

JOSE MARCOS BOTELHO GUSMÃO

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS MODOS DE VARIABILIDADE OCEÂNICA NO
CLIMA DA AMÉRICA DO SUL DURANTE O HOLOCENO

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Aplicada, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Jackson Martins Rodrigues

Coorientador: Douglas da Silva Lindemann

VIÇOSA-MINAS GERAIS
2024

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

G982a
2024
Gusmão, José Marcos Botelho, 2024-
Análise da influência dos modos de variabilidade oceânica
no clima da América do Sul durante o Holoceno / José Marcos
Botelho Gusmão. – Viçosa, MG, 2024.
1 dissertação eletrônica (61 f.): il.

Orientador: Jackson Martins Rodrigues.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Agrícola, 2024.
Referências bibliográficas: f. 53-61.
DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2024.599>
Modo de acesso: World Wide Web.

1. Mudanças climáticas - América do Sul. I. Rodrigues,
Jackson Martins, 1984-. II. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de
Pós-Graduação em Meteorologia Aplicada. III. Título.

CDD 22. ed. 551.5253

JOSE MARCOS BOTELHO GUSMÃO

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS MODOS DE VARIABILIDADE OCEÂNICA NO
CLIMA DA AMÉRICA DO SUL DURANTE O HOLOCENO

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Aplicada, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 21 de junho de 2024

Assentimento:

José Marcos Botelho Gusmão

Autor

Jackson Martins Rodrigues

Orientador

AGRADECIMENTO

A Deus.

Aos meus pais, José Marcos de Souza Gusmão Filho e Maria Auxiliadora Botelho Gusmão que em momento algum duvidaram de mim e sempre me apoiaram e incentivaram. Obrigado pela educação, ensinamentos, humildade e honestidade para alcançar os meus objetivos. Aos meus irmãos Rafael Botelho Gusmão e Camila Botelho Gusmão pela força e orações.

Ao meu orientador Jackson Martins Rodrigues, pela oportunidade cedida para realizar o mestrado no Programa de Pós-graduação em Meteorologia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa no Departamento de Engenharia Agrícola, por me guiar, pelos seus ensinamentos, pela confiança e principalmente pela paciência durante o período do curso. Ao meu coorientador pela orientação durante esse período.

Aos meus professores de pós-graduação em Meteorologia Aplicada que desempenharam um papel fundamental durante a minha formação.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola, pelo apoio e ajuda concedida, em particular à Graça Freitas, pelo carinho, paciência e pelo suporte durante o período da realização do curso.

Aos meus amigos que fiz nesses últimos anos, Raoni Azevedo, Lormido Ernesto Zita, Leticia Prechesniuki, Thaís Vasconcelos, Bruna Rodrigues, Santiago Márquez Árevalo e principalmente a Darlan Teles que sempre demonstraram prontidão para ajudar-me e por não medirem esforços para a realização deste estudo.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão de bolsa de estudos.

RESUMO

GUSMÃO, José Marcos Botelho, M.sc., Universidade Federal Viçosa, abril de 2024. **Análise da Influência da Variabilidade Oceânica no clima da América do Sul durante o Holoceno.** Orientador: Jackson Martins Rodrigues. Coorientador: Douglas da Silva Lindemann.

O Holoceno é uma época geológica que compreende o intervalo mais recente da história da superfície terrestre. Durante o Holoceno variações na insolação forçadas pela mudança na precessão têm influenciado a distribuição dos elementos climáticos e causado mudanças abruptas na América do Sul. O Holoceno, por sua vez, é dividido em três subintervalos: inicial, médio e tardio. As reconstruções paleoclimáticas são conduzidas principalmente com utilização de registros proxies que fornecem informações climáticas passadas. Importante salientar que estas mudanças são influenciadas pelas mudanças na temperatura da superfície do mar (TSM) que alteram os padrões de teleconexões. As teleconexões são conexões entre duas anomalias climáticas não frequentes, que ocorrem entre duas regiões distantes. Diante do exposto, o objetivo deste trabalho é investigar como os modos de variabilidade climática (ENSO e AMO) influenciaram a distribuição de temperatura e precipitação na América do Sul em determinados períodos do Holoceno (9000, 6000, 3000, 2000 e 1000 anos AP) comparando com reconstruções feitas por *proxies*. Para a realização deste estudo, foram utilizados os dados do passado do modelo trace-21ka, enquanto para o presente foram utilizados o modelo Era5 Land e NOAA. Para análise dos dados climáticos foi utilizado a técnica Teleconexões Ortogonais Empíricas (TOE) para a determinação dos padrões dominantes de teleconexões obtidos através dos modelos. O modelo mostrou que a associação da correlação da temperatura e precipitação da América do sul eram menores que o presente. Essa associação sugere que o El Niño está influenciando no aumento temperatura na região norte do Brasil e extremo norte do continente e em contrapartida, o efeito oposto ocorrer na região do extremo sul, ou seja, ocasiona a redução da temperatura. Já para a precipitação, a associação do El Niño está relacionada ao aumento da precipitação na região extremo sul do continente e sudeste do Brasil, enquanto na região norte do Brasil a uma redução da precipitação devido aos valores de correlação negativa. Já durante o AMO, essa associação sugere que esse fenômeno ocasionou aumento da temperatura nas regiões norte do Brasil e extremo norte do continente devido aos valores de correlação positiva, em contrapartida, ocasiona queda

da precipitação na região do extremo sul. Em relação a precipitação, na região norte do Brasil houve o aumento da precipitação devido a influência do AMO. No entanto na região nordeste ocorreu uma inversão desse fenômeno, ou seja, provocou queda da precipitação. Pela análise do EOT, observamos que o El Niño durante os períodos 9150-8850, 6150-5850, 3150-2850, 2150-1850 e 1150-0850 AP era menos intenso, representando pelos domínios das variâncias de 52,21%, 50,51%, 48,25%, 49,91% e 50,01%. Já para o AMO a variância explicada foi 50,9%, 44,1%, 25,19%, 45,92 e 42,44% da variância explicada. Dessa maneira, conclui-se que o modelo é uma boa ferramenta para avaliar a sucessão climática da América do Sul.

Palavras chaves: América do Sul; Holoceno; Variabilidade Climática;

Linha de pesquisa: Mudanças climáticas

ABSTRACT

GUSMÃO, José Marcos Botelho, M. sc., Universidade Federal Viçosa, April de 2024. **Analysis of the Influence of Ocean Variability on the Climate of South America during the Holocene.** Advisor: Jackson Martins Rodrigues. Co-advisor: Douglas da Silve Lindemann

The Holocene is a geological epoch that comprises the most recent interval in Earth's surface history. During the Holocene variations in insolation forced by the change in precession have influenced the distribution of climatic elements and caused abrupt changes in South America. The Holocene, in turn, is divided into three subintervals: early, middle and late. Paleoclimatic reconstructions are conducted mainly using proxies that provide past climate information. It is important to note that these changes are influenced by changes in sea surface temperature (SST) that alter the patterns of teleconnections. Teleconnections are connections between two uncommon climatic anomalies that occur between two distant regions. Given the above, the objective of this work is to investigate how the modes of climate variability (ENSO and AMO) influenced the distribution of temperature and precipitation in South America in certain periods of the Holocene (9000, 6000, 3000, 2000 and 1000 years AP) compared with reconstructions made by proxies. For this study, data from the past of the trace-21ka model were used, while for the present the Era5 Land and NOAA models were used. For the analysis of the climatic data, the Teleconnections Orthogonal Empirical (TOE) technique was used to determine the dominant patterns of teleconnections obtained through the models. The model showed that the correlation association of temperature and precipitation of South America were lower than the present one. This association suggests that El Niño is influencing the temperature increase in the northern region of Brazil and the extreme north of the continent and in contrast, the opposite effect occurs in the extreme south region, that is, it causes the temperature reduction. For precipitation, the association of El Niño is related to increased precipitation in the extreme southern region of the continent and southeastern Brazil, while in the northern region of Brazil to a reduction in precipitation due to negative correlation values. During the AMO, this association suggests that this phenomenon caused an increase in temperature in the northern regions of Brazil and the extreme north of the continent due to the positive correlation values, in contrast, causes a fall in precipitation in the extreme south region. Regarding

precipitation, in the northern region of Brazil there was an increase in precipitation due to the influence of AMO. However in the northeastern region there was an inversion of this phenomenon, that is, it caused heated precipitation. Through the TEO analysis, we observed that El Niño during the periods 9150-8850, 6150-5850, 3150-2850, 2150-1850 and 1150-0850 AP was less intense, representing the domains of variances of 52.21%, 50.51%, 48.25%, 49.91% and 50.01%. For the AMO the explained variance was 50.9%, 44.1%, 25.19%, 45.92 and 42.44% of the explained variance. Thus, it is concluded that the model is a good tool to evaluate the climate succession of South America.

