânica em águas intermediárias e profundas durante a ocorrência de eventos de mudanças climáticas também é proposta entre a intensidade dos fluxos da CCI e CCP (Thornalley et al., 2013; Voigt et al., 2016; Rosenthal et al., 2013; Huang et al., 2014) onde, durante eventos de aquecimento no Hemisfério Norte e enfraquecimento da AMOC devido à baixa formação da APAN, a intensidade no fluxo da CCP diminui, enquanto no Hemisfério Sul, eventos de resfriamento relacionados a baixa insolação durante a primavera e inverno austral (Rosenthal et al., 2013) intensificam a formação da AIA em regiões de alta latitude do Hemisfério Sul (aproximadamente 60° S; Voigt et al., 2016). De acordo Voigt et al. (2016), períodos de maior formação da AIA estão associados a períodos de baixa formação da APAN e baixa intensidade dos fluxos da CCP, sendo que, os períodos mais marcados por esse comportamento antifásico estão entre 8.5 – 9 ka AP; 8 ka AP; 5 ka AP; 3.5 ka AP e 2.5 ka AP. A circulação da AIA no Atlântico Sul também foi investigada por Howe et al. (2016), e os autores identificaram que durante Holoceno médio a proporção da AIA aumentou em profundidades intermediárias (> 1050 m) em relação ao período deglacial.

Ao longo do Holoceno a circulação profunda no Atlântico Sul através da CCP foi interpretada a partir de oscilações na produção de águas frias, densas e profundas no Hemisfério Norte. Thornalley et al. (2013) e Mjell et al. (2015) analisaram variações no fluxo do sistema oceânico Islândia - Escócia que contribui para a formação da APAN, e inferiram

que durante o Holoceno inferior e tardio houve predominância de um fluxo enfraquecido, com a máxima força ocorrendo no Holoceno médio a ~7 ka AP, coerente ao observado por Hall et al. (2004) ao analisar oscilações em escala de tempo secular e milenar para a mesma região.

A complexidade e o impacto global de mudanças na AMOC, e o fato de modificações no fluxo de retorno dentro do Atlântico SE poderem, potencialmente, levar a alterações na AMOC, destacam a necessidade de uma melhor compreensão dos mecanismos envolvidos nas mudanças oceanográficas desta bacia oceânica. Portanto, compreender o papel do Atlântico SE na AMOC e os mecanismos por trás dessa complexa circulação ao longo das oscilações holocênicas, é uma importante chave para compreender o Atlântico Sul no âmbito das mudanças climáticas globais. Dessa forma, este trabalho tem como objetivo compreender o comportamento das correntes oceânicas subsuperficial, intermediária e profunda do Atlântico SE durante o Holoceno, através de uma abordagem *multi-proxy*, utilizando *proxies* sedimentológicos e geoquímicos para abordar questões como:

- Mudanças no fluxo da CB e CNB ao longo do Holoceno tardio e a possibilidade de ambas as correntes apresentarem tendências antifásicas;
- Mudanças no fluxo da CCI e CCP ao longo do Holoceno médio e tardio;
- Comportamento antifásico entre os fluxos da CCI e CCP;
- Oscilações paleoclimáticas na região sudoeste brasileira em relação as mudanças holocênicas na força da AMOC;

2. Área de estudo

A Bacia de Santos ocupa uma área total de mais de 275.000 km², está localizada na margem continental sul-sudeste brasileira, entre 23°- 28°S e se estende de Cabo Frio (RJ) a Florianópolis (SC) (Figura 1b). O talude continental da Bacia de Santos está limitado pela isóbata de 200 m de profundidade até o limite externo do Platô de São Paulo, com profundidades superiores a 3.000 m e apresenta em média uma largura de 120 km (Pereira e Feijó, 1994).

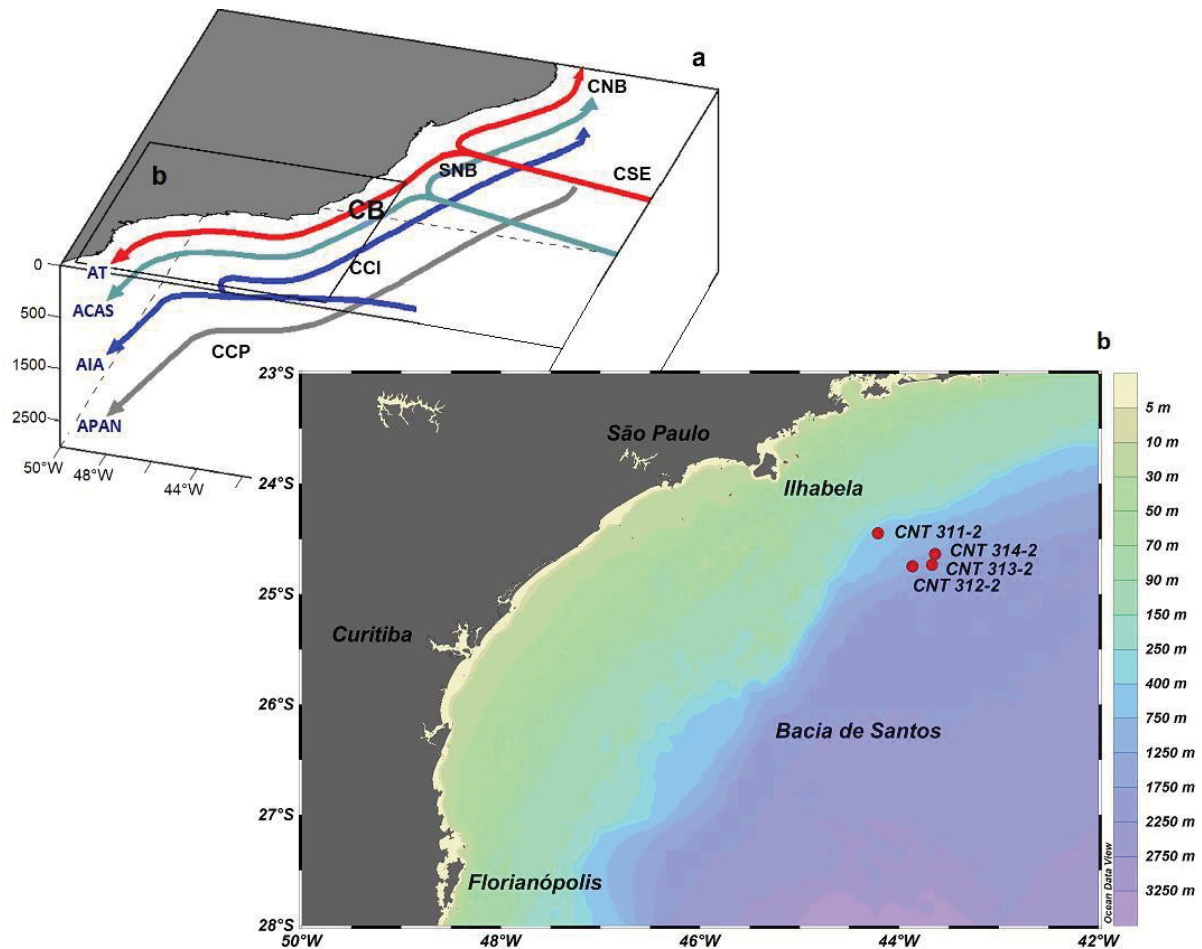


Figura 1. (a) Localização da área de estudo com a representação esquemática das correntes oceânicas e massas d'água transportadas ao longo da margem brasileira onde: Corrente Norte do Brasil (CNB), Corrente Sul Equatorial (CSE), Subcorrente Norte do Brasil (SNB), Corrente do Brasil (CB) transportando a Água Tropical (AT) e Água Central do Atlântico Sul (ACAS), Corrente de Contorno Intermediária (CCI) transportando a Água Intermediária Antártica (AIA) e Corrente de Contorno Profunda (CCP) transportando a Água Profunda do Atlântico Norte (APAN) (Adaptado de Soutelino et al., 2013); (b) Localização da Baía de Santos e estações de coleta dos testemunhos CNT 311-2; 312-2; 313-2 e 314-2.

A CB domina a hidrodinâmica superficial da margem continental SE brasileira, entre 20 - 28°S, fluindo para sul-sudoeste nos primeiros 500 m da coluna d'água com velocidades que podem variar entre $40\text{-}70\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ (Silveira et al., 2004). A CB transporta para sul a Água Tropical (AT - $T > 20^\circ\text{C}$, $S > 36,2$) em níveis superficiais e a Água Central do Atlântico Sul (ACAS - $6 < T^\circ\text{C} < 20$, $34 < S < 36$) em níveis pycnoclônicos entre 400 e 500 m (Silveira et al., 2000). Subjacente à CB, a CCI transporta a AIA ($3 < T^\circ\text{C} < 6$, $34,2 < S < 34,6$) nas porções intermediárias do talude continental (500 - 1200 m), fluindo para o norte em oposição à CB, com velocidades máximas de $30\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ em seu núcleo, localizado em aproximadamente 800 m de profundidade (Silveira et al., 2000; 2004; 2008). A CCI, se origina na porção sul da Baía de Santos (em aproximadamente 28°S) e, apenas quando atravessa o Alto de Cabo

Frio, se apresenta como uma corrente de contorno plenamente desenvolvida (Silveira et al., 2004). Abaixo da CCI, com interface entre 1500 - 1800 m (Silveira et al., 2015), a CCP flui para o sul, transportando a APAN (Stramma e England, 1999). A CCP tem como origem a região subpolar do Atlântico Norte (principalmente, no Mar da Groenlândia e no Mar do Labrador) e transporta águas do Hemisfério Norte para o Hemisfério Sul em níveis profundos com velocidades que podem variar de 2 a 10 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ (Silveira et al., 2015).

