

OS OCEANOS: LIÇÕES DO PASSADO PARA UM FUTURO SUSTENTÁVEL¹

*Marília de Carvalho Campos¹, Stefano Crivellari²,
Cristiano Mazur Chiessi³*

¹Programa de Pós-graduação em Sustentabilidade, Escola de Artes, Ciências e Humanidades – Universidade de São Paulo (EACH-USP).

*Filiação atual: Departamento de Geologia Sedimentar e Ambiental, Instituto de Geociências – Universidade de São Paulo (IGc-USP). Contato: marilia.carvalho.campos@usp.br

²Escola de Artes, Ciências e Humanidades – Universidade de São Paulo (EACH-USP). Contato: stefano.crivellari@usp.br

³Escola de Artes, Ciências e Humanidades – Universidade de São Paulo (EACH-USP). Contato: chiessi@usp.br

Resumo: A Organização das Nações Unidas declarou a década de 2020 como a “Década da Ciência Oceânica para o Desenvolvimento Sustentável” com o intuito, entre outros, de aumentar e diversificar investimentos em ciência oceânica. Os oceanos ocupam grande parte da superfície terrestre, sendo o maior reservatório de água do planeta. A população mundial depende marcadamente, de forma direta ou indireta, dos serviços ecossistêmicos providos pelos oceanos. Dentre os serviços mais valiosos está a regulação do sistema climático. A Célula de Revolvimento Meridional do Atlântico (do inglês *Atlantic Meridional Overturning*

¹ M. C. Campos agradece ao Prof. Dr. André O. Sawakuchi pela colaboração junto ao seu pós-doutoramento. Os autores agradecem o apoio da FAPESP (2012/17517-3, 2016/10242-0, 2018/06790-7, 2018/15123-4, 2019/24349-9, 2019/25179-0 e 2020/06534-0), CAPES (1976/2014, 564/2015 e 88881.313535/2019-01), CNPq (312458/2020-7) e da Alexander von Humboldt Foundation.

Circulation – AMOC) é uma componente crucial do sistema climático que atua na distribuição de calor e trocas gasosas (por exemplo, de dióxido de carbono) com a atmosfera. Considerando a possibilidade de uma marcante redução/colapso da AMOC no futuro devido às mudanças climáticas, é de extrema relevância aprofundar o entendimento a respeito das possíveis consequências que uma redução/colapso dessa circulação teria sobre o sistema climático. Registros paleoclimáticos advindos de inúmeras regiões do planeta indicam que uma marcante redução/colapso da AMOC teve profundos reflexos no sistema climático. Tais reflexos envolvem impactos de escala global a local, como alterações significativas no ciclo do carbono, na temperatura superficial oceânica e no clima de regiões tropicais. Este trabalho visa destacar a importância de estudar eventos pretéritos de enfraquecimento da AMOC, tornando evidente que o aumento, diversificação e manutenção dos investimentos em ciência oceânica são de suma importância para o melhor enfrentamento das mudanças climáticas.

Palavras-chave: oceanos, Célula de Revolvimento Meridional do Atlântico, mudanças climáticas.

THE OCEANS: LESSONS FROM THE PAST FOR A SUSTAINABLE FUTURE

Abstract: The United Nations declared the 2020s as the “Decade of Ocean Science for Sustainable Development” aiming, among others, to increase and diversify funding for ocean sciences. The oceans cover most of the Earth’s surface, being the global largest water reservoir. The world population strongly depends, directly or indirectly, on ecosystem services provided by the oceans. Among the most valuable oceanic ecosystem services is its role in regulating the climate system. The Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC) is a crucial component of the climate system that controls the distribution of heat and the exchange of gases (carbon dioxide, for instance) with the atmosphere. Considering the possibility of a marked reduction/collapse of the AMOC in the future due to climate change, it is extremely important to better understand the possible consequences that a reduction/collapse would have on the climate system. Paleoclimate records from numerous regions of the planet indicate that a marked reduction/collapse of the AMOC had profound impacts on the climate system. Such impacts range from global to local changes, like significant changes in the carbon cycle, in the sea surface temperature and in the climate of tropical regions. Here we highlight the importance of investigating past events of a reduced/collapsed AMOC. We argue that the increase, diversification and maintenance

of investments in ocean sciences are of paramount importance for appropriately facing the challenges of climate change.