Keywords: South America; Holocene; Climate Variability.

Research Line: Climate Change

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Fluxograma da pesquisa	17
Figura 2: Representação do intervalo do El Niño e La Niña.....	19
Figura 3: Representação da área de estudo.....	19
Figura 4: Representação do intervalo da fase positiva e negativa do AMO.	21
Figura 5: Representação dos modos dominante de variabilidade ENOS no Pacífico para cada período do Holoceno e o presente	27
Figura 6 : Representação da resposta da correlação entre o ENOS e a temperatura média da América do Sul para cada período do Holoceno e o presente..	29
Figura 7 : Representação da resposta da correlação entre o ENOS e a precipitação da América do Sul para cada período do Holoceno e o presente	31
Figura 8: Representação do modo de variabilidade AMO para cada período..	33
Figura 9: Representação da resposta da correlação entre o AMO e a temperatura da média da América do Sul para cada período do Holoceno e o presente..	36
Figura 10: Representação da resposta da Oscilação Multidecadal do Atlântico na precipitação da América do Sul para cada período do Holoceno.....	38
Figura 11: Representação das localizações dos registros proxies	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Localização dos modos de variabilidades oceânicas.....	20
Tabela 2: Representação dos componentes do modelo	22
Tabela 3: Representação dos registros proxies.....	42

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AP - Anos antes do presente

JBN - Jatos de Baixos Níveis

ENOS - El Niño oscilação Sul

AMO - Oscilação Multidecadal do Atlântico

AAO - Oscilação da Antártica

TSM - Temperatura da Superfície do Mar

CCSM3- Community Climate System Model 3

CAM3 - Community Atmospheric Modelo versão 3

POP - Programa Oceano Paralelo

ZCIT - Zona de Convergência Intertropical

NOAA - Administração Nacional Oceânica e Atmosférica

ZCIT - Zona de Convergência Intertropical

TOE - Teleconexão Ortogonal Empírica

FOE - Função Ortogonal Empírica

SMAS - Sistema de Monção da América do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

% - Porcentagem

°C - Graus Celsius

°K -Graus Kelvin

mm - Milímetro

m -Metro

Km - Quilômetro

Sumário

1. INTRODUÇÃO	13
2. METODOLOGIA	16
2.1. Área de estudo	17
2.2. Banco de dados	21
2.2.1. Dados Climáticos	21
2.2.1.1. Trace-21 ka	21
2.2.1.2. Era 5 Land	23
2.2.1.3. NOAA	23
2.3. Procedimento estatístico	23
2.3.1. Teleconexões Ortogonal Empírica (TOE)	23
3. RESULTADOS	26
3.1. Modo de variabilidade	26
3.1.1. Modo de variabilidade do Pacífico - El Niño Oscilação Sul	26
3.1.1.1. Influência na Temperatura da América do Sul	28
3.1.1.2. Influência na Precipitação da América do Sul	31
3.1.2. Modo de variabilidade do Atlântico - Oscilação Multidecadal do Atlântico (AMO)	33
3.1.2.1. Influência na Temperatura	36
3.1.2.2. Influência na Precipitação	38
4. DISCUSSÃO	41
4.1. Modo de variabilidade do Pacífico - El Niño Oscilação Sul	43
4.1.1. Influência na Temperatura da América do Sul	45
4.1.2. Influência na precipitação da América do Sul	46
4.2. Modo de variabilidade do Atlântico - Oscilação Multidecadal do Atlântico.	47
4.2.1. Influência na Temperatura da América do Sul	48
4.2.2. Influência na precipitação da América do Sul	49
5. CONCLUSÃO	50
6. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	53

1. INTRODUÇÃO

O Holoceno é uma época geológica que compreende o intervalo mais recente da história da superfície terrestre, começando formalmente há 11700 anos antes do presente (Walker *et al.*, 2009). O clima durante esse período apresentou mudanças significativas ao longo do tempo. Durante o Holoceno, temperaturas mais altas em relação ao período anterior (Pleistoceno) resultaram no derretimento das calotas polares, consequentemente, aumentando os níveis do mar (Vimeux, 2009; Zhang *et al.*, 2016), alterações de sistemas de monções (Thompson *et al.*, 2002; Roche *et al.*, 2016) e variações significativas nos regimes pluviométricos (Hodgson *et al.*, 2016).

De acordo com Walker *et al.* (2009), o Holoceno pode ser dividido em três subintervalos: Holoceno inicial, médio e tardio. Durante o inicial (11700 e 8200 anos AP), houve baixos (altos) níveis de insolação no Hemisfério Sul (norte), resultando em intensas atividades maçônicas (Zhang *et al.*, 2011). Já durante o Holoceno médio (entre 8200 e 4200 anos AP), as temperaturas no Hemisfério Norte foram mais altas e as monções se enfraqueceram (Wanner *et al.*, 2008). Por fim, no tardio (a partir de 4200 anos AP), houve queda nas temperaturas no Hemisfério Norte em decorrência da diminuição da insolação (Denton e Karlén, 1973). Ao longo do Holoceno, as variações na insolação devido às mudanças na precessão terrestre desempenharam um papel crucial na distribuição da precipitação no continente da América do Sul. (Smith; Mayle, 2018; Baker *et al.*, 2001; Haug *et al.*, 2001).

Reconstruções paleoclimáticas são conduzidas principalmente com utilização de registros fósseis (proxies) que fornecem informações climáticas passadas. Esses proxies incluem dados obtidos de anéis de árvores, sedimentos lacustres e marinhos, espeleotemas, corais, pólen e núcleos de gelo e etc. (Erb *et al.*, 2022). Cada um desses proxies fornece uma visão única das condições climáticas, como temperatura, precipitação e composição atmosférica (Erb *et al.*, 2022). Na América do Sul as mudanças na composição da paisagem e distribuição dos elementos climáticos têm sido extensivamente estudadas reportando estágios de mudanças na distribuição de umidade e consequente composição vegetal (Ortiz-Jaureguizar; Cladera., 2006).

Rodrigues *et al.* (2016) através de análise conjunta de registros polínicos observaram mudanças no sudeste e sul do Brasil em 8900, 5900, 2800, 1200 e 550 AP (Antes do Presente) quando a vegetação alterou de tipos característicos de condições mais

frias e secas para formações florestais mais adaptadas a condições mais úmidas e quentes. Nos Andes peruanos Schittek *et al.* (2015) observaram mudanças que alternam entre eventos secos e úmidos durante o Holoceno médio (8,6 - 5,6 AP), seguido de período seco entre (5,6 - 4,2 AP), úmido entre (1,8 - 1,2 AP) uma fase mais seca que se estabeleceu 1.2 ka que perdurou até 0,75 ka.

Na região amazônica do Rio Madeira, Feitosa *et al.* (2015) analisaram 10 amostras de pólen da região e observaram mudanças na deposição de sedimentos e na vegetação, oscilando entre mosaicos de estratos arbóreos e gramíneas como resposta às variações da descarga do rio durante o Holoceno tardio.

Mayle *et al.* (2000) observaram que na transição Amazônia – Cerrado, durante o Holoceno tardio, a floresta tropical boliviana expandiu para o Sul em decorrência da migração da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) alcançando sua posição mais ao sul em 3.000 AP.

No norte da Patagônia, registros fósseis de pólen e carvão reportam alta atividade de fogo durante o Holoceno inicial, associado com condições secas, seguido por condições mais úmidas no Holoceno médio e consequente redução na frequência de fogo, além da dominância de vegetação arbórea nos últimos dois milênios (Álvarez-Barra *et al.*, 2020).

Importante salientar que estas mudanças que ocorreram e vêm ocorrendo durante o Holoceno na América do Sul são também respostas às mudanças na temperatura da superfície do mar (TSM) alterando os padrões de teleconexões e, por conseguinte, a distribuição dos elementos climáticos. Cruz *et al.* (2005 e 2006), por exemplo, analisaram registros de ^{18}O das cavernas Botuverá e Santana e reportaram diminuição da chuva de monção durante o Holoceno inicial e médio, associados a menor insolação no Hemisfério Sul e consequente fraca convecção, principalmente durante o inverno causado pelo anticiclone subtropical do Atlântico Sul, associado ainda às condições de baixa pluviosidade proporcionada pela La Niña.