Os processos hidrodinâmicos atuantes na região são os principais fatores que controlam a produtividade primária e a distribuição sedimentar, promovendo diferenças nas taxas de sedimentação e fácies sedimentares (Mahiques et al., 2017). No talude continental, os processos sedimentares são influenciados principalmente pelo complexo sistema hidrodinâmico entre o transporte para norte da CCI, em oposição aos fluxos de transporte para sul da CB e CCP (Mahiques et al., 2017, Figura 1a).

3. Materiais e métodos

Quatro testemunhos curtos, CNT 311-2, 312-2, 313-2 e 314-2, foram coletados na margem continental SE brasileira na região da Bacia de Santos (Tabela 1, Figura 1b), com o auxílio de um *multiple corer* em dezembro de 2016, a bordo do N.Oc. Alpha Crucis, do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo (IOUSP). Os testemunhos foram sub-amostrados a bordo em intervalos regulares de 0,5 cm, nos primeiros 10 cm da coluna sedimentar, e posteriormente em intervalos regulares de 1 cm. As amostras foram congeladas e liofilizadas em laboratório.

Para interpretar as oscilações no fluxo de transporte das correntes oceânicas do Atlântico SE, definimos que o registro sedimentar CNT 311-2 representa a CB, por ter sido coletado na isóbata de influência desta corrente, assim como, o registro sedimentar CNT 312-2 representa a CCI e o registro sedimentar CNT 314-2 representa a zona de interface entre CCI e CCP, por fim, consideramos que o registro sedimentar CNT 313-2 representa a CCP (Tabela 1). Para associar os perfis batimétricos as zonas de influência das correntes oceânicas, utilizamos também o perfil de temperatura e salinidade medidos *in situ*.

Tabela 1. Coordenadas geográficas (latitude e longitude), profundidade da lâmina d'água (m) e o tamanho da coluna sedimentar recuperada (cm) em cada estação oceanográfica de coleta dos testemunhos utilizados neste trabalho.

Testemunho	Latitude	Longitude	Profundidade (m)	Recuperação sedimentar (cm)
CNT 311-2	24°27,040'S	44°12,734'W	432	18
CNT 312-2	24°44,993'S	43°51,920'W	1337	32
CNT 313-2	24°38,192'S	43°38,216'W	1557	33
CNT 314-2	24°44,244'S	43°41,474'W	1517	39

3.1 Cronologia

A cronologia dos testemunhos foi obtida a partir da datação radiométrica por AMS ^{14}C no laboratório Poznań Radiocarbon localizado na Polônia, em aproximadamente 10 mg de testas bem preservadas de foraminíferos planctônicos (*Globigerinoides ruber* e *Globigerinoides sacculifer*), na fração $>150\ \mu\text{m}$. As idades de radiocarbono foram calibradas com o software Calib v.7.1, utilizando a curva de calibração Marine13 (Reimer et al., 2013). Para garantir a consistência entre o nosso registro e outros registros sedimentares do Atlântico SE, o ΔR utilizado foi de 7 ± 200 anos seguindo a metodologia aplicada por Lund et al. (2015). A idade do topo dos testemunhos foi considerada como o ano de coleta, uma vez que a interface sedimento-água estava intacta no momento da coleta e apresentava foraminíferos bentônicos vivos (corados com rosa de bengala). A relação idade-profundidade foi inferida através de uma regressão linear simples, considerando a taxa de sedimentação constante.

3.2 Granulometria

Para a análise granulométrica, foi utilizado aproximadamente 2g de sedimento seco previamente descarboxado com ácido clorídrico 10%, em seguida a matéria orgânica foi removida adicionando peróxido de hidrogênio 10%. Durante cada etapa as amostras foram agitadas e posteriormente deixadas a decantar, após todo o procedimento as amostras foram lavadas com água destilada e armazenadas ainda úmidas.

O analisador de tamanho de partículas utilizado foi o Malvern Mastersizer 2000. Durante o procedimento foi adicionado às amostras aproximadamente 1 ml de pirofosfato de sódio 10%, em seguida o material foi inserido no analisador. A velocidade do agitador foi ajustada para 1000 rpm e o bombeamento para 1900 rpm. O ultrassom permaneceu ligado por

1 minuto a 40%, sendo em seguida desligado para a análise.

3.3 Sortable silt e calibração

Neste trabalho, mudanças no tamanho médio dos grãos de silte com tamanho entre 10 - 63 μm (dados em μm) são usados como *proxy* para mensurar a intensidade do fluxo de paleocorrentes de acordo McCave et al., (1995). Para cada amostra o \overline{SS} foi obtido através da média ponderada da porcentagem dos grãos com tamanho entre 10 - 63 μm de acordo McCave et al., (1995). Este *proxy* propõe que a deposição de sedimentos terrígenos inseridos neste intervalo de tamanho (10 - 63 μm) possui uma relação direta a velocidade de fluxo de transporte, onde quanto maior o tamanho médio do \overline{SS} , maior a intensidade da corrente aplicada sobre o grão (McCave et al., 1995). O \overline{SS} é utilizado para reconstruir de forma mais aproximada a variabilidade na intensidade dos fluxos, onde dados de medidores de correntes próximos de locais adequados para realizar a análise do tamanho de grão, são utilizados para a calibração do \overline{SS} , como proposto por McCave et al. (2017), pois a única tentativa de calibrar o tamanho médio de grãos à velocidade de fluxo diretamente, só havia sido feita anteriormente por Ledbetter (1986) através de grãos do tamanho médio entre 2 - 63 μm (não, no entanto, \overline{SS}).

A calibração do \overline{SS} adotada neste trabalho está baseada em 25 amostras de sedimentos superficiais (0 - 2 cm de profundidade) coletados entre a isóbata de 390 – 2.000 m de profundidade na Bacia de Campos (23°S e 39 – 41°W) a partir da realização do projeto HABITATS (Avaliação da Heterogeneidade Ambiental da Bacia de Campos), os dados foram obtidos utilizando o analisador a laser Malvern Mastersizer 2000 e podem ser encontrados no trabalho de Yamashita (2015). A média do \overline{SS} das 25 amostras de sedimentos superficiais (1 amostra em 391 m; 4 amostras de 400 – 550 m; 6 amostras de 550 – 1.000 m; 8 amostras de 1.000 – 1.500 m e 6 amostras de 1.500 – 2.000 m) foram relacionadas a média da velocidade de fluxos entre a isóbata de 50 e 1200 m na Bacia de Campos entre as coordenadas 22°42' S e 40°12' W, de acordo Silveira et al. (2015) a partir de dados medidos *in situ* durante o projeto “ProCAP-1000 - Programa de Capacitação tecnológica em Águas Profundas” (Anexo 1). Para realizar a calibração, os valores foram ajustados a partir de uma regressão com eixo principal reduzido (RMA), utilizada quando os erros das variâncias são proporcionais às variâncias das variáveis (McCave et al., 2017), neste caso, os erros para as velocidades de correntes são consideravelmente tão significativos quanto aqueles para o \overline{SS} , e por essa razão utilizamos uma RMA.

3.4 Razões Fe/K e Fe/Ca

As concentrações de Fe, K e Ca foram obtidas através do analisador de fluorescência de raios X - XRF DELTA Professional da Olympus, no Instituto Oceanográfico da USP. Neste método, cerca de 2 g de material seco foram inseridas em cápsulas isoladas para a leitura. O tempo de leitura para cada amostra foi de aproximadamente 5 minutos e a concentração dos elementos Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Zn, Sr e Zr puderam ser obtidas em mg kg^{-1} . A razão Fe/K foi utilizada como um *proxy* para observar se os sedimentos terrígenos aportados para a área de estudo foram formados sob condições climáticas úmidas (valores relativamente mais altos para a razão Fe/K), sujeitas a intemperismo químico intenso e transportados fluvialmente, ou secas, com menor intemperismo químico e transportados pelo vento (valores relativamente mais baixos para a razão Fe/K) (Govin et al., 2012). A razão Fe/Ca foi utilizada como um *proxy* para analisar o aporte terrígeno, pois Fe está associado aos componentes siliciclásticos do sedimento, enquanto Ca representa o conteúdo de carbonato presente no sedimento, desta forma, valores relativamente mais altos para a razão Fe/Ca indicam que o aporte terrígeno para a região foi mais intenso durante o determinado período (Govin et al., 2012).

4. Resultados

4.1 Calibração do sortable silt

A calibração adquirida através dos sedimentos superficiais, coletados na Bacia de Campos, fornece uma relação entre a média do SS e a média do fluxo escalar local medida *in situ* (U) igual a $\text{SS} = 0,14U + 18,335$, com $r = 0,89$ (Figura 2), sendo que a calibração realizada por McCave et al. (2017) utilizando o método analítico de velocidade de sedimentação (Sedigraph) através de sedimentos depositados abaixo de 2.000 m de profundidade no Hemisfério Norte e a calibração dos dados obtidos por Ledbetter (1986) utilizando o método analítico de contagem e dimensionamento de partículas (Coulter Counter) através de sedimentos coletados abaixo de 3.000 m de profundidade no Hemisfério Sul, apresentam relação similar com $r \geq 0,83$.