Keywords: Ocean, Atlantic Meridional Overturning Circulation, climate change.

1. INTRODUÇÃO

Os oceanos compõem 71% da superfície terrestre e contêm cerca de 97% da água do planeta. Grande parte da população mundial vive nas regiões costeiras e depende dos serviços ecossistêmicos providos pelos oceanos. Além de serviços relacionados à economia, nutrição, saúde, bem-estar, suprimento de água e energia, os oceanos desempenham papel fundamental na regulação do sistema climático. Eles atuam na absorção e redistribuição de calor e dióxido de carbono (CO₂), sendo os maiores sorvedouros desse gás de efeito estufa. Cerca de um terço do CO₂ emitido pelas atividades antrópicas é absorvido pela superfície oceânica no curto prazo, e no longo prazo é estocado no oceano profundo (ROMANOU *et al.*, 2017). Os oceanos (especialmente em porções mais profundas) estocam 50 vezes mais carbono que a atmosfera, amenizando marcantemente os impactos das emissões antrópicas de CO₂ e mitigando as mudanças climáticas (IOC-UNESCO, 2017; IPCC, 2019; RAVEN *et al.*, 2005).

Nas últimas décadas, esse fantástico regulador climático vem sofrendo mudanças que indicam que sua capacidade de continuar desempenhando serviços essenciais está ameaçada. Tais mudanças são reflexos das pressões antrópicas (e.g., poluição, aquecimento, acidificação), e, apesar dos esforços da comunidade científica global, o conhecimento a respeito de como os oceanos responderão a tais pressões no longo prazo ainda é marcado por muitas incertezas (IPCC, 2019; 2021; PBMC, 2020).

Uma das mudanças mais críticas está relacionada com a circulação oceânica global, especialmente àquela do setor atlântico, chamada de Célula de Revolvimento Meridional do Atlântico (do inglês *Atlantic Meridional Overturning Circulation* – AMOC). Tal circulação está entre as componentes do sistema climático cujo limiar crítico está próximo de ser atingido, e a redução da sua intensidade pode levar o sistema a se comportar de forma imprevisível (LENTON, 2013). Uma marcante redução/colapso dessa circulação teria profundas implicações globais no clima (LIU *et al.*, 2017), na fauna e flora (THOMAS *et al.*, 2004) e na sociedade (PATZ *et al.*, 2005), por exemplo, mudanças nos padrões de precipitação e temperatura, na distribuição e abundância de diversas espécies (com riscos de extinção) e na

maior frequência de problemas de saúde e ameaças à segurança alimentar. Assim, ampliar, aprofundar e manter estudos que tratem dos mecanismos responsáveis por variações significativas no clima e nas condições oceânicas durante eventos pretéritos de marcante enfraquecimento da AMOC podem auxiliar sobremaneira na projeção de cenários climáticos futuros mais realistas.

Apesar da sua grande relevância, estima-se que as ciências do mar recebem apenas cerca de 0,04% a 4% do total investido em pesquisa e desenvolvimento (IOC-UNESCO, 2017). O estudo dos oceanos requer investimentos significativos tanto em infraestrutura (e.g., navios, equipamentos para coleta, tratamento e análise de sedimentos marinhos, satélites, robôs subaquáticos, veículos controlados remotamente) como em formação de mão de obra extremamente especializada.

Com base nesse contexto, a Organização das Nações Unidas (ONU) declarou a década de 2020 (2021-2030) como a “Década da Ciência Oceânica para o Desenvolvimento Sustentável”, com o intuito de aumentar e diversificar os investimentos em ciências do mar, bem como de engajar ciência, políticas públicas e sociedade em prol da sustentabilidade dos oceanos (UN, 2019). Adicionalmente, a Agenda 2030 também destacou a importância dos oceanos em um de seus objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS14 – Conservação e uso sustentável dos oceanos, dos mares e dos recursos marinhos para o desenvolvimento sustentável), chamando atenção para seus serviços ecossistêmicos e os desafios de governança em meio às pressões antrópicas (UN, 2015). Tal esforço também é contemplado no ODS13 (Tomar medidas urgentes para combater a mudança climática e seus impactos), que trata das mudanças climáticas como um todo. Vale notar que tal avanço rumo à governança e gestão sustentável dos oceanos requer abordagens interdisciplinares envolvendo a ampla participação das mais diversas partes interessadas (i.e., setor público, setor privado, terceiro setor e comunidades) em diversas escalas espaciais (local, regional e global) (DE CASTRO *et al.*, 2019; GONÇALVES, 2021; WISZ *et al.*, 2020).