As teleconexões atmosféricas são conexões entre duas anomalias climáticas não frequentes, que ocorrem entre duas regiões distantes (Ambrizzi, 2003; Liu e Alexander, 2007; Reboita *et al.*, 2021). Vários padrões de teleconexões, associadas às anomalias de temperatura da superfície do mar (TSM) influenciam o clima da América do Sul como, o El Niño-Oscilação Sul (ENOS), Oscilação Antártica (AAO), Oscilação Multidecadal do Atlântico (AMO), dentre outros (Andreoli *et al.*, 2017; Reboita *et al.*, 2021).

O fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENOS), durante o Holoceno médio (8200 – 4200AP), era mais fraco que atualmente, contudo, durante o verão e principalmente o inverno nesse período, as temperaturas eram altas e com condições mais secas (Rodrigues *et al.*, 2011). Em análise multiproxi conduzida por Carré *et al.* (2012) os autores constataram que as condições médias de Lá Niña no sudoeste do Pacífico, durante o Holoceno médio, se associavam a aridez no sudeste do Brasil e ao longo de toda costa do Pacífico da América do Sul, e condições úmidas na face ocidental na região central dos Andes.

Análise de banco de dados paleoclimáticos feita por Prado *et al.* (2013) sugerem condições secas durante o Holoceno médio, principalmente na região leste da América do Sul. Durante o Holoceno tardio volta a ficar mais úmido desencadeando alterações na vegetação. Ademais, as variações no padrão de umidade estiveram relacionadas às mudanças no transporte de água das correntes do Brasil e Malvinas (Prado *et al.*, 2013).

Já a Oscilação Multidecadal do Atlântico (AMO) que segundo análises de sedimentos feita por Bahr *et al.* (2021) propagaram anomalias da temperatura da superfície do mar (TSM) de altas para baixas latitudes, que alteraram centros de convecção e desencadeou secas na porção leste da América do Sul durante os últimos 2000 anos.

A oscilação antártica (AAO) é outro importante mecanismo de modulação climática na América do Sul, responsável pelas diferenças de pressão atmosférica entre médias latitudes e região antártica (Gong e Wang, 1999). No sudeste da América do Sul a AAO associada ao ENOS causa impactos significativos na precipitação, principalmente durante a primavera (Silvestri e Vera, 2003). No último máximo glacial, durante a fase positiva (negativa) da AAO, Justino e Peltier. (2008) demonstraram que fracos (fortes) ventos ocorriam próximo a 30° - 45° S (45° – 60°S) reduzindo (aumentando) a perda de calor do oceano para atmosfera, influenciando no clima local. Análises de pólenes conduzidas por Waldmann *et al.* (2014), revelaram que na Terra do Fogo a vegetação estépica foi dominante durante o Holoceno inicial (11,300 – 8000 AP), seguido por mudanças significativas na vegetação caracterizada por condições mais úmidas, com ecótono floresta/estepe entre 8000 - 6500 AP. Nos períodos seguintes, em resposta ao aumento de umidade, florestas de *Notofagus* expandiram (6500 – 4000 AP) enquanto uma paisagem mais aberta se estabeleceu na região após 1100 AP.

Embora tenham crescido nos últimos anos, os esforços empregados em numerosos estudos revelaram muito sobre a cadeia de eventos desencadeados pelas mudanças na

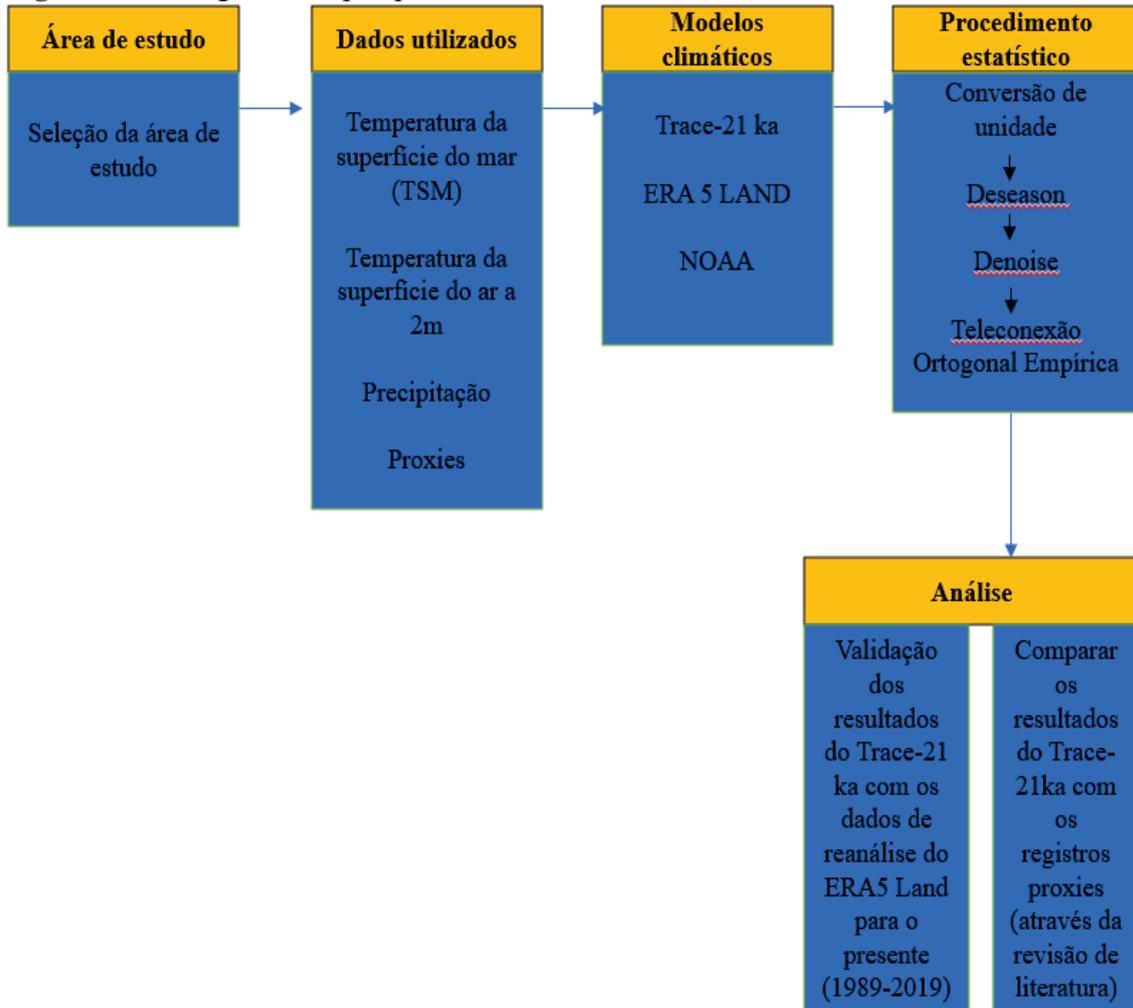
Temperatura da Superfície do Mar (TSM) e seu impacto na América do Sul em diferentes momentos ao longo do Holoceno. Ademais, poucos trabalhos buscam investigar como os modelos de circulação global ou regional representam aquelas condições apresentadas pelos proxies e vice-versa.

Desta forma, o objetivo deste trabalho é investigar como os modos de variabilidade El Niño Oscilação Sul (ENOS) e a Oscilação Multidecadal do Atlântico (AMO) influenciaram a distribuição da temperatura e precipitação na América do Sul em determinados períodos do Holoceno, como 9000, 6000, 3000, 2000 e 1000 anos AP, comparando com reconstruções feitas por proxies através da literatura.

2. METODOLOGIA

Para alcançar o objetivo proposto, o presente estudo foi desenvolvido a partir de uma abordagem quali-quantitativa e exploratória dos dados. Foram analisados intervalos temporais dos 12000 anos antes do presente, destacando-se 9150-8850, 6150-5850, 3150-2850, 2150-1850 e 1150-0850 AP. Esses períodos foram cruciais para as mudanças de paisagem/ambiente do continente da América do sul, ou seja, são períodos que foram identificados mudanças climáticas que direcionaram na mudança da distribuição da biodiversidade (Mayewski *et al.*, 2004). Os processos empregados foram divididos em 5 etapas e podem ser observados no fluxograma da figura 1.