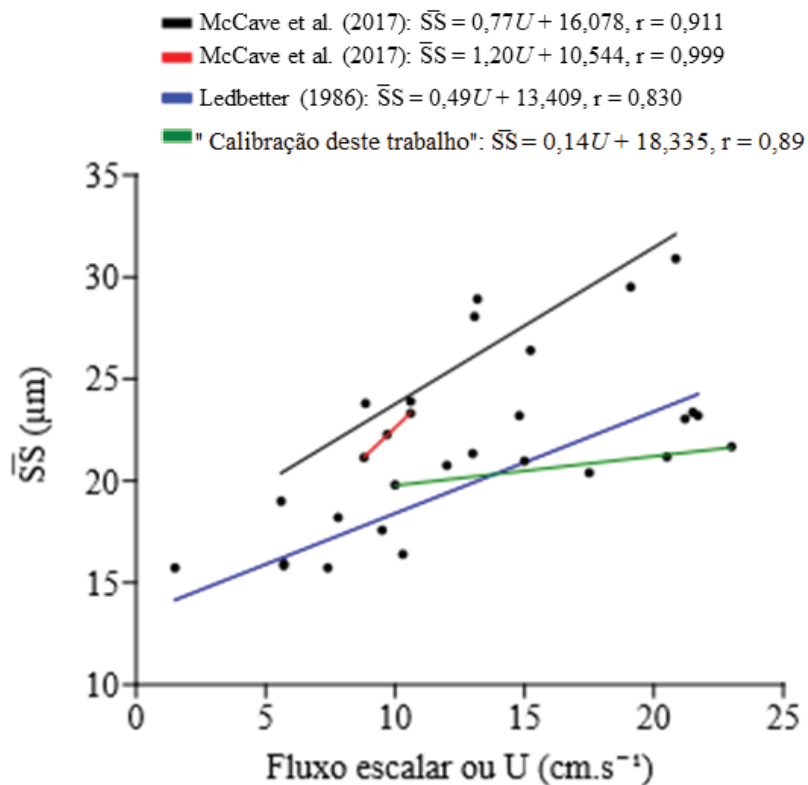


Figura 2. (Verde) Valores do sortable silt (\bar{SS}) obtidos pelo Projeto HABITATS (Avaliação da Heterogeneidade Ambiental da Bacia de Campos) e os valores de fluxo (cm.s^{-1}) disponíveis para a região da Bacia de Campos a partir dos dados de Silveira et al. (2015); (Azul) Valores do \bar{SS} obtidos por Ledbetter (1986) através de testemunhos coletados no Canal de Vema abaixo de 3.000 m de profundidade no Atlântico Sul e os valores de fluxo (cm.s^{-1}) obtidos através de medição in situ nas profundidades semelhantes à coleta dos testemunhos; (Vermelho) Valores do \bar{SS} obtidos por McCave et al. (2017) através de testemunhos coletados abaixo de 2.000 m de profundidade na região do Mar da Noruega e valores de fluxo (cm.s^{-1}) obtidos através de medidores de correntes próximos à coleta dos testemunhos; (Preto) Valores do \bar{SS} obtidos por McCave et al. (2017) através de testemunhos coletados abaixo de 2.000 m de profundidade na região do Mar de Labrador e valores de fluxo (cm.s^{-1}) obtidos através de medidores de correntes próximos a coleta dos testemunhos. Todas as relações foram realizadas através da regressão com eixo principal reduzido (RMA).

4.2 Proxies de reconstrução

A cronologia revela que todos os testemunhos apresentam idades holocênicas (Tabela 2). Assumindo que o topo dos registros representa o ano de coleta, as taxas de sedimentação linear obtidas encontram-se entre $3,35 \text{ cm.ka}^{-1}$ (CNT 313-2) a um máximo de $4,56 \text{ cm.ka}^{-1}$ (CNT 314-2) (Tabela 2).

Tabela 2. Idades de radiocarbono AMS e calibração das idades dos testemunhos.

Testemunho	Profundidade (cm)	¹⁴ C Idade ± 1σ (anos AP)	2σ cal. (anos cal AP)	Idade mediana (anos cal. AP)	Taxa de sedimentação (cm.ka ⁻¹)
CNT 311-2	15 - 16	4545 ± 35	4202 - 5287	4731	3,38
CNT 312-2	31 - 32	7680 ± 50	7701 - 8549	8136	3,93
CNT 313-2	38 - 39	10450 ± 60	11079 - 12408	11637	3,35
CNT 314-2	38 - 39	8410 ± 40	8482 - 9454	8979	4,56

O testemunho CNT 311-2, coletado a 432 m de profundidade (Tabela 1) representa os últimos 5,1 ka cal AP e apresenta taxa de sedimentação de 3,38 cm.ka⁻¹ (Tabela 2). Este testemunho está sob a influência da CB e representa o fluxo de transporte superficial e subsuperficial do Atlântico SE. O \overline{SS} para este testemunho varia entre 22 e 30 μ m com média de 25 μ m e apresenta uma tendência negativa ao longo do Holoceno tardio (Figura 3A). A razão Fe/K varia, ao longo do CNT 311-2, entre 3,20 e 4,63, com valor médio de 3,80, enquanto a razão Fe/Ca varia entre 0,22 e 0,37 com valor médio de 0,29 e ambas apresentam uma tendência para valores mais altos dentro do Holoceno tardio (Figura 3B,3C).

O testemunho CNT 312-2, coletado a 1337 m de profundidade (Tabela 1) apresenta taxa de sedimentação de 3,93 cm.ka⁻¹ e representa os últimos 8,1 ka cal AP (Tabela 2). Com base na isóbata de coleta deste testemunho, é possível definir que o mesmo está sob a influência da CCI. Os valores de \overline{SS} variam entre 18 e 24 μ m com média de 21 μ m e apresentam diversas oscilações ao longo do Holoceno médio e tardio com uma predominância para valores acima da média ao longo do Holoceno tardio (Figura 3D). A razão Fe/K varia entre 3,80 e 5,05 com média de 4,52, enquanto a razão Fe/Ca varia de 0,21 a 0,47 com média de 0,35 e ambas as razões mostram valores crescentes ao longo do Holoceno médio e tardio (Figura 3E, 3F).

Para o testemunho CNT 314-2, coletado a 1517 m de profundidade (Tabela 1), também sob influência da CCI, mas na interface CCI e CCP, o registro sedimentar cobre os últimos 9 ka cal AP, apresentando a maior taxa de sedimentação de 4,56 cm.ka⁻¹ (Tabela 2), e os menores tamanhos de \overline{SS} (entre 15 e 22 μ m com média de 19 μ m) dentre todos os testemunhos.

Os valores de \overline{SS} apresentam uma tendência crescente ao longo do Holoceno tardio, com valores acima da média durante esse período (Figura 3G). A razão Fe/K, ao longo do CNT 314-2 varia de 3,49 a 5,07 e apresenta valores médios de 4,47, enquanto a razão Fe/Ca varia entre 0,15 e 0,38 com valores médios de 0,28. Os valores para as razões Fe/K e

Fe/Ca apresentam uma tendência progressiva para valores mais altos ao longo do Holoceno médio e tardio, e acompanham de forma muito similar as tendências do testemunho CNT 312-2 também localizado na CCI (Figura 3H, 3I).

Por fim, o testemunho CNT 313-2, coletado a 1557 m de profundidade (Tabela 1), na zona de influência da CCP, representa os últimos 11,6 ka cal AP e apresenta taxa de sedimentação de $3,35 \text{ cm.ka}^{-1}$ (Tabela 2). O $\bar{S}\bar{S}$ varia entre 19 e 22 μm e apresenta média de 20 μm com valores relativamente mais altos durante o Holoceno médio (Figura 3J). Os valores de razão Fe/K variam entre 2,90 e 4,94 com média de 4,00, enquanto para Fe/Ca os valores estão entre 0,11 e 0,30 com valores médios de 0,21. As razões Fe/K e Fe/Ca do testemunho CNT 313-2 acompanham a mesma tendência dos demais testemunhos, para valores crescentes desde o Holoceno inferior (Figura 3K, 3L).