Este trabalho apresenta alguns exemplos que justificam o aumento, diversificação e manutenção dos investimentos em ciência oceânica, mais especificamente na “paleoceanografia”, que é o ramo da ciência que estuda as mudanças pretéritas (i.e., paleo) que ocorreram nos oceanos e seus reflexos no sistema climático.

2. DESENVOLVIMENTO

A AMOC é uma circulação de larga escala que transporta águas superficiais quentes e salinas rumo às altas latitudes do Atlântico Norte, onde elas perdem

calor para a atmosfera mais fria daquela região, ganham densidade e afundam, retornando águas profundas e frias para o Atlântico Sul (BRYDEN *et al.*, 2005). Ela é composta de células de revolvimento que contêm quatro ramos principais, a saber: (i) ressurgências, que transportam águas do fundo para a superfície; (ii) correntes superficiais, que transportam águas de baixa densidade rumo ao norte; (iii) regiões de formação de águas profundas, onde as águas se tornam mais densas e afundam; e (iv) correntes profundas, que transportam águas de alta densidade rumo ao sul (KUHLBRODT *et al.*, 2007).

Os impactos advindos das mudanças nessa circulação podem ser mais bem entendidos por meio, por exemplo, do estudo do registro geológico. O registro geológico fornece (MOCK, 2007; PANCOST, 2017): (i) uma perspectiva mais longa (se comparada com o registro instrumental) para compreender as forças, magnitudes e aspectos espaciais/temporais das mudanças climáticas; (ii) a possibilidade de testar/validar os modelos climáticos numéricos, comparando resultados de modelagem numérica com reconstituições paleoclimáticas; (iii) arquivos da variabilidade natural do clima que permitem separar as mudanças naturais das antropogênicas; e (iv) arquivos para compreender o papel das mudanças climáticas nos ecossistemas.

2.1 O Oceano Atlântico, a temperatura e o ciclo do carbono

O Quaternário Tardio foi marcado por diversos eventos de variação na intensidade da AMOC, acompanhados por marcantes mudanças no clima global em diferentes escalas de tempo (BROECKER, 1998). Os eventos de escala de tempo milenar chamados Heinrich Stadials são exemplos clássicos de momentos marcados pela redução abrupta da intensidade da AMOC (Figura 1, item 1) (e.g., BÖHM *et al.*, 2015; MCMANUS *et al.*, 2004). A causa mais provável de tal redução de intensidade está associada com descargas de água doce (*icebergs*) no norte do Atlântico Norte, prejudicando ou mesmo paralisando o afundamento de águas nessa região (LYNCH-STIEGLITZ *et al.*, 2017).

Os eventos Heinrich Stadials provocaram mudanças marcantes no contraste termal superficial entre os hemisférios, isto é, resfriamento nas altas latitudes do Hemisfério Norte e aquecimento em vastas porções do Hemisfério Sul (Figura 1, itens 4 e 5) (BARKER *et al.*, 2009; CHIESSI *et al.*, 2015; CRIVELLARI *et al.*, 2019; MEIER *et al.*, 2021). Tal contraste termal se deu em virtude da redução da capacidade da AMOC de transportar calor em direção ao Atlântico Norte, e, como consequência, o calor ficou retido no Hemisfério Sul. Além de variações na temperatura, inúmeras outras consequências desses eventos de redução da AMOC

foram observadas no registro geológico (AHN; BROOK, 2014; CAMPOS *et al.*, 2017; KANNER *et al.*, 2012; PORTILHO-RAMOS *et al.*, 2017).