Figura 1: Fluxograma da pesquisa



Fonte: Gusmão, 2024

2.1. Área de estudo

A América do Sul localiza-se entre as coordenadas 12° N e 55° S e 80°W e 10°W, com um território de 18 milhões de quilômetros quadrados. É banhada a leste pelo oceano Atlântico e a oeste pelo oceano Pacífico (Mechoso *et al.*, 2005). O continente é formado por planaltos de origem geológica muito antiga na costa leste. No interior, verifica-se uma predominância de planaltos com pouca elevação e planícies, e no ocidente o relevo é constituído por grandes altitudes, onde se localiza a Cordilheiras dos Andes (Cardoso, 2020).

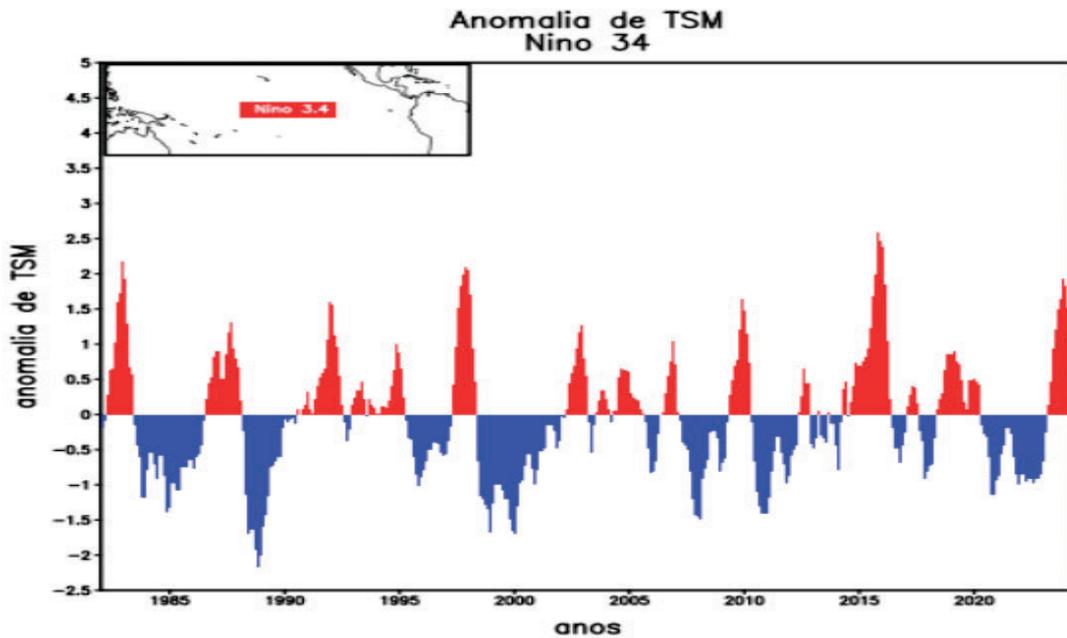
O continente possui uma diversidade de biomas, sendo, as florestas tropicais úmidas (Floresta Amazônica, Mata Atlântica), manguezais, pradarias, matagais, florestas temperadas e savana, dentre outras (Bullock *et al.*, 1995; Christopherson *et al.*, 2012; Neira *et al.*, 2002; Wirth *et al.*, 2001).

O continente está sob influência de duas zonas climáticas de acordo com a classificação de Köppen: intertropical e temperada, com variações de que vão de clima equatorial e tropical, além da presença de clima subtropical e temperado (Fernandez, 2017). O clima tropical encontra-se no Brasil, Paraguai, Venezuela e Colômbia, já o subtropical enquadra-se nas áreas do Uruguai, Argentina e no sul do Brasil e o clima temperado se encontra no sul do Chile (Cardoso, 2020).

O clima da América do Sul é influenciado pelos diversos modos de variabilidade climática, dentre eles: AMO, ENOS, principalmente na distribuição da precipitação. (figura 3 e tabela 1). A fase positiva (El Niño) do ENOS influencia a região tropical do continente através das variações nas células de Walker (Nogues-Paegle *et al.*, 2002). Isso quer dizer que, na fase positiva do El Niño, há um aquecimento anômalo nas águas superficiais do Oceano Pacífico equatorial e central. Isso altera a circulação de Walker, que é caracterizada por ventos alísios soprando de leste a oeste ao longo do Pacífico equatorial. Durante o El Niño, esses ventos alísios enfraquecem ou até invertem, deslocando a convecção atmosférica (zonas de chuva intensa) mais para o centro e leste do Pacífico, e modificando os padrões climáticos globais. Esses fenômenos têm um impacto significativo no clima da região tropical e subtropical da América do Sul. Já durante o La Niña, causa uma inversão nesse padrão, ocorre o resfriamento do Pacífico, que leva ao da célula de Walker, ou seja, os ventos alísios se intensificam, aumentando a ressurgência de águas frias ao longo da costa oeste da América do sul e levando a ressurgência das águas frias no Pacífico. Essas variações causam secas na faixa equatorial do continente, que estão associadas ao deslocamento da célula de Walker para leste, devido ao aumento da temperatura da superfície do mar (Rao e Hada, 1990).

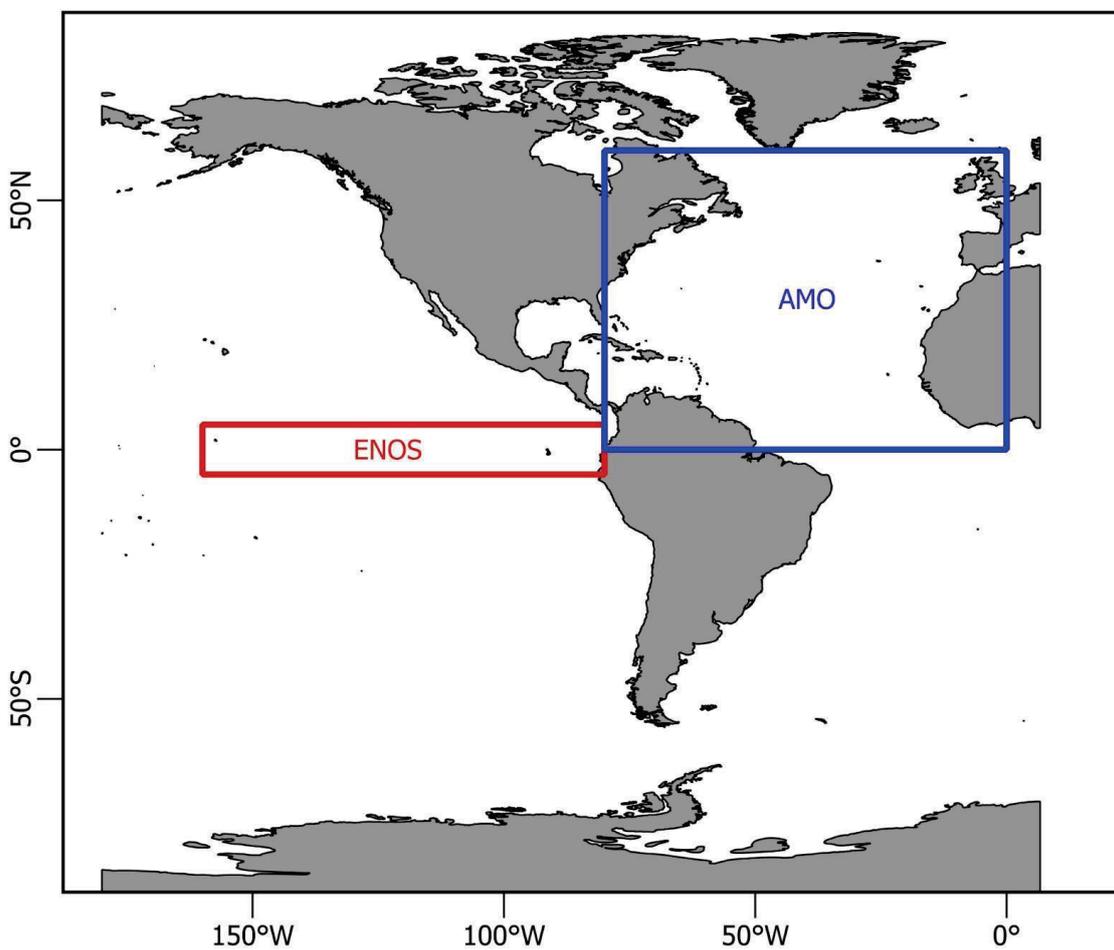
A fase positiva do ENOS também ocasiona chuvas acima da média no Sul do Brasil, norte do Uruguai e da Argentina (Silva *et al.*, 2009). Em sua fase negativa (La Niña) provocam um movimento ao contrário do El Niño, chuvas na faixa equatorial do continente e secas no sul do Brasil, norte do Uruguai e da Argentina, devido a diminuição da temperatura da superfície do mar, como consequência do aumento dos ventos alísios na região equatorial (Mcphaden, 2002; Lee; Mcphaden., 2010). Esses fenômenos ocorrem regularmente a cada 2 a 7 anos, embora varie em intensidade e duração (McPhaden, 1999). A figura 2 mostra o ciclo anual dos fenômenos El Niño e La Niña.