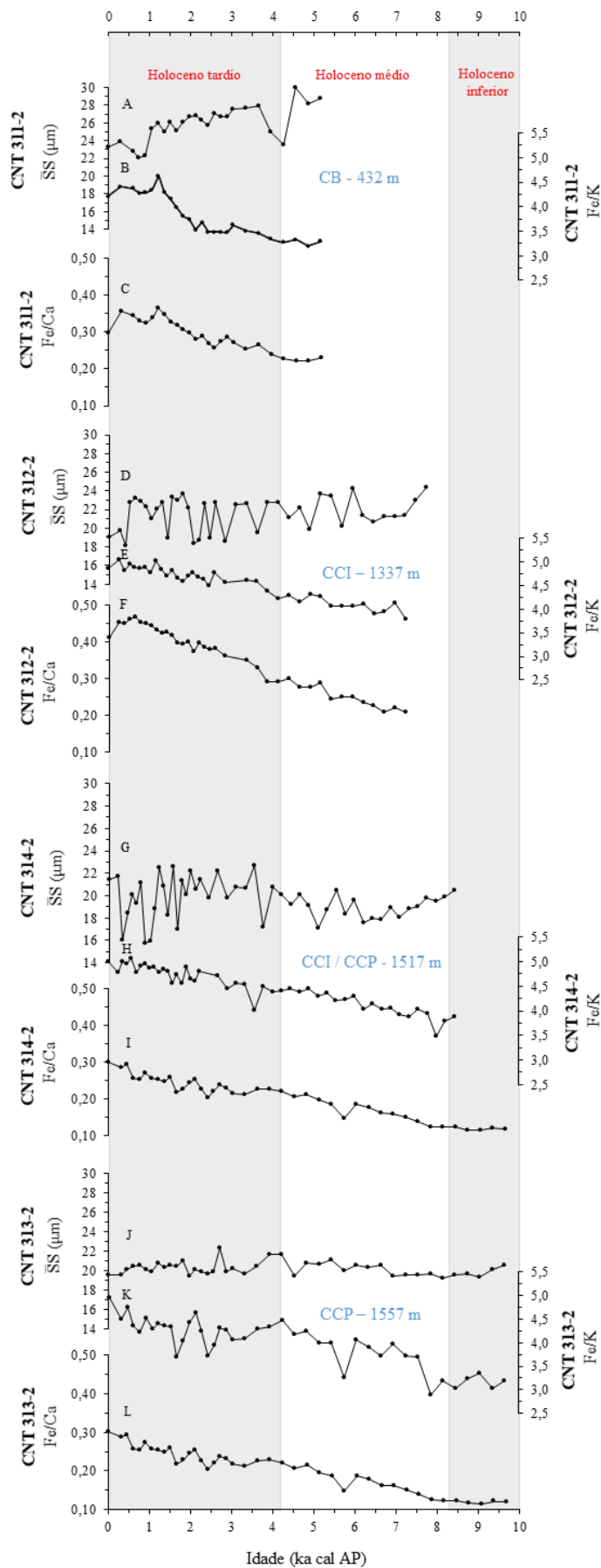


Figura 3. CNT 311-2 (432 m de profundidade): (A) Variações no tamanho médio do *sortable silt* (SS) em μm , (B) variações na razão Fe/K, (C) variações na razão Fe/Ca; CNT 312-2 (1337 m de profundidade): (D) variações no SS, (E) variações na razão Fe/K, (F) variações na razão Fe/Ca; CNT 314-2 (1517 m de profundidade): (G) variações no SS, (H) variações na razão Fe/K, (I) variações na razão Fe/Ca; CNT 313-2 (1557 m de profundidade): (J) variações no SS, (K) variações na razão Fe/K e (L) variações na razão Fe/Ca.

5. Discussão

5.1. Calibração do sortable silt

O *proxy* \overline{SS} considera que mudanças no tamanho dos grãos foram em magnitude, semelhantes as mudanças que ocorreram na intensidade do fluxo de paleocorrentes para qualquer local sob a ação de fluxos oceânicos intermediários e/ou profundos, por este motivo, McCave et al. (2017) realizaram uma calibração baseada em 12 pontos através de dados de medidores de correntes *in situ* medidos a longo prazo. Os autores observaram que calibrações locais baseadas no tamanho de grãos do topo de registros sedimentares e velocidade de fluxo medidas diretamente, eram necessárias para inferir velocidades mais absolutas a partir do \overline{SS} , isso porque, as tendências da calibração realizada divergiam entre si, provavelmente por causa das características particulares de erosão, vazão e deposição dos sedimentos nas diferentes regiões (McCave et al., 2017).

Os dados utilizados para a nossa calibração do \overline{SS} no Atlântico SE, estão limitados a um conjunto de dados baseado na média de velocidades medidas *in situ* entre 50 e 1.200 m de acordo Silveira et al. (2015). Considerando a limitação da nossa calibração, os valores para a velocidade absoluta devem ser abordados com cautela, no entanto, a calibração nos ajuda a utilizar o *proxy* \overline{SS} para a região, observando a correlação para \overline{SS} ($r = 0,892$) na Bacia de Campos. Considera-se também, que o uso do *proxy* é adequado para inferir intensidade de fluxos subsuperficiais (< 500 m) no Atlântico SE, pois, a média da velocidade dos fluxos entre 500 m na Bacia de Campos é de aproximadamente $20,50 \text{ cm.s}^{-1}$ de acordo Silveira et al. (2015), para uma média de $\overline{SS} = 21 \text{ }\mu\text{m}$, apenas um pouco abaixo da média de \overline{SS} obtida para o registro sedimentar CNT 311-2 (432 m), que é igual a $25 \text{ }\mu\text{m}$.

De acordo McCave et al. (2006), dos três métodos analíticos mais utilizados para obter tamanho de grãos finos, a velocidade de sedimentação (Sedigraph) deve ser o método mais preciso, e contadores de partículas (por exemplo, Coulter Counter) podem ser uma alternativa, entretanto, os autores não consideram a utilização do método analítico a laser como uma das opções mais recomendáveis, devido ao risco em se considerar tamanho de grãos mais finos (como argila grossa) em maiores sedimentos maiores (como silte grosseiro). Considerando a limitação do método analítico abordada por McCave et al. (2006), notamos que a correlação resultante da calibração para a Bacia de Campos demonstra que a utilização do laser (Malvern Mastersizer 2000) para obter o \overline{SS} ainda que não considerado como o mais recomendável, não apresenta correlação com valores discrepantes quando comparado as

calibrações realizadas por McCave et al. (2017) e Ledbetter (1986).

5.2 *Variações na intensidade da CB, CCI e CCP na margem SE brasileira no Holoceno médio e tardio*

Ao longo do Holoceno, mudanças nos valores de \overline{SS} obtidos em registros sedimentares marinhos coletados em 24°S no talude continental da margem SE brasileira, evidenciam variações na intensidade das correntes oceânicas dessa região. Observando a circulação oceânica da região e considerando o perfil batimétrico no qual os testemunhos foram coletados, os dados serão discutidos seguindo a estrutura hidrodinâmica local, sendo: CB para fluxos subsuperficiais, CCI para fluxos intermediários e CCP para fluxos profundos.

Os valores de \overline{SS} obtidos no testemunho CNT 311-2, coletado no núcleo da CB (452 m de lâmina d'água) sugerem um enfraquecimento progressivo desta corrente desde o Holoceno médio (diminuição progressiva do \overline{SS} , Figura 4A). Variações na intensidade CB ao longo do Holoceno foram observadas previamente por estudos paleoceanográficos realizados na plataforma continental SE brasileira (Lessa et al., 2014, 2016; Nagai et al., 2009) e no talude continental uruguaio (Chiessi et al., 2014). A ocorrência de variabilidade centenária (ca. 170 anos) na intensidade da CB também foi reportada por Chiessi et al. (2014), e relacionada a mudanças na AMOC. Nossos dados, no entanto, não apresentam resolução temporal suficiente para confirmar a existência da variabilidade centenária, mas sugerem que a CB apresentou enfraquecimento em curtos períodos de tempo entre aproximadamente 4 e 3,6 ka cal AP e entre 1,1 e 0,3 ka cal AP (Figura 4A).

O enfraquecimento progressivo da CB desde o Holoceno médio foi também observado por Chiessi et al. (2014), com a diminuição progressiva da temperatura da superfície do mar (TSM) no Atlântico SE (Figura 4B). Segundo estes autores, anomalias negativas (positivas) de TSM nesta região estariam relacionadas a um enfraquecimento (intensificação) da CB. Chiessi et al. (2014), também propuseram que ao longo do Holoceno tardio, o transporte da CB estaria em anti-fase com CNB e, conseqüentemente, com a AMOC. Este comportamento antifásico entre CB e CNB, entretanto, é incondizente ao nosso registro para variações no fluxo da CB (Figura 4A), pois analisando a curva de TSM de Chiessi et al. (2014, Figura 4B), observamos que anomalias positivas de TSM condizem com o enfraquecimento da CB que, por sua vez, parece acompanhar as oscilações da CNB de acordo aos dados de Taniguchi (2015, Figura 4C). O enfraquecimento progressivo, tanto da CB quanto da CNB, ao longo do Holoceno tardio, parece indicar que ambas as correntes estão associadas às oscilações na

AMOC, e refletem o enfraquecimento da mesma de forma mais acentuada a partir de $2 ka cal$ AP (Figura 4A, 4C), sendo que este comportamento poderia então estar associado à teoria do enfraquecimento da AMOC proposta por alguns trabalhos (p.e., Srokosz et al., 2012; Chen e Tung, 2018; Liu et al., 2017), mas não abordada neste estudo, pois os nossos registros não apresentam resolução temporal suficiente para isso.