O enfraquecimento da AMOC também afetou o ciclo global do carbono. No Oceano Atlântico, a redução do afundamento de águas no norte do Atlântico Norte afetou as trocas de CO₂ entre o oceano superficial e profundo, que foi registrada, por exemplo, a partir de mudanças na composição isotópica do carbono inorgânico dissolvido na água do mar (CAMPOS *et al.*, 2020; HOWE *et al.*, 2018; VOIGT *et al.*, 2017). Tal parâmetro reflete a proporção relativa entre os isótopos estáveis do carbono (¹²C e ¹³C) na água do mar, que, por sua vez, é frequentemente utilizada como indicador de circulação. A composição isotópica da água do mar pode ser reconstituída a partir da análise de microfósseis, como conchas de foraminíferos (microrganismos marinhos unicelulares que representam um dos principais componentes dos carbonatos marinhos) depositadas no fundo do oceano ao longo do tempo. Isso é possível pois a composição isotópica das conchas desses organismos reflete a composição isotópica da água do mar no momento de formação das conchas (Figura 1, item 1) (ROHLING; COOKE, 1999).

Outra implicação da redução da AMOC no ciclo do carbono está associada com a retenção de calor no Hemisfério Sul e consequente deslocamento para sul dos cinturões climáticos. Ao se deslocarem para o sul, os ventos de oeste do Hemisfério Sul intensificaram um dos sistemas de ressurgência mais intensos do mundo, o sistema de ressurgência do Oceano Austral (oceano ao redor da Antártica) (Figura 1, item 3) (ANDERSON *et al.*, 2009; PINHO *et al.*, 2021). Esse local de intensa ascensão de águas profundas para a superfície é tido como a fonte mais significativa do aumento do CO₂ atmosférico observado durante os Heinrich Stadials (Figura 1, item 6) (ANDERSON *et al.*, 2009; BAUSKA *et al.*, 2016).

Esses exemplos de desdobramentos do enfraquecimento da AMOC relacionados à temperatura superficial e ao ciclo do carbono evidenciam sua relevância em termos globais, marcada por mecanismos de retroalimentação do sistema climático. Entender a extensão e a magnitude desses desdobramentos e mecanismos de retroalimentação pretéritos tem auxiliado sobremaneira na projeção de cenários climáticos futuros mais realistas.

2.2 O Oceano Atlântico e o clima da América do Sul

O clima da América do Sul tropical é marcadamente influenciado pela umidade advinda do Oceano Atlântico (GARREAUD *et al.*, 2009). Assim, as mudanças na temperatura da superfície do mar ocorridas durante os eventos Heinrich Stadials (marcados pela redução abrupta da intensidade da AMOC) afetaram marcadamente o clima dessa região.

Diversos registros paleoclimáticos utilizados para reconstituir o clima da América do Sul tropical (e.g., espeleotemas coletados em cavernas de regiões tropicais e testemunhos sedimentares marinhos coletados próximos à foz de rios de regiões tropicais), bem como resultados de modelos paleoclimáticos para essa região, mostram que mudanças significativas na precipitação ocorreram em períodos de marcante redução/colapso da AMOC (Figura 1, item 2) (e.g., PAGES HYDRO2K CONSORTIUM, 2017; CAMPOS *et al.*, 2019; CHENG *et al.*, 2013; MULITZA *et al.*, 2017; ZHANG *et al.*, 2017).

As projeções climáticas para a América do Sul indicam que as regiões tropicais serão as que sofrerão as mudanças climáticas mais intensas até o final do século XXI (AMBRIZZI *et al.*, 2007; IPCC, 2021). Esse é o caso da Amazônia e do norte do Nordeste brasileiro, considerados “*climate change hot spots*” em virtude do alto grau de vulnerabilidade às mudanças climáticas em termos sociais e de biodiversidade (PBMC, 2020). Para o final do século XXI, modelos climáticos regionais e globais sugerem aumento da temperatura para essas regiões e redução da precipitação, pelo menos na região amazônica (AMBRIZZI *et al.*, 2019; LIU *et al.*, 2020). Tais cenários estão associados à substituição parcial de floresta por savana em partes da Amazônia e substituição de caatinga por semideserto nas regiões de maior aridez do Nordeste brasileiro (NOBRE *et al.*, 2010).