Figura 2: Representação do intervalo do El Niño e La Niña, onde a cor vermelha representa os intervalos da fase positiva e o azul os intervalos da fase negativa.



Fonte: CPC/NCEP/NOAA

Figura 3: Representação da área de estudo



Fonte: Gusmão, 2024

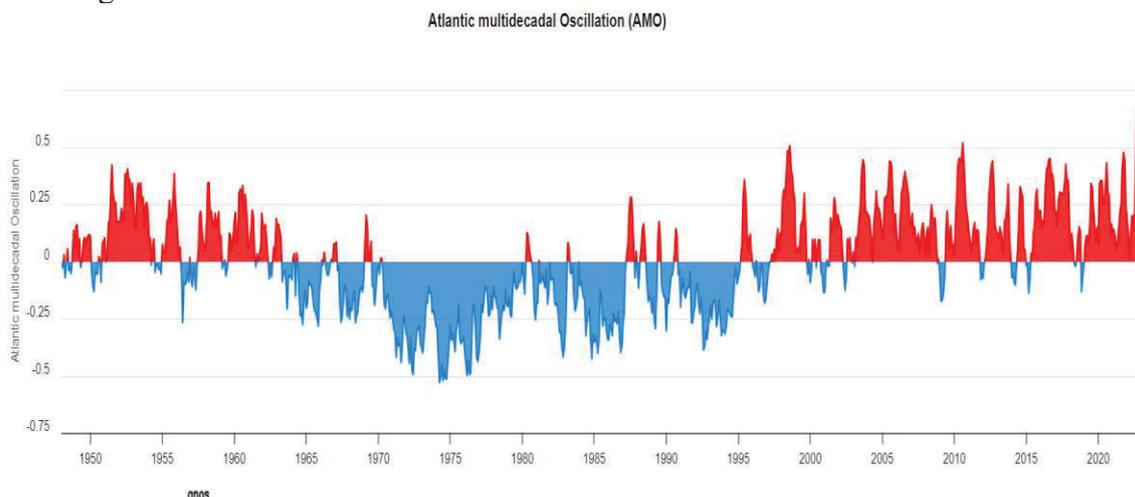
Tabela 1: Localização dos modos de variabilidades oceânicas

Modo de variabilidade oceânica	Lat	Lon
ENOS	5° S a 5° N	160° W a 80°W
AMO	0° a 60°N	80°W a 0°

Já a AMO influencia os sistemas de ventos nas encostas orientais dos Andes, chamado de jatos de baixos níveis (JBN). Os JBN são ventos que transportam grandes quantidades de umidade das encostas orientais dos Andes para o interior do continente, afetando significativamente a variabilidade de chuvas na América do sul (Nascimento et al., 2016; Sun et al., 2015).

A AMO se manifesta como modo de variabilidade da TSM, de modo que as suas fases positivas estão relacionadas ao resfriamento no Atlântico equatorial e ao aquecimento no Atlântico Norte (Martins *et al.*, 2018). Essas condições provocam uma redução das chuvas do nordeste da América do Sul e um aumento no extremo norte do continente (Venezuela e Colômbia), além de um aumento na precipitação na região sudeste. Entretanto, a fase negativa está relacionada ao aquecimento no Atlântico equatorial e ao resfriamento no Atlântico Norte, intensificando assim, o aumento da precipitação no nordeste e uma redução no extremo norte e sudeste do continente da América do Sul (Mann *et al.*, 2020). O AMO possui um ciclo de variabilidade que ocorre ao longo de várias décadas. Cada ciclo completo dura de 40 a 60 anos (Kerr, 2000). Logo abaixo está representado o gráfico 2, ilustrando o ciclo desse fenômeno.

Figura 4: Representação do intervalo da fase positiva e negativa do AMO, onde o vermelho está representando os intervalos da fase positiva e a cor azul os intervalos da fase negativa.



Fonte: Souza et al., (2021).

2.2. Banco de dados

De acordo com a figura 1, o banco de dados é composto por um conjunto de informações, a saber: Temperatura da Superfície do Mar (TSM), temperatura da superfície do ar a 2m e precipitação (proveniente do modelo trace-21ka, NOAA e ERA 5 Land), além dos dados dos registros proxies obtidos através da literatura.

2.2.1. Dados Climáticos

2.2.1.1. Trace-21 ka

O modelo Trace-21 ka, foi utilizado por cobrir período que se estende de última era glacial e o Holoceno. Esses períodos (9000, 6000, 3000, 2000 e 1000) do Holoceno são essenciais para estudar as transições climáticas e os processos subjacentes que moldaram o clima moderno (Lowry et al., 2019).

O TraCE-21 ka é um experimento baseado na terceira versão do modelo acoplado do sistema terrestre -atmosférico (*Community Atmospheric Model 3*) - oceano (Programa *Parallel Ocean*) - gelo marinho (*Community Sea Ice Model*) e um modelo dinâmico de vegetação global acoplado. Ele fornece informações climáticas dos últimos 21000 anos

(AP) (Ehlers *et al.*, 2011; Otto-Bliesner *et al.*, 2006). Na Tabela 2 estão representados cada um dos componentes do modelo.

Foram utilizados os dados da temperatura da superfície do mar, temperatura do ar a 2 metros e precipitação para o passado das simulações do Trace-21 ka do *Community Climate System Model 3* (CCSM3) (Liu, 2009, 2014). O CCSM3 acopla componentes da atmosfera, superfície terrestre, gelo marinho e o oceano. O componente atmosférico do modelo é simulado pelo *Community Atmospheric Model* versão 3 (CAM3) (Collins *et al.*, 2006), enquanto o componente oceânico é simulado pelo *Parallel Ocean Program* (POP) (Smith e Gent, 2002). Uma vegetação dinâmica é simulada com base no *Dynamic Vegetation Model*.

O modelo atmosférico e terrestre possui uma resolução T42 (2,8° em latitude e longitude) e T31 (3,75° em latitude e longitude), além de ambas possuírem 26 níveis verticais (Hack *et al.*, 2006). Já o modelo oceânico, possui uma grade de 320 X 384 pontos e 40 níveis a 5,5 km de profundidade, a resolução horizontal corresponde ao espaçamento de 1° em latitude e longitude.

Tabela 2: Representação dos componentes do modelo

Simulação do modelo	Componente atmosférico	Componente terrestre	Componente oceânico	Componente do gelo marinho
TraCE-21KA	Modelo de Atmosfera Comunitária (CAM3) (Collins et al., 2006)	Modelo de Terra Comunitária- Módulo de Vegetação Global (CLM -DGVM)	Programa Oceano Paralelo (POP) (Collins et al., 2006)	Modelo de Gelo Marinho Comunitário (Collins et al., 2006)
	3.75° resolução horizontal	3.75° resolução horizontal	Coordenada z vertical com 25 níveis	Modelo termodinâmico-dinâmico que inclui distribuição de gelo sub-grade
	26 resoluções vertical de coordenadas híbrida		3.6 resoluções longitudinal e resolução latitudinal	3.6 resoluções longitudinal e latitudinal

Fonte: Lowry et al. 2019

2.2.1.2. Era 5 Land

A seleção do modelo ERA5 Land foi baseada pela sua ampla aceitação na comunidade científica, proporcionando dados consistentes e de alta qualidade ao longo de um período extenso (Hersbach *et al.*, 2020). As atualizações contínuas e a correção das variáveis atmosféricas para as diferenças de altitude entre as grades asseguram uma maior precisão nos dados, tornando-o ideal para estudos climáticos regionais e locais (Muñoz, 2019).

Dados mensais da temperatura da superfície a 2 metros e da precipitação para o presente (1989-2019) da América do Sul do Era 5 Land foram utilizados para validar com os dados do passado do modelo Trace-21 ka. O ERA 5 Land corresponde a melhoria dos dados de reanálise climática do ERA5, uma vez que eles são forçados por campos meteorológicos e principalmente, relacionada à alta resolução horizontal $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ (9 km) (Muñoz, 2019). Isso quer dizer que usa como entrada variáveis atmosféricas do ERA 5, como por exemplo, a temperatura, precipitação, umidade do ar, evaporação, dentre outras variáveis. A série dos dados inicia a partir de 1950 até o presente. Os dados de temperatura do ar a 2 metros de altura são obtidos em Kelvin ($^\circ\text{K}$) e foram convertidos em Celsius ($^\circ\text{C}$) e a precipitação são obtidas em metros (m) e foram convertidos em milímetros (mm).