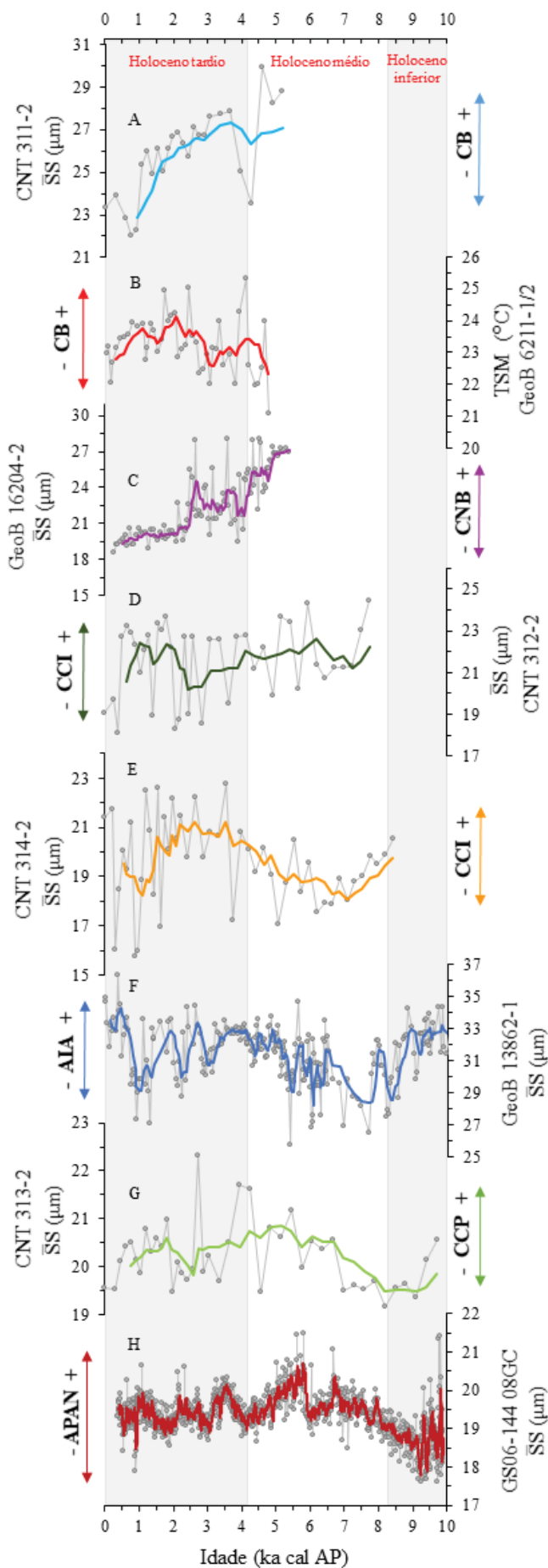


Figura 4. (A) Variações no tamanho médio do *sortable silt* (SS) em μm para o testemunho CNT 311-2 representando a CB; (B) Variações na temperatura da superfície do mar (TSM) em $^{\circ}\text{C}$ para a CB, obtidas pela razão Mg/Ca realizada a partir de amostras de *G. ruber w* de acordo Chiessi et al. (2014); (C) Variações do SS para o testemunho GeoB 16204-2 representando a CNB de acordo Taniguchi (2015); (D) Variações do SS para o testemunho CNT 312-2 representando a CCI; (E) Variações do SS para o testemunho CNT 314-2 representando a CCI mas na zona de interface CCI/CCP; (F) Variações do SS para o testemunho GeoB 13862-1 representando a CCI através de oscilações na formação da AIA de acordo Voigt et al. (2016); (G) Variações do SS para o testemunho CNT 313-2 representando a CCP; (H) Variações do SS para o testemunho GS06-14408GC representando a CCP através de oscilações na formação da APAN de acordo Mjell et al. (2015). Todos os perfis estão em escala otimizada com média móvel de 5 períodos.

Seguindo a estrutura hidrodinâmica moderna do Atlântico SE, entre 20° e 28°S, no Holoceno médio e tardio a CCI flui para norte, entre 500 e 1500 m, abaixo da CB. Os dados de \overline{SS} apontam para o enfraquecimento da CCI em aproximadamente 7 ka cal AP, e intensificação progressiva ao longo do Holoceno médio (a partir de 6 ka cal AP; Figura 4D, 4E). Durante o Holoceno tardio, os dados de \overline{SS} apontam para o enfraquecimento da CCI em ~ 4 ka cal AP. A intensidade da CCI nos últimos 8 ka cal AP, é ainda marcada por variabilidade de escala de tempo multicentenária (Figura 4D, 4E).

O fluxo menos intenso da CCI por volta de 7 ka cal AP (Figura 4D, 4E) parece ser condizente ao observado por Voigt et al. (2016) em torno de 1500 m, sendo que, o registro sedimentar utilizado pelos autores representa a influência da Água Profunda Circumpolar Superior (APCS) e AIA no norte da Península Antártica (Figura 4F). A intensificação progressiva da CCI a partir de 6 ka cal AP também acompanha as oscilações descritas por Voigt et al. (2016), assim como, o enfraquecimento do fluxo em ~ 4 ka cal AP.

O controle na intensidade de fluxo da CCI, entretanto, ainda é um tema pouco debatido, e neste caso, propomos que este fluxo possa ser diretamente influenciado pelo aumento no volume e formação da AIA em regiões de alta latitude do Hemisfério Sul (aproximadamente 60° S). O aumento na formação da AIA estaria associado à baixa insolação durante a primavera e inverno na região (Voigt et al., 2016; Rosenthal et al., 2013; Howe et al., 2016) resultando em períodos mais frios para o Hemisfério Sul (Renssen et al., 2005). Atualmente é proposto que durante eventos de aquecimento no Hemisfério Norte e enfraquecimento da AMOC devido à baixa formação da APAN, o Hemisfério Sul teria experimentado períodos mais frios e a formação da AIA teria se intensificado (Thornalley et al., 2013; Voigt et al., 2016; Rosenthal et al., 2013; Huag et al., 2014; Howe et al., 2016), o que consideramos como um possível mecanismo desencadeador para os fluxos mais intensos da CCI.

Em oposição ao fluxo da CCI, entre 1500 - 1800 m, se inicia o transporte da CCP em direção sul, medida no testemunho CNT 313-2 (1557 m de lâmina d'água). Os dados de \overline{SS} sugerem que o fluxo da CCP foi mais intenso durante o Holoceno médio, em relação ao Holoceno inferior e tardio, com oscilações em escala de tempo multicentenária (Figura 4G). Mudanças holocênicas na intensidade da CCP são exploradas em alguns trabalhos (p.e., Mjell et al., 2015; Thornalley et al., 2013; Hall et al., 2004) e, de maneira geral, são associadas as oscilações na formação da APAN em escalas de tempo multimilenárias (1 a 2 ka), geralmente relacionadas as condições climáticas regionais.

O fortalecimento da CCP durante o Holoceno médio está em conformidade com os dados obtidos por Mjell et al. (2015, Figura 4H) e Thornalley et al. (2013) para o sistema oceânico Islândia – Escócia, que contribui para a formação da APAN no Hemisfério Norte, o mesmo também é observado por Hall et al. (2004) em fluxos profundos sob influência da APAN.

Considerando que à baixa insolação durante a primavera e inverno austral influenciam para o aumento no volume e formação da AIA, e que aparentemente essas variações no Hemisfério Sul respondem à baixa insolação no verão boreal, levando ao enfraquecimento na força da AMOC (Wanner et al., 2015), observamos as mudanças no fluxo da CCP (Figura 4G, 4H) junto as mudanças no fluxo da CCI (Figura 4D, 4E, 4F), e concluímos que ao longo do Holoceno ocorre uma relação antifásica entre fluxos intermediários de origem sul (CCI) e fluxos profundos de norte (CCP) no Atlântico SE, e que essa relação antifásica pode ser observada com mais clareza ao longo do Holoceno médio.

Por fim, observamos que os padrões de circulação oceânica no Atlântico SE são de fato complexos, e as oscilações no transporte das paleocorrentes ao longo do Holoceno demonstram que a dinâmica da região está interligada a processos globais, como forçantes climáticas (insolação) e oceânicas (circulação da AMOC), sendo que, a circulação da AMOC não depende unicamente dos fluxos profundos formados no Hemisfério Norte, mas também de fluxos subsuperficiais e intermediários vindos do Atlântico Sul, que demonstram como a região não é apenas um canal passivo para águas inter-hemisféricas. Em resumo, os nossos dados demonstram que as variações no fluxo da CB acompanham as variações no fluxo da CNB enquanto, as oscilações no transporte da CCI e CCP ao longo do Holoceno parecem apresentar um comportamento antifásico em escala de tempo multicentenária.

5.3 Oscilações paleoclimáticas na região sudoeste brasileira ao longo do Holoceno

As mudanças observadas nas razões elementares (i.e., razão Fe/Ca e razão Fe/K) obtidas nos nossos registros, permitiram inferir sobre mudanças no regime de precipitação regional durante o Holoceno. A fim de analisar oscilações paleoclimáticas na região sudoeste brasileira e sua relação as mudanças na força da AMOC, abordaremos essa discussão seguindo a ordem da estrutura hidrodinâmica da região.