O Grupo de Trabalho 1 do 6º Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (AR6 IPCC) concluiu, com confiabilidade média, que a AMOC não sofrerá uma transição abrupta ou colapso no século XXI (IPCC, 2021). No entanto, alguns estudos sugerem que a estabilidade da AMOC pode estar sendo superestimada (e.g., BAKKER *et al.*, 2016; LIU *et al.*, 2017). Assim, considerando (i) a grande sensibilidade do clima das regiões tropicais às mudanças na intensidade da AMOC observada nos registros e modelos (paleo)climáticos; e (ii) as marcantes incertezas associadas às projeções futuras da AMOC, é de extrema importância aprofundar o entendimento a respeito dessa circulação.

2.3 O Brasil e a ciência oceânica

No contexto brasileiro, existem muitos exemplos positivos em prol da ciência oceânica. Recentemente, o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI) lançou o Programa Ciência no Mar (Portaria MCTI n. 4.719, de 5 de maio de 2021), que visa fomentar estudos científicos em águas oceânicas. O programa atua nas seguintes frentes: gestão de riscos e desastres; mar profundo; zona costeira e plataforma continental; circulação oceânica, interação oceano-atmosfera e

variabilidade climática; tecnologia e infraestrutura para pesquisas oceanográficas e biodiversidade marinha.

Outra iniciativa do MCTI está relacionada com o Plano de Ação em Ciência, Tecnologia e Inovação para os Oceanos (BRASIL, 2018), que busca aplicar o conhecimento científico e tecnológico em prol de benefícios sociais, econômicos e ambientais.

Essas iniciativas norteiam os investimentos federais brasileiros em ciência oceânica e estão alinhadas com a Agenda 2030, especialmente o OSD14, e também visam mobilizar, engajar e dar voz aos diferentes setores da sociedade. Adicionalmente, existem outras ações que estão sendo realizadas em prol da ciência oceânica e da “Década da Ciência Oceânica para o Desenvolvimento Sustentável”. Alguns exemplos são: (i) oficinas regionais para mapear avanços e lacunas no conhecimento relacionados a ciência oceânica; (ii) convênio entre o International Ocean Discovery Program (IODP) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) para pesquisas oceanográficas; (iii) convênio entre a Marinha do Brasil e o MCTI, que envolve a utilização de navios da marinha brasileira para fins científicos (e.g. *Cruzeiro do Sul* e *Vital de Oliveira*); (iv) acordos bilaterais entre instituições acadêmicas brasileiras e estrangeiras para pesquisas oceanográficas (e.g., Brasil-Alemanha, navio *RV Meteor*; Brasil-França, navio *RV Marion Dufresne*; Brasil-Estados Unidos, navio *RV Knorr*).

3. CONCLUSÕES

Uma vez que os oceanos têm papel fundamental na regulação do sistema climático, não é possível tratar de sustentabilidade, seja ela ambiental, social, econômica, ética ou cultural, sem pensar na governança e gestão sustentável desse imenso e valioso recurso. O estudo do sistema climático pretérito não deixa dúvidas de que mudanças na circulação oceânica, especialmente aquelas relacionadas ao setor atlântico (i.e., AMOC), afetaram profundamente o clima global. A redução da intensidade da AMOC projetada para as próximas décadas, associada a outros elementos das mudanças climáticas (e.g., aquecimento global, elevação do nível do mar, acidificação dos oceanos), terá inúmeros impactos negativos sobre a fauna, flora e sociedade globais. Desta forma, o aumento, diversificação e manutenção dos investimentos em ciência oceânica são de suma importância para o melhor enfrentamento das mudanças climáticas. No contexto brasileiro, muitos esforços positivos vêm sendo implementados em prol da ciência oceânica. No entanto, é preciso continuar investindo em parcerias exitosas, como o convênio IODP-CAPES. Este trabalho mostrou alguns exemplos que ressaltam a grande importância da paleoceanografia nesse contexto.