2.2.1.3. NOAA

Foram utilizados os dados mensais da temperatura da superfície do mar ($^\circ\text{C}$) para o presente (1989-2019) da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) para validar com os resultados do Trace 21 ka. O NOAA é uma agência do governo dos Estados Unidos que fornece campos completos de temperatura do oceano construídos pelas combinações de diferentes plataformas (satélites, boias e navios) (Huang *et al.*, 2021). A série de dados se inicia a partir de 1981 até o presente, com uma resolução de $0,25^\circ$ de latitude x $0,25^\circ$ de longitude (Huang *et al.*, 2021).

2.3. Procedimento estatístico

2.3.1. Teleconexões Ortogonal Empírica (TOE)

Foram analisados os padrões de TSM das regiões oceânicas características dos modos de variabilidade climática ENOS e AMO para o presente (Controle). Os resultados obtidos para as condições atuais serviram de parâmetro para avaliação dos períodos a serem avaliados durante o Holoceno (9150-8850, 6150-5850, 3150-2850, 2150-1850 e 1150-0850 AP).

As teleconexões ortogonais empíricas (TOE) foram introduzidas pela primeira vez na literatura como alternativa a abordagem clássicas das funções ortogonais empíricas (FOE) de Van den Dool *et al.*, (2000). Van den Dool. (2007) comenta que tanto o TOE quanto o FOE são muito parecidos, com a primeira produzindo resultado menos abstrato, pois refletem padrões de correlação físicas e observável, e esses padrões são mais facilmente associados a fenômenos climáticos específicos, facilitando a interpretação e a aplicação prática dos resultados. Os dois métodos decompõem campo espaço temporal em conjunto de padrões independentes. Ao contrário dos FOE, que são ortogonais no tempo e no espaço, os TOE produzem padrões que são ortogonais no espaço ou tempo.

O TOE carrega um significado quantitativo na forma de variância, permitindo assim uma interpretação intuitiva dos resultados. Além do mais, o método é fácil de ser compreendido tanto metodologicamente como algorítmicamente. Além disso, é possível calcular o TOE interno isolando padrões de teleconexão dentro de um domínio espaço-temporal. O TOE pode ser usado também para investigar a teleconectividade entre dois domínios, cujo, Van Den Dool. (2007) chama TOE 2. Nesta situação, a variabilidade temporal de um domínio (preditor) é analisada em relação a variância de outro domínio (resposta).

Van Den Dool *et al.* (2000) e Van Den Dool. (2007), descrevem que primeiramente os perfis temporais de cada pixel “*pp*” do domínio preditor são regredidos em relação aos de todos os pixels “*pr*” no domínio de resposta. Os coeficientes de determinação calculados são somados e os pixels com a maior soma para explicar a variância dentro do domínio de resposta é mencionado como o “*ponto base*” do modo principal, em seguida, os resíduos de regressão são tomados como base para o cálculo do próximo TOE, assegurando assim a ortogonalidade das teleconexões.

A TOE foi calculada através das anomalias mensais de TSM obtidas através dos modelos e tomado o primeiro componente para buscar como as variações da TSM influenciaram nas variabilidades oceânicas, conseqüentemente, influenciando nos elementos climáticos da América do Sul (temperatura e precipitação). Logo após esses

resultados, serão realizadas comparações com os registros proxies (espeleotemas, grãos de pólen, carvão, dentre outros).

Os períodos a serem avaliados durante o Holoceno serão centralizados em 9000, 6000, 3000, 2000 e 1000 anos AP. Para isso, será considerada uma amplitude temporal de 300 anos em torno dos períodos centrais a serem avaliados de maneira que sejam calculadas as médias entre 150 anos antes e 150 anos depois de cada período.

Primeiramente, procedeu-se à conversão das unidades no ambiente no RStudio, visando garantir a consistência dos dados. A temperatura do ar a 2 metros foi convertida de graus Kelvin (°K) para graus Celsius (°C), enquanto a precipitação, originalmente em metros (m), foi convertida para milímetros (mm). Tal medida foi adotada com o propósito de padronizar as unidades e facilitar a análise dos dados. É importante ressaltar que a temperatura da superfície do mar já estava disponível na unidade de medida adequada, ou seja, em graus Celsius (°C). Logo em seguida, para remover variações de alta frequência nos dados brutos, foi aplicada a função *deseason*, responsável por remover a sazonalidade de séries temporais. Posteriormente, para filtra o ruído de um RasterStack decompondo-o em componentes principais e subsequente reconstrução em apenas um subconjunto de componentes, recorreu-se à função *denoise*. Por fim, para alcançar os valores previstos da temperatura da superfície do mar e as respostas correspondentes de temperatura e precipitação na América do Sul, utilizou-se a função de Teleconexão Ortogonal Empírica (TOE).

Para o desenvolvimento deste estudo foi utilizado a linguagem de programação R, através do desenvolvimento de scripts para fazer análises exploratórias do banco de dados (R Development Core Team, 2022). A seleção do software R foi por possuir diversos pacotes (Verzy, 2019). Foi utilizado o pacote TIDYVERSE para o tratamento dos dados (Kuhn, 2020) e o DPLYR para análises estatísticas (Wickham *et al.*, 2019). Além do pacote *open source remote* responsável por fornecer uma interface conveniente para realizar operações comuns de controle de versão diretamente do ambiente Rstudio (Appelhans, Detsch e Nauss, 2015). Esse pacote é baseado no pacote raster (Hijmans e Van Etten, 2015). O pacote raster fornece funções para manipular dados espaciais. O raster divide o espaço em células (pixels, retângulos) de tamanho igual. Através desse pacote é possível ler, escrever, manipular, analisar e modelar os dados (Hijmans *et al.*, 2023).

3. RESULTADOS

Este tópico será organizado em seção única que mostrará a influência dos modos de variabilidades oceânicas nas variáveis climáticas (temperatura e precipitação) do continente da América do Sul, tanto para o presente quanto para o passado. Para o presente, foram utilizados dados de reanálise do ERA 5 LAND e do NOAA e para o passado foram utilizados dados do Trace - 21ka e logo em seguida, foi realizada a comparação dos resultados do modelo com os diversos proxies obtidos através da literatura.