A partir das concentrações de metais, em particular de razões elementares, Mahiques et al. (2017) identificaram, na margem SE brasileira (~24°S), a extensão da dispersão de sedimentos terrígenos da plataforma continental até o talude superior. Segundo estes autores, as distintas assinaturas geoquímicas inorgânicas encontradas nos sedimentos dessa região refletem o transporte de sedimentos de proveniências distintas pelo fluxo norte da CCI, em comparação com os fluxos para o sul da CB e da CCP. Em particular, a razão (Fe/K), na qual o potássio está associado à illita, argilomineral formado em regiões com intenso intemperismo químico (Petschick et al., 1996), e transportada das regiões tropicais do N/NE do Brasil, para a margem continental SE brasileira pela CB (Nagai et al., 2014). Dessa forma, a razão Fe/K poderia ser aplicada como um *proxy* para distinguir fluxos para sul, da CB e CCP, dos fluxos para norte, da CCI. No entanto, Mahiques et al. (2017) não encontraram distinção clara dos fluxos, uma vez que esta razão apresentou valores relativamente mais baixos na plataforma externa e no talude superior, sob influência da CB e CCI, e maiores no talude inferior, sob a influência da CCP. Ainda assim, nas margens continentais do Atlântico Sul, a razão Fe/K apresenta valores relativamente mais altos em sedimentos superficiais de regiões tropicais da África e do Brasil, e valores relativamente mais baixos em regiões mais secas (Govin et al., 2012), ou seja, valores relativamente mais altos (baixos) da razão Fe/K indicam condições relativamente mais úmidas (secas) no continente adjacente.

Anomalias positivas na TSM do Atlântico SE são associadas a intensificação da precipitação no sudeste brasileiro (Chiessi et al., 2014), e mudanças no aporte terrígeno dos sedimentos, principalmente por aporte fluvial, também foram observadas por Arz et al. (1998) ao utilizar Fe e Ti como *proxies* para condições continentais mais úmidas no nordeste do Brasil, que também estava associada a TSM elevada. Com base nos padrões climáticos atuais, se considerarmos que anomalias positivas na TSM do Atlântico SE estão associadas a intensificação da precipitação na região, valores mais altos para as razões Fe/K e Fe/Ca são esperados.

Observando nossos dados, notamos que os últimos 9 ka cal AP apresentam aumento progressivo nos valores da razão Fe/K (Figuras 5B, 5D, 5F, 5H) e Fe/Ca (Figuras 5C, 5E, 5G, 5I), sugerindo um aumento no aporte de sedimentos terrígenos do continente adjacente. Levando em consideração que durante o Holoceno, as oscilações do nível médio do mar não foram grandes o suficiente para alterar a distância entre a área fonte (continente adjacente) e a nossa área de estudo (Gyllencreutz et al., 2010). Concentrações de Fe/K e Fe/Ca mais baixas ao longo do Holoceno médio, sugerem que as condições climáticas para a região SE brasileira

eram relativamente mais secas, provavelmente devido a posição mais a norte da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), enquanto no Holoceno tardio, as variações nas concentrações de Fe/K e Fe/Ca ilustram um cenário diferente, neste caso, as concentrações começam a aumentar progressivamente e refletem a migração para sul da ZCIT, intensificando a precipitação na região (Huag et al., 2001).

O aumento do aporte terrígeno na plataforma continental sul brasileira também foi evidenciado por Mahiques et al. (2008), principalmente dentro dos últimos 3 ka cal AP, no qual os autores associam ao estabelecimento das modernas condições climáticas. O aumento da umidade para a região SE brasileira em torno de 2,5 ka cal AP, também é mencionado por Araújo et al. (2005), ao resumir as condições climáticas atuais da região. Além do mais, a migração para sul da ZCIT também foi observada por Huag et al. (2001) ao observar tendência negativa as concentrações de Ti na Bacia de Cariaco localizada na Venezuela (Figura 5A), mostrando a migração da ZCIT de norte para sul ao longo do Holoceno. Neste contexto, a migração para sul da ZCIT ao longo do Holoceno tardio, parece ser a melhor explicação para o comportamento progressivo nos valores da razão Fe/K e Fe/Ca dos nossos testemunhos, mesmo as alterações na intensidade da AMOC sendo consideradas como a principal forçante de oscilações em escala de tempo secular para a TSM do Atlântico SE durante o Holoceno tardio (Chiessi et al., 2014). Uma vez que nossos resultados para Fe/K e Fe/Ca expressam apenas o aumento do aporte terrígeno ao longo do Holoceno, e não apresentam resolução temporal suficiente para observar variações em escala de tempo secular.

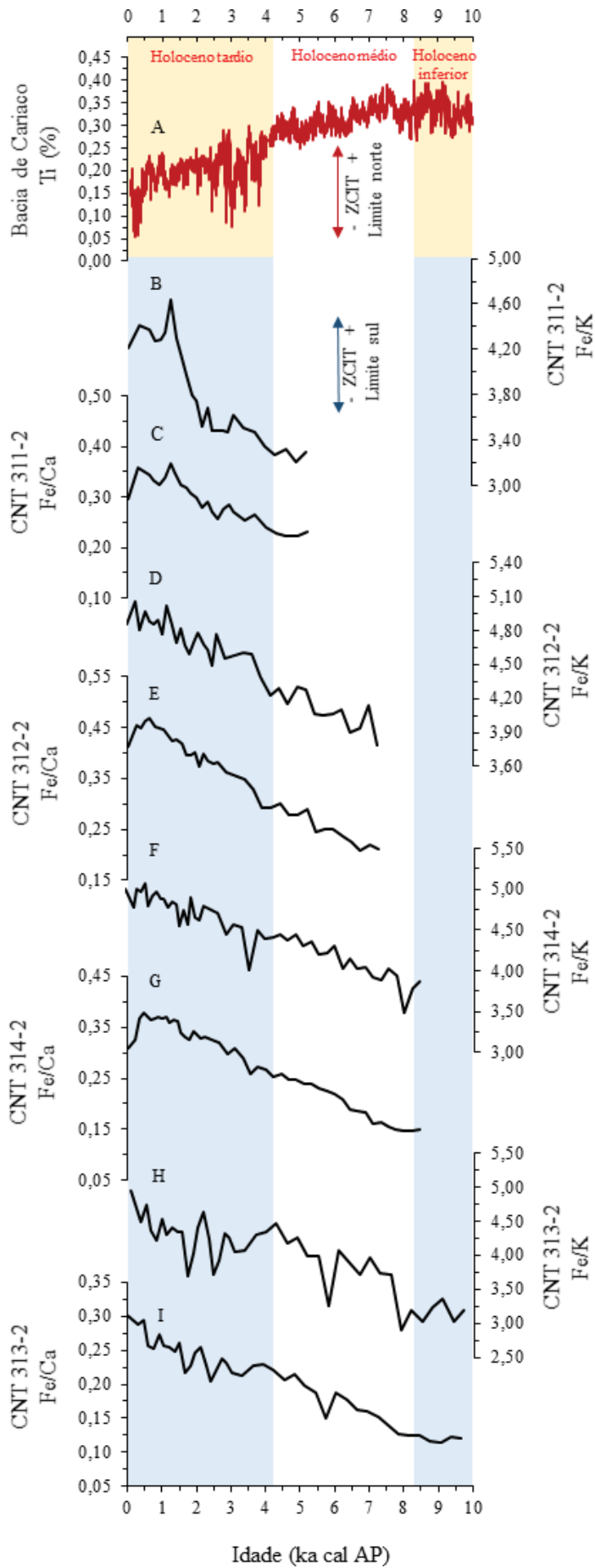


Figura 5. (A) Variações na porcentagem de Ti (%) para a Bacia de Cariaco (Venezuela) de acordo Huag et al. (2001); CNT 311-2: Variações na razão Fe/K (B) e Fe/Ca (C); CNT 312-2: Variações na razão Fe/K (D) e Fe/Ca (E); CNT 314-2: Variações na razão Fe/K (F) e Fe/Ca (G); CNT 313-2: Variações na razão Fe/K (H) e Fe/Ca (I).

6. Conclusão

Analisar as mudanças no fluxo das correntes oceânicas que compõem a hidrodinâmica do Atlântico SE, nos levou a questões além do previsto, pois observamos que o uso do *proxy* \overline{SS} é adequado para mensurar tendências de fluxo (intenso/menos intenso). Ao observar as variações no fluxo das correntes, observamos que os nossos registros sedimentares não respondem a relação antifásica entre CB e CNB, e o comportamento da CB mostrou-se similar ao da CNB, onde ambas apresentam um fluxo enfraquecido, que pode estar refletindo o enfraquecimento da AMOC, entretanto, os nossos dados não apresentam resolução temporal suficiente para abordar essa teoria. Um cenário contrário é encontrado para os fluxos da CCI e CCP, que apresentam comportamento antifásico e oscilações multicentenária, comprovando que o Atlântico SE exerce um papel sobre o controle global nos fluxos de calor, nutrientes e sal. Os dados geoquímicos por sua vez (razão Fe/K e Fe/Ca), não respondem de forma direta a essa relação da circulação da AMOC e o clima da região SE do Brasil, e parecem responder as mudanças holocênicas do clima no Hemisfério Sul, como ZCIT.