Figura 1 – Representação esquemática de períodos de marcante redução/colapso da Célula de Revolvimento Meridional do Atlântico (AMOC)



REFERÊNCIAS

- AHN, J.; BROOK, E. J. Siple Dome ice reveals two modes of millennial CO₂ change during the last ice age. **Nat Commun**, 5, p. 3723, 2014.
- AMBRIZZI, T.; REBOITA, M. S.; DA ROCHA, R. P.; LLOPART, M. The state of the art and fundamental aspects of regional climate modeling in South America. **Annals of the New York Academy of Sciences**, 1436, n. 1, p. 98-120, 2019.
- AMBRIZZI, T.; ROCHA, R.; MARENGO, J. A.; PISNITCHENKO, I. *et al.* Cenários regionalizados de clima no Brasil para o Século XXI: Projeções de clima usando três modelos regionais. Ministério do Meio Ambiente (MMA), Secretaria de Biodiversidade e Florestas (SBF), Diretoria de Conservação da Biodiversidade, 2007.
- ANDERSON, R. F.; ALI, S.; BRADTMILLER, L. I.; NIELSEN, S. H. *et al.* Wind-driven upwelling in the Southern Ocean and the deglacial rise in atmospheric CO₂. **Science**, 323, n. 5920, p. 1443-1448, 2009.
- ATSAWAWARANUNT, K.; COMAS-BRU, L.; AMIRNEZHAD MOZHDEHI, S.; DEININGER, M. *et al.* The SISAL database: a global resource to document oxygen and carbon isotope records from speleothems. **Earth Syst. Sci. Data**, 10, n. 3, p. 1687-1713, 2018.
- BAKKER, P.; SCHMITTNER, A.; LENAERTS, J.; ABE-OUCHI, A. *et al.* Fate of the Atlantic Meridional Overturning Circulation: Strong decline under continued warming and Greenland melting. **Geophysical Research Letters**, 43, n. 23, p. 12,252-212,260, 2016.
- BARKER, S.; DIZ, P.; VAUTRAVERS, M. J.; PIKE, J. *et al.* Interhemispheric Atlantic seesaw response during the last deglaciation. **Nature**, 457, n. 7233, p. 1097-1102, 2009.
- BAUSKA, T. K.; BAGGENSTOS, D.; BROOK, E. J.; MIX, A. C. *et al.* Carbon isotopes characterize rapid changes in atmospheric carbon dioxide during the last deglaciation. **Proc Natl Acad Sci U S A**, 113, n. 13, p. 3465-3470, 2016.
- BÖHM, E.; LIPPOLD, J.; GUTJAHR, M.; FRANK, M. *et al.* Strong and deep Atlantic meridional overturning circulation during the last glacial cycle. **Nature**, 517, n. 7532, p. 73-76, 2015.
- BRASIL. Plano de Ação em Ciência, Tecnologia e Inovação para Oceanos. Brasília, DF: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2018.

- BROECKER, W. S. Paleocean circulation during the last deglaciation: a bipolar seesaw? **Paleoceanography**, 13, n. 2, p. 119-121, 1998.
- BRYDEN, H. L.; LONGWORTH, H. R.; CUNNINGHAM, S. A. Slowing of the Atlantic meridional overturning circulation at 25 N. **Nature**, 438, n. 7068, p. 655-657, 2005.
- CAMPOS, M. C.; CHIESSI, C. M.; PRANGE, M.; MULITZA, S. *et al.* A new mechanism for millennial scale positive precipitation anomalies over tropical South America. **Quaternary Science Reviews**, 225, p. 105990, 2019.
- CAMPOS, M. C.; CHIESSI, C. M.; VENANCIO, I. M.; PINHO, T. M. *et al.* Constraining millennial-scale changes in Northern Component Water ventilation in the western tropical South Atlantic. **Paleoceanography and Paleoclimatology**, 35, n. 7, p. e2020PA003876, 2020.
- CAMPOS, M. C.; CHIESSI, C. M.; VOIGT, I.; PIOLA, A. R. *et al.* $\delta^{13}\text{C}$ decreases in the upper western South Atlantic during Heinrich Stadials 3 and 2. **Climate of the Past**, 13, n. 4, p. 345-358, 2017.
- CHENG, H.; SINHA, A.; CRUZ, F. W.; WANG, X. *et al.* Climate change patterns in Amazonia and biodiversity. **Nature communications**, 4, n. 1, p. 1-6, 2013.
- CHIESSI, C. M.; MULITZA, S.; MOLLENHAUER, G.; SILVA, J. *et al.* Thermal evolution of the western South Atlantic and the adjacent continent during Termination 1. **Climate of the Past**, 11, n. 6, p. 915-929, 2015.
- COLLINS, M.; KNUTTI, R.; ARBLASTER, J.; DUFRESNE, J.-L. *et al.* Long-term climate change: projections, commitments and irreversibility. In: **Climate Change 2013-The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**: Cambridge University Press, 2013. p. 1029-1136.
- CRIVELLARI, S.; CHIESSI, C. M.; KUHNERT, H.; HÄGGI, C. *et al.* Thermal response of the western tropical Atlantic to slowdown of the Atlantic Meridional Overturning Circulation. **Earth and Planetary Science Letters**, 519, p. 120-129, 2019.
- DE CASTRO, B. S.; FARES, L. R.; GONÇALVES, R. F.; YOUNG, C. E. F. Avaliação das fontes potenciais de financiamento para projetos de caráter ambiental relacionados aos ODS no Brasil. **Revibec: Revista Iberoamericana de Economía Ecológica**, 31, p. 29-45, 2019.