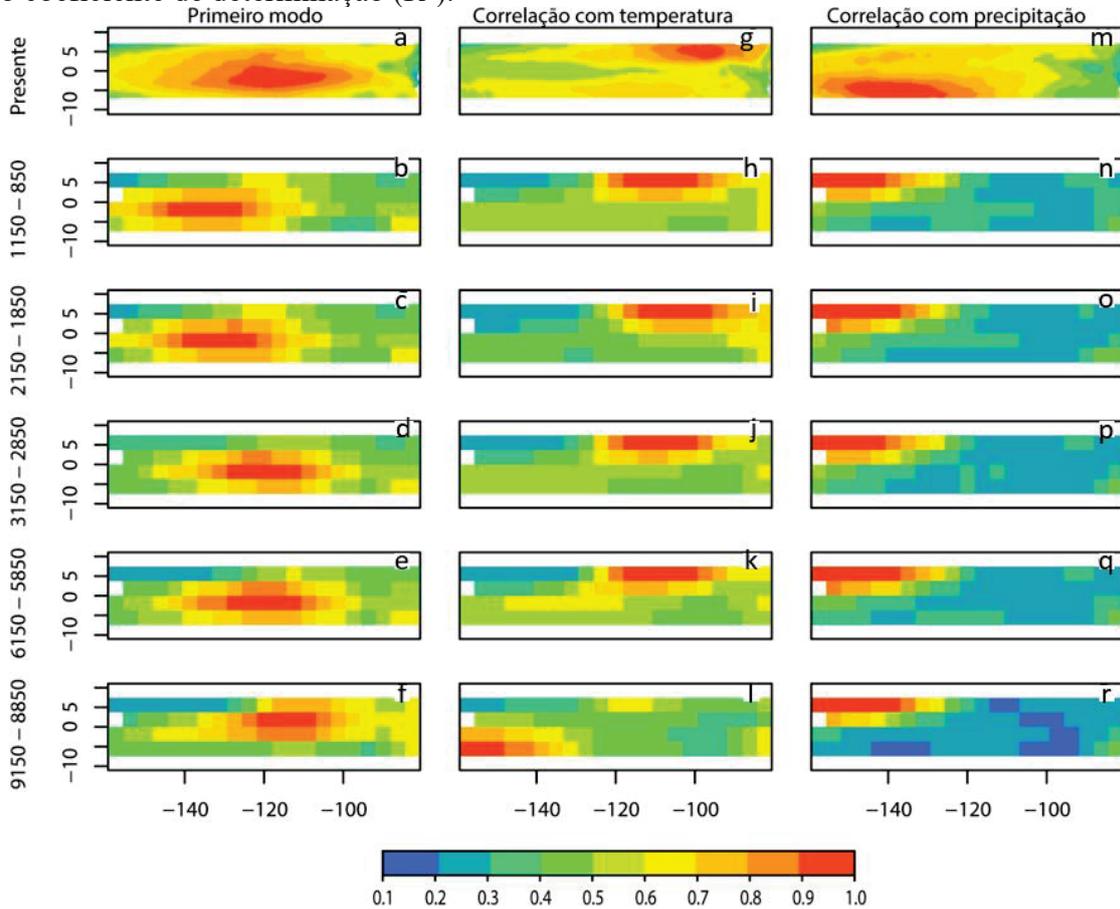
3.1. Modo de variabilidade

Nessa seção serão analisados a influência dos modos de variabilidade oceânicas, localizados no Oceano Pacífico (ENOS) e Oscilação Multidecadal do Atlântico (AMO) e seus impactos na variabilidade climática da temperatura e precipitação da América do Sul durante certos períodos do Holoceno e o presente.

3.1.1. Modo de variabilidade do Pacífico - El Niño Oscilação Sul

A Figura 5 mostra o modo de variabilidades dominante do ENOS para os períodos estudados do Holoceno, com o objetivo de compreender as dinâmicas climáticas passadas e presente. A coluna referente ao primeiro modo refere-se aos modos dominantes da variabilidade de TSM para cada período enquanto as colunas de correlação com temperatura e precipitação referem-se às regiões oceânicas com maior correlação com a temperatura e precipitação na América do Sul para cada período.

Figura 5: Representação dos modos dominante de variabilidade ENOS no Pacífico para cada período do Holoceno e o presente. O primeiro modo (A), assim como correlação com a temperatura (G) e precipitação (M) foram utilizados a TSM do modelo NOAA. Já para o passado foram utilizados a TSM do Trace-21 ka. A barra de escalar representada o coeficiente de determinação (R^2).



Fonte: Gusmão, (2024)

O primeiro componente do ENOS para o presente (Figura 5.a), responde por uma variância total de 58,37% do domínio. Durante o Holoceno Tardio (Figuras 5.b e 5.c), a variabilidade chegou a atingir uma resposta de 50,01% e 49,91% da variância respectivamente, indicando um menor domínio do ENOS em comparação ao período contemporâneo (Figura 3.A). No entanto, durante o período de 3150-2850 AP (Figura 5.d), o primeiro componente responde por 48,25% da variância, mostrando que o sinal da dominância do ENOS foi menor do que nos períodos anteriormente mencionados. Já durante o Holoceno médio (Figura 5.e), a variância explicada alcança 50,51%, sugerindo uma maior variabilidade do domínio do ENOS no Pacífico em relação ao Holoceno tardio, embora ainda mais fraco do que o presente. Por último, durante o Holoceno inicial (Figura 5.f), essa proporção do domínio representa apenas 52,21% da variância, indicando uma dominância mais forte do ENOS em relação aos períodos do Holoceno, contudo ainda é mais fraco do que o presente. Embora o domínio do ENOS durante os

períodos do Holoceno seja menos pronunciado em comparação com o período atual, ela sugere uma flutuação significativa na intensidade do ENOS ao longo do tempo, com potenciais implicações para o clima regional e global, bem como para os ecossistemas associados.

O ponto de maior correlação com temperatura na América do sul explica 7,61% da variância original durante o presente (Figura 5.g). Já durante o Holoceno tardio 1150 - 850 AP (Figura 5.h), 2150 - 1850 AP (Figura 3.i) e 3150 - 2850 AP (Figura 3.j) a variância explicada foi de 2,09%, 2,08% e 2,15%, respectivamente, apontando um menor sinal da temperatura em relação ao presente. Já durante o Holoceno médio (Figura 5.k) a variância chega a atingir 1,66%, indicando que o sinal da temperatura foi mais fraco do que durante o Holoceno tardio. E por último durante o Holoceno inicial (Figura 3.l), essa proporção da variância explicada é de 1,61% da temperatura, indicando um menor sinal em relação ao Holoceno médio e principalmente o presente (Figura 5.g). Importante mencionar que distribuição das correlações de TSM com a temperatura da América do Sul se mantiveram similares entre o Holoceno médio e o presente, mas esteve alterado durante o Holoceno inicial quando a região de maior correlação estava à sudoeste da área estudada.

Durante o presente (Figura 5.m), o ponto base explica aproximadamente 4,48% da variação da precipitação na América do Sul. Nos períodos do Holoceno tardio (Figuras 5.n, 5.o e 5.p), a variância explicada é significativamente menor, entorno de 1,67%, 1,87% e 1,65%, respectivamente, indicando um menor sinal da precipitação em comparação com o presente. Contudo, durante o Holoceno médio (Figura 5.q) a variação atinge 1,4%, indicando que o sinal da precipitação seja menos intenso do que o presente. Por último, durante o Holoceno Inicial (Figura 5.r), essa explicação da variância chega a 1,19%, indicando um sinal da precipitação ainda menos intenso do que o presente.

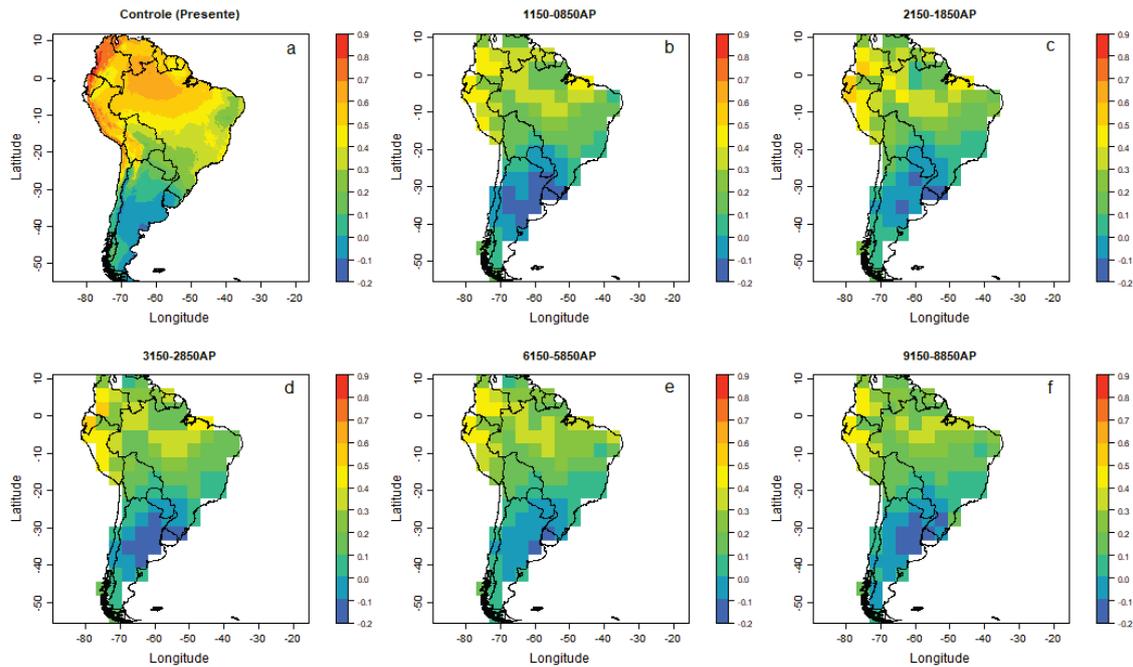
Por fim, a distribuição das correlações por área entre ENOS e precipitação ao longo do Holoceno mostra que houve grandes alterações com região de maior correlação a noroeste da região de estudo, exceto para as condições presentes quando os maiores valores se concentram na porção sudoeste.

3.1.1.1. Influência na Temperatura da América do Sul

Na figura 6, está representada a resposta da temperatura média do continente da América do Sul em relação ao El Niño Oscilação Sul. Onde, o período controle (presente)

foi utilizado a temperatura da superfície do ar do modelo ERA 5 Land enquanto durante o passado, foram utilizados a temperatura da superfície do ar a 2 m do modelo Trace-21 ka.