Referências

- ALBUQUERQUE, A. L.; MEYERS, P.; BELEM, A. L.; et al. Mineral and elemental indicators of post-glacial changes in sediment delivery and deposition under a western boundary upwelling system (Cabo Frio, southeastern Brazil). **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 445, p. 72–82, 2016.
- ARAÚJO, A. G. M.; NEVES, W. A.; PILÓ, L. B.; ATUI, J. P. V. Holocene Dryness and Human Occupation in Brazil During the “Archaic Gap”. **Quaternary Research**, v. 64, n. 03, p. 298–307, 2005.
- ARZ, H. W.; PÄTZOLD, J.; WEFER, G. Correlated Millennial-Scale Changes in Surface Hydrography and Terrigenous Sediment Yield Inferred from Last-Glacial Marine Deposits off Northeastern Brazil. **Quaternary Research**, v. 50, n. 02, p. 157–166, 1998.
- BENDER, V. B.; HANEBUTH, T. J. J.; CHIESSI, C. M. Holocene shifts of the Subtropical Shelf Front off southeastern South America controlled by high and low latitude atmospheric forcings. **Paleoceanography**, v. 28, n. 3, p. 481–490, 2013.
- CALADO, L.; GANGOPADHYAY, A.; DA SILVEIRA, I. C. A. Feature-oriented regional modeling and simulations (FORMS) for the western South Atlantic: Southeastern Brazil region. **Ocean Modelling**, v. 25, n. 1–2, p. 48–64, 2008.
- CHAPORI, N. G.; CHIESSI, C. M.; BICKERT, T.; LAPRIDA, C. Sea-surface temperature reconstruction of the Quaternary western South Atlantic: New planktonic foraminiferal correlation function. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 425, p. 67–75, 2015.
- CHEN, X.; TUNG, K.-K. Global surface warming enhanced by weak Atlantic overturning circulation. **Nature**, v. 559, n. 7714, p. 387–391, 2018.
- CHIESSI, C. M. Late Quaternary paleoceanography of the western South Atlantic: recent achievements and future research directions. **Palcomm workshop reports**, September, 2013.
- CHIESSI, C. M. Ocean circulation and climate variability in the western South Atlantic and eastern South America during the last deglaciation. **Fachbereich Geowissenschaften**, v. Doktorgrad, n. April, p. 98, 2008.
- CHIESSI, C. M.; MULITZA, S.; GROENEVELD, J.; et al. Variability of the Brazil Current during the late Holocene. (G. Fischer & G. Wefer, Orgs) **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 415, n. 13, p. 28–36, 2014.
- CHIESSI, C. M.; MULITZA, S.; MOLLENHAUER, G.; et al. Thermal evolution of the western South Atlantic and the adjacent continent during Termination 1. **Climate of the Past**, v. 11, n. 6, p. 915–929, 2015.
- CHIESSI, C. M.; MULITZA, S.; PÄTZOLD, J.; WEFER, G. How different proxies record precipitation variability over southeastern South America. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 9, 2010.
- CHIESSI, C. M.; MULITZA, S.; PÄTZOLD, J.; WEFER, G.; MARENGO, J. A. Possible

impact of the Atlantic Multidecadal Oscillation on the South American summer monsoon. **Geophysical Research Letters**, v. 36, n. 21, p. 1–5, 2009.

CURRY, W. B., & OPPO, D. W. Glacial water mass geometry and the distribution of $\delta^{13}\text{C}$ of ΣCO_2 in the western Atlantic Ocean. **Paleoceanography**, v. 20, n. 1, 2005.

DAHL, K. A.; BROCCOLI, A. J.; STOUFFER, R. J. Assessing the role of North Atlantic freshwater forcing in millennial scale climate variability: A tropical Atlantic perspective. **Climate Dynamics**, v. 24, n. 4, p. 325–346, 2005.

GARZOLI, S. L.; MATANO, R. The South Atlantic and the Atlantic Meridional Overturning Circulation. **Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography**, v. 58, n. 17–18, p. 1837–1847, 2011.

GOVIN, A.; HOLZWARTH, U.; HESLOP, D.; et al. Distribution of major elements in Atlantic surface sediments (36°N–49°S): Imprint of terrigenous input and continental weathering. **Geochemistry, Geophysics, Geosystems**, v. 13, n. 1, p. 23, 2012.

GYLLENCREUTZ, R.; MAHIQUES, M. M.; ALVES, D. V. P.; WAINER, I. K. C. Mid- to late-Holocene paleoceanographic changes on the southeastern Brazilian shelf based on grain size records. **The Holocene**, v. 20, n. 6, p. 863–875, 2010.

HALL, I. R.; BIANCHI, G. G.; EVANS, J. R. Centennial to millennial scale Holocene climate-deep water linkage in the North Atlantic. **Quaternary Science Reviews**, v. 23, n. 14–15, p. 1529–1536, 2004.

HENDRY, K. R.; ROBINSON, L. F.; MEREDITH, M. P.; et al. Abrupt changes in high-latitude nutrient supply to the Atlantic during the last glacial cycle. **Geology**, v. 40, n. 2, p. 123–126, 2012.

HOWE, J. N. W.; PIOTROWSKI, A. M.; OPPO, D. W.; et al. Antarctic intermediate water circulation in the South Atlantic over the past 25,000 years. **Paleoceanography**, v. 31, n. 10, p. 1302–1314, 2016.

HAUG, G. H., HUGHEN, K. A., SIGMAN, D. M., PETERSON, L. C., & RÖHL, U. Southward migration of the intertropical convergence zone through the Holocene. **Science**, v. 293, n. 5533, p. 1304–1308, 2001.

HUANG, K.-F.; OPPO, D. W.; CURRY, W. B. Decreased influence of Antarctic intermediate water in the tropical Atlantic during North Atlantic cold events. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 389, p. 200–208, 2014.

LEDBETTER, M. T. A late Pleistocene time-series of bottom-current speed in the Vema Channel. **Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology**, 53(1), 97–105, 1986.

LESSA, D. V.; VENANCIO, I. M.; DOS SANTOS, T. P.; et al. Holocene oscillations of Southwest Atlantic shelf circulation based on planktonic foraminifera from an upwelling system (off Cabo Frio, Southeastern Brazil). **The Holocene**, v. 26, n. 8, p. 1175–1187, 2016.

LIU, W.; XIE, S.-P.; LIU, Z.; ZHU, J. Overlooked possibility of a collapsed Atlantic Meridional Overturning Circulation in warming climate. **Science Advances**, v. 3, n. 1, 2017.

LUND, D. C.; TESSIN, A. C.; HOFFMAN, J. L.; SCHMITTNER, A. Southwest Atlantic water

- mass evolution during the last deglaciation. **Paleoceanography**, v. 30, n. 5, p. 477–494, 2015.
- LYNCH-STIEGLITZ, J.; CURRY, W. B.; OPPO, D. W.; et al. Meridional overturning circulation in the South Atlantic at the last glacial maximum. **Geochemistry, Geophysics, Geosystems**, v. 7, n. 10, 2006.
- DE MAHIQUES, M. M.; COARACY WAINER, I. K.; BURONE, L.; et al. A high-resolution Holocene record on the Southern Brazilian shelf: Paleoenvironmental implications. **Quaternary International**, v. 206, n. 1–2, p. 52–61, 2009.
- DE MAHIQUES, M. M.; HANEBUTH, T. J. J.; NAGAI, R. H.; et al. Inorganic and organic geochemical fingerprinting of sediment sources and ocean circulation on a complex continental margin (São Paulo Bight, Brazil). **Ocean Science**, v. 13, n. 2, p. 209–222, 2017.
- MARCOTT, S. A.; SHAKUN, J. D.; CLARK, P. U.; MIX, A. C. A Reconstruction of Regional and Global Temperature for the Past 11,300 Years. **Science**, v. 339, n. 6124, p. 1198–1201, 2013.
- MCCAIVE, I. N., HALL, I. R., & BIANCHI, G. G. Laser vs. settling velocity differences in silt grain-size measurements: estimation of palaeocurrent vigour. **Sedimentology**, v. 53, n. 4, p. 919–928, 2006.
- MCCAIVE, I. N.; MANIGHETTI, B.; ROBINSON, S. G. Sortable silt and fine sediment size/composition slicing: Parameters for palaeocurrent speed and palaeoceanography. **Paleoceanography**, v. 10, n. 3, p. 593–610, 1995.
- MCCAIVE, I. N.; THORNALLEY, D. J. R.; HALL, I. R. Relation of sortable silt grain-size to deep-sea current speeds: Calibration of the ‘Mud Current Meter’. **Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers**, v. 127, n. May, p. 1–12, 2017.
- MJELL, T. L.; NINNEMANN, U. S.; ELDEVIK, T.; KLEIVEN, H. K. F. Holocene multidecadal- to millennial-scale variations in Iceland-Scotland overflow and their relationship to climate. **Paleoceanography**, v. 30, n. 5, p. 558–569, 2015.
- NAGAI, R. H., LOURENÇO, R. A., BÍCEGO, M. C., & MAHIQUES, M. M. D. Paleoproductivity changes during the Late Quaternary in the Southeastern Brazilian upper continental margin of the Southwestern Atlantic. **Brazilian Journal of Oceanography**, 58(SPE1), 31–41, 2010.
- NAGAI, R. H.; SOUSA, S. H. M.; BURONE, L.; MAHIQUES, M. M. Paleoproductivity changes during the Holocene in the inner shelf of Cabo Frio, southeastern Brazilian continental margin: Benthic foraminifera and sedimentological proxies. **Quaternary International**, v. 206, n. 1–2, p. 62–71, 2009.
- NAGAI, R. H., FERREIRA, P. A., MULKHERJEE, S., MARTINS, M. V., FIGUEIRA, R. C. L., SOUSA, S. H. M., & MAHIQUES, M. M. Hydrodynamic controls on the distribution of surface sediments from the southeast South American continental shelf between 23 S and 38 S. **Continental shelf research**, 89, 51–60, 2014.
- DE OLIVEIRA LESSA, D. V.; RAMOS, R. P.; BARBOSA, C. F.; et al. Planktonic foraminifera in the sediment of a western boundary upwelling system off Cabo Frio, Brazil. **Marine Micropaleontology**, v. 106, p. 55–68, 2014.