GARREAUD, R. D.; VUILLE, M.; COMPAGNUCCI, R.; MARENCO, J. Present-day South American climate. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, 281, n. 3-4, p. 180-195, 2009.

GONÇALVES, P. R. Diagnóstico, desafios e caminhos da conservação e uso sustentável das zonas costeiras e marinhas do Brasil: agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável, ODS-14. Brasília: Enap, 2021. 189 p. (Cadernos Enap, 77)

HOWE, J. N. W.; HUANG, K.-F.; OPPO, D. W.; CHIESSI, C. M.; MULITZA, S.; BLUSZTAJN, J.; PIOTROWSKI, A. M. Similar mid-depth Atlantic water mass provenance during the Last Glacial Maximum and Heinrich Stadial 1. **Earth and Planetary Science Letters**, 490, 51-61, 2018.

IOC-UNESCO. **Global Ocean Science Report – The current status of ocean science around the world**. Paris. 2017.

IPCC. **Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate**. In press. 2019.

IPCC. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** (V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, & B. Zhou Eds.): Cambridge University Press, 2021. In Press.

KANNER, L. C.; BURNS, S. J.; CHENG, H.; EDWARDS, R. L. High-latitude forcing of the South American summer monsoon during the last glacial. **Science**, 335, n. 6068, p. 570-573, 2012.

KUHLBRODT, T.; GRIESEL, A.; MONTOYA, M.; LEVERMANN, A. *et al.* On the driving processes of the Atlantic meridional overturning circulation. **Reviews of Geophysics**, 45, n. 2, 2007.

LENTON, T. Tipping elements from a global perspective. In: **Addressing Tipping Points for a Precarious Future**. British Academy, 2013.

LIU, W.; FEDOROV, A. V.; XIE, S.-P.; HU, S. Climate impacts of a weakened Atlantic Meridional Overturning Circulation in a warming climate. **Science advances**, 6, n. 26, p. eaaz4876, 2020.

LIU, W.; XIE, S.-P.; LIU, Z.; ZHU, J. Overlooked possibility of a collapsed Atlantic Meridional Overturning Circulation in warming climate. **Science Advances**, 3, n. 1, p. e1601666, 2017.

- LYNCH-STIEGLITZ, J. The Atlantic meridional overturning circulation and abrupt climate change. **Annual review of marine science**, 9, p. 83-104, 2017.
- MCMANUS, J. F.; FRANCOIS, R.; GHERARDI, J.-M.; KEIGWIN, L. D. *et al.* Collapse and rapid resumption of Atlantic meridional circulation linked to deglacial climate changes. **Nature**, 428, n. 6985, p. 834, 2004.
- MEIER, K. J. F.; BAHR, A.; CHIESSI, C. M.; ALBUQUERQUE, A. L.; RADDATZ, J.; FRIEDRICH, O. Role of the Tropical Atlantic for the Interhemispheric Heat Transport During the Last Deglaciation. **Paleoceanography and Paleoclimatology**, 36, e2020PA004107, 2021.
- MOCK, C. J. Why Study Paleoclimatology? **Encyclopedia of Quaternary Science**, p. 1867-1873, 2007.
- MULITZA, S.; CHIESSI, C. M.; SCHEFUß, E.; LIPPOLD, J. *et al.* Synchronous and proportional deglacial changes in Atlantic meridional overturning and northeast Brazilian precipitation. **Paleoceanography**, 32, n. 6, p. 622-633, 2017.
- NOBRE, C. A.; SAMPAIO, G.; SALAZAR, L. Cenários de mudança climática para a América do Sul para o final do século 21. *Parcerias Estratégicas*, 13, n. 27, p. 19-42, 2010.
- PAGES HYDRO2K CONSORTIUM. Comparing proxy and model estimates of hydroclimate variability and change over the Common Era. **Clim. Past**, 13, n. 12, p. 1851-1900, 2017.
- PANCOST, R. D. Climate change narratives. **Nature Geoscience**, 10, n. 7, p. 466, 2017.
- PATZ, J. A.; CAMPBELL-LENDRUM, D.; HOLLOWAY, T.; FOLEY, J. A. Impact of regional climate change on human health. **Nature**, 438, n. 7066, p. 310-317, 2005.
- PBMC. Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Capítulo 9-Mudanças ambientais de curto e longo prazo: projeções, reversibilidade e atribuição. COPPE Rio de Janeiro. 1: 322-346 p. 2020.
- PINHO, T.M.L.; CHIESSI, C.M.; PORTILHO-RAMOS, R.C.; CAMPOS, M.C.; CRIVELLARI, S.; NASCIMENTO, R.A.; ALBUQUERQUE, A.L.S., BAHR, A.; MULITZA, S. Meridional changes in the South Atlantic Subtropical Gyre during Heinrich Stadials. **Scientific Reports**, 11, 9419, 2021.
- PORTILHO-RAMOS, R.; CHIESSI, C.; ZHANG, Y.; MULITZA, S. *et al.* Coupling of equatorial Atlantic surface stratification to glacial shifts in the tropical rainbelt. **Scientific Reports**, 7, n. 1, p. 1561, 2017.

RAVEN, J.; CALDEIRA, K.; ELDERFIELD, H.; HOEGH-GULDBERG, O. *et al.* Ocean acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide. **The Royal Society**, 2005.

ROHLING, E. J.; COOKE, S. Stable oxygen and carbon isotopes in foraminiferal carbonate shells. In: **Modern foraminifera**. Springer, 1999. p. 239-258.

ROMANOU, A.; MARSHALL, J.; KELLEY, M.; SCOTT, J. Role of the ocean's AMOC in setting the uptake efficiency of transient tracers. **Geophysical Research Letters**, 44, n. 11, p. 5590-5598, 2017.

THOMAS, C. D.; CAMERON, A.; GREEN, R. E.; BAKKENES, M. *et al.* Extinction risk from climate change. **Nature**, 427, n. 6970, p. 145-148, 2004.

UN. United Nations. Transforming our World: **The 2030 Agenda for Sustainable Development**. 2015.

UN. Summary Report of the First Global Planning Meeting: **UN Decade of Ocean Science for Sustainable Development**. Copenhagen. 2019.

VOIGT, I.; CRUZ, A.; MULITZA, S.; CHIESSI, C. *et al.* Variability in mid-depth ventilation of the western Atlantic Ocean during the last deglaciation. **Paleoceanography**, 32, n. 9, p. 948-965, 2017.

WISZ, M. S.; SATTERTHWAITE, E. V.; FUDGE, M.; FISCHER, M. *et al.* 100 Opportunities for More Inclusive Ocean Research: Cross-Disciplinary Research Questions for Sustainable Ocean Governance and Management. **Frontiers in Marine Science**, 7, n. 576, 2020-August-06 2020. Review.

ZHANG, Y.; CHIESSI, C. M.; MULITZA, S.; SAWAKUCHI, A. O. *et al.* Different precipitation patterns across tropical South America during Heinrich and Dansgaard-Oeschger stadials. **Quaternary Science Reviews**, 177, p. 1-9, 2017.