OPPO, D. W. Glacial deep water geometry: South Atlantic benthic foraminiferal Cd / Ca and / $\delta^{53}\text{C}$ evidence. **Paleoceanography and Paleoclimatology**, v. 15, n. 2, p. 147-160, 2000.

OPPO, D. W., CURRY, W. B., & MCMANUS, J. F. What do benthic $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ data tell us about Atlantic circulation during Heinrich Stadial 1?. **Paleoceanography**, v. 30, n. 4, p. 353-368, 2015.

PEREIRA, M. J.; FEIJÓ, F. J. Bacia de Santos: **Boletim de Geociências da Petrobras**. 1994.
PETERSON, R. G.; STRAMMA, L. Upper-level circulation in the South Atlantic Ocean. **Progress in Oceanography**, v. 26, n. 1, p. 1–73, 1991.

PETSCHICK, R., KUHN, G., & GINGELE, F. Clay mineral distribution in surface sediments of the South Atlantic: sources, transport, and relation to oceanography. **Marine Geology**, 130(3-4), 203-229, 1996.

PIVEL, M. A. G.; SANTAROSA, A. C. A.; TOLEDO, F. A. L.; COSTA, K. B. The Holocene onset in the southwestern South Atlantic. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 374, p. 164–172, 2013.

RAZIK, S.; CHIESSI, C. M.; ROMERO, O. E.; VON DOBENECK, T. Interaction of the South American Monsoon System and the Southern Westerly Wind Belt during the last 14kyr. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 374, p. 28–40, 2013.

RENSSEN, H.; GOOSSE, H.; FICHEFET, T.; MASSON-DELMOTTE, V.; KOÇ, N. Holocene climate evolution in the high-latitude Southern Hemisphere simulated by a coupled atmosphere-sea ice-ocean-vegetation model. **The Holocene**, v. 15, n. 7, p. 951–964, 2005.

REIMER, P. J.; BARD, E.; BAYLISS, A.; et al. IntCal13 and Marine13 Radiocarbon Age Calibration Curves 0–50,000 Years cal BP. **Radiocarbon**, v. 55, n. 04, p. 1869–1887, 2013.

ROSENTHAL, Y.; LINSLEY, B. K.; OPPO, D. W. Pacific Ocean Heat Content During the Past 10,000 Years. **Science**, v. 342, n. 6158, p. 617–621, 2013.

DA SILVEIRA, I. C. A.; BROWN, W. S.; FLIERL, G. R. Dynamics of the North Brazil Current retroflection region from the Western Tropical Atlantic Experiment observations. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 105, n. C12, p. 28559–28583, 2000.

DA SILVEIRA, I. C. A.; CALADO, L.; CASTRO, B. M.; et al. On the baroclinic structure of the Brazil Current–Intermediate Western Boundary Current system at 22°–23°S. **Geophysical Research Letters**, v. 31, n. 14, p. L14308, 2004.

DA SILVEIRA, I. C. A.; LIMA, J. A. M.; SCHMIDT, A. C. K.; et al. Is the meander growth in the Brazil Current system off Southeast Brazil due to baroclinic instability? **Dynamics of Atmospheres and Oceans**, v. 45, n. 3–4, p. 187–207, 2008.

DA SILVEIRA, I. C. A.; NETO, H. F.; COSTA, T. P.; et al. CARACTERIZAÇÃO DA OCEANOGRAFIA FÍSICA DO TALUDE CONTINENTAL E REGIÃO OCEÂNICA DA BACIA DE CAMPOS. **Meteorologia e Oceanografia**. p.135–189, 2015.

SROKOSZ, M.; BARINGER, M.; BRYDEN, H.; et al. Past, Present, and Future Changes in the Atlantic Meridional Overturning Circulation. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 93, n. 11, p. 1663–1676, 2012.

TANIGUCHI, N. K. Reconstituição paleoceanográfica e inferências paleoclimáticas na margem equatorial Brasileira no Holoceno Médio e Tardio. Dissertação de Mestrado – Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico. p. 99, 2015.

TESSIN, A. C.; LUND, D. C. Isotopically depleted carbon in the mid-depth South Atlantic during the last deglaciation. **Paleoceanography**, v. 28, n. 2, p. 296–306, 2013.

THORNALLEY, D. J. R.; BLASCHEK, M.; DAVIES, F. J.; et al. Long-term variations in Iceland–Scotland overflow strength during the Holocene. **Climate of the Past**, v. 9, n. 5, p. 2073–2084, 2013.

TOLEDO, F. Tracing past circulation changes in the western South Atlantic based on planktonic foraminifera. **Revista Brasileira de Paleontologia**, v. 11, n. 3, p. 169–178, 2008.

TOLEDO, F. A. L.; COSTA, K. B.; PIVEL, M. A. G. Salinity changes in the western tropical South Atlantic during the last 30 kyr. **Global and Planetary Change**, v. 57, n. 3–4, p. 383–395, 2007.

VOIGT, I.; CHIESSI, C. M.; PIOLA, A. R.; HENRICH, R. Holocene changes in Antarctic Intermediate Water flow strength in the Southwest Atlantic. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 463, p. 60–67, 2016.

WANNER, H.; MERCOLLI, L.; GROSJEAN, M.; RITZ, S. P. Holocene climate variability and change; a data-based review. **Journal of the Geological Society**, v. 172, n. 2, p. 254–263, 2015.

WANNER, H.; SOLOMINA, O.; GROSJEAN, M.; RITZ, S. P.; JETEL, M. Structure and origin of Holocene cold events. **Quaternary Science Reviews**, v. 30, n. 21–22, p. 3109–3123, 2011.

WEI, R.; ABOUCHAMI, W.; ZAHN, R.; MASQUE, P. Deep circulation changes in the South Atlantic since the Last Glacial Maximum from Nd isotope and multi-proxy records. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 434, p. 18–29, 2016.

YAMASHITA, C. Foraminíferos bentônicos vivos na margem sudoeste do Atlântico Sul, Bacia de Campos: processos oceanográficos condicionantes. Tese de Doutorado – Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico. p. 222, 2016.

ZHANG, R.; DELWORTH, T. L. Simulated tropical response to a substantial weakening of the Atlantic thermohaline circulation. **Journal of Climate**, v. 18, n. 12, p. 1853–1860, 2005.

Anexos

Anexo 1. Localização e profundidade dos pontos utilizados para a Calibração do Sortable Silt.

Localização dos pontos utilizados para a Calibração do Sortable Silt - Localizados na Bacia de Campos				
Projeto HABITATS		Silveira et al. (2015) - Dados ProCAP-1000		
Profundidade (m)	Latitude e Longitude	Profundidade (m)	Latitude e Longitude	
Até 400 m	23°37,957' S - 41° 19,699'W	50 m	Entre 22°42' S e 40°12' W	
De 400 - 550 m	22°33,585'S - 40°26,624'W	100 m	Entre 22°42' S e 40°12' W	
De 400 - 550 m	21°44,360'S - 40°4,993' W	250 m	Entre 22°42' S e 40°12' W	
De 400 - 550 m	23°10,372'S - 40°56,799' W	350 m	Entre 22°42' S e 40°12' W	
De 400 - 550 m	21°13,637'S - 40°14,970'W	450 m	Entre 22°42' S e 40°12' W	
De 550 - 1000 m	21°11,202'S - 40°12,864'W	550 m	Entre 22°42' S e 40°12' W	
De 550 - 1000 m	22°36,412'S - 40°22,509'W	650 m	Entre 22°42' S e 40°12' W	
De 550 - 1000 m	23°39,329'S - 41°18,472'W	750 m	Entre 22°42' S e 40°12' W	
De 550 - 1000 m	21°41,204'S - 40°1,939'W	950 m	Entre 22°42' S e 40°12' W	
De 550 - 1000 m	23°13,022'S - 40°57,628'W	1050	Entre 22°42' S e 40°12' W	
De 550 - 1000 m	21°11,075'S - 40°8,974'W	1200	Entre 22°42' S e 40°12' W	
De 1000 - 1500 m	23°13,812'S - 40°55,892'W			
De 1000 - 1500 m	21°40,280'S - 39°58,102'W			
De 1000 - 1500 m	22°40,943'S - 40°17,627'W			
De 1000 - 1500 m	23°41,130'S - 41°16,078'W			
De 1000 - 1500 m	23°15,191'S - 40°53,888'W			
De 1000 - 1500 m	21°11,114'S - 40°3,113'W			
De 1000 - 1500 m	21°39,331'S - 39°53,955'W			
De 1000 - 1500 m	23°45,133'S - 41°11,860'W			
De 1500 - 2000 m	21°11,018'S - 39°39,724'W			
De 1500 - 2000 m	23°51,955'S - 41°4,726'W			
De 1500 - 2000 m	21°37,243'S - 39°35,758'W			
De 1500 - 2000 m	23°18,591'S - 40°47,456'W			
De 1500 - 2000 m	22°49,356'S - 40°8,287'W			
De 1500 - 2000 m	22°49,356'S - 40°8,287'W			