Figura 6: Representação da resposta da correlação entre o ENOS e a temperatura média da América do Sul para cada período do Holoceno e o presente. A barra de escala representa os valores da correlação entre as variáveis.



Fonte: Gusmão, (2024).

Durante o período presente (Figura 6.a), foram identificados diferentes padrões de correlação em diversas regiões da América do Sul. Na região norte do Brasil, especialmente próxima à floresta Amazônica, obteve uma correlação positiva de 0,6, sugerindo aumento da temperatura com uma correlação moderada/forte com El Niño. Da mesma forma, na região sudeste e parte do nordeste do continente, uma correlação positiva de 0,3/0,4 sugere uma relação fraca da correlação entre o El Niño e o aumento da temperatura nessas áreas. Além disso, no lado oeste do extremo norte do continente, obteve uma correlação positiva de 0,9 sugerindo uma associação muito forte entre o El Niño e a temperatura. Essa associação sugere que nessa região houve um aumento considerável da temperatura durante o El Niño. Por outra lado na região do extremo sul do continente da América do sul obteve valores de correlação negativa de -0,1, resultando em um efeito oposto, ou seja, nessas regiões houve uma associação muito fraca entre o El Niño e a redução da temperatura.

Em relação ao presente, a influência do El Niño na temperatura da América do Sul durante o Holoceno foi consideravelmente menor, tal qual sugerido pelos menores valores de variância explicada pelos modos dominantes. Desta forma, não foram observadas correlações fortes como no período controle. Durante o Holoceno as correlações variaram de fracas a moderadas no continente. Ao longo do período de 1150 - 0850 AP (Figura 6.b) foi observado que a região do extremo norte do continente obteve uma correlação positiva de 0,5. Isso sugere que nessa região houve uma associação moderada da correlação entre o El Niño e o aumento da temperatura. Além disso, observa-se uma correlação positiva de 0,3 na região norte do Brasil. Isso sugere que houve uma associação fraca da correlação entre o El Niño e o aumento temperatura. Entretanto, essa associação foi inferior em relação ao presente (Figura 6.a). Por outro lado, foi observada valores de correlação negativa de -0,2 nas proximidades dos Pampas e no extremo sul do continente, indicando inversão do efeito, ou seja, esses fenômenos ocasionou a queda da temperatura nessa região.

No decorrer do período 2150 - 1850 AP (Figura 6.c) e 3150 - 1850 AP (Figura 6.d), foram identificados também os padrões de correlação positivos semelhantes ao Holoceno tardio nas regiões norte, nordeste do Brasil e no lado noroeste do continente da América do Sul, entretanto, nessa face noroeste, próximo do Equador e da Colômbia foram identificados uma correlação positiva de 0,7. Essa correlação sugere uma associação forte entre o El Niño e a temperatura naquela região. Todavia, é importante destacar que essa associação também foi menos intensa em relação ao presente (Figura 6.a). Já nas regiões do extremo sul do continente continuou com a mesma correlação, ou seja, continuou com associação muito fraca do El Niño com a temperatura naquela região. Podemos observar que durante o Holoceno médio (Figura 6.e), os resultados da correlação positiva e negativa foram semelhantes ao do Holoceno tardio, indicando uma semelhança entre a associação da correlação entre o El Niño e a temperatura.

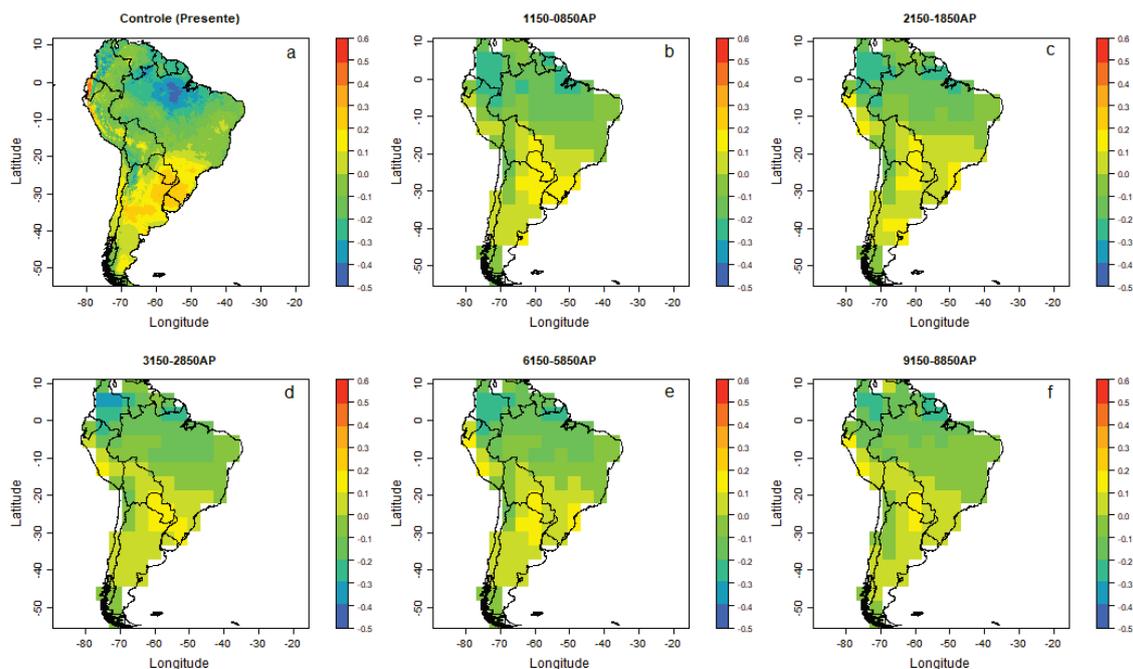
De acordo com o período 9150 – 8850 AP (Figura 6.f), foi observado uma correlação positiva de 0,3 na região norte, nordeste e sudeste do Brasil. Embora essa correlação seja mais fraca do que o presente (Figura 6.a), ela ainda sugere uma associação fraca da correlação entre o El Niño e o aumento da temperatura. Além disso, no lado noroeste do continente, foi observada correlação positiva moderada entre 0,5 e 0,7. Todavia, é importante ressaltar que essa associação no Holoceno inicial foi mais fraca em relação ao presente (Figura 6.a), principalmente no lado oeste. Por outro lado, observa-se uma inversão desse fenômeno na região do extremo sul do continente sul-americano

devido aos valores de correlação negativo de -0,2, ou seja, sugere uma associação muito fraca da correlação entre o El Niño e a redução da temperatura.

3.1.1.2. Influência na Precipitação da América do Sul

A figura 7 mostra a resposta da precipitação da América do Sul em relação ao El Niño Oscilação Sul. Onde, o período controle (presente) foi utilizado a precipitação do modelo ERA 5 Land enquanto o passado, foram utilizados a precipitação do modelo Trace-21 ka.

Figura 7: Representação da resposta da correlação entre o ENOS e a precipitação da América do Sul para cada período do Holoceno e o presente. A barra de escala está representando os valores da correlação entre as variáveis.



Fonte: Gusmão, (2024).

Durante o presente (Figura 7.a), foi detectado uma correlação positiva de 0,4 e 0,5 na região sudeste e sul do continente sul-americano. Além disso, essa correlação positiva também foi identificada próximo ao Chile. Essa correlação sugere uma associação moderada da correlação do El Niño com o aumento da precipitação nessas regiões. No entanto, nota-se uma correlação de -0,4 e -0,5 na região norte do Brasil, indicando que há uma associação moderada entre o El Niño e a precipitação, resultando em um efeito ao contrário, ou seja, essa associação sugere que o El Niño pode ter influenciado na redução

da precipitação nessas regiões. Além disso, percebe-se uma correlação de $-0,1$ e $0,1$ na região nordeste do Brasil, sugerindo uma associação muito fraca da correlação entre o El Niño e a precipitação.

No período de controle, a influência do El Niño na precipitação da América do Sul durante o Holoceno fora substancialmente reduzida, conforme indicado pelos valores inferiores de variância explicada pelos principais modos. Assim, não foram identificadas correlações tão evidentes como no período de controle; ao longo do Holoceno, as correlações oscilaram de muito fracas, fraca e moderadas no continente.

No decorrer do período 1150 - 0850 (Figura 7.b) e 2150-1850 (Figura 7.c), observa-se uma correlação positiva de $0,4$ na extremidade sul do continente, abrangendo também as regiões sudeste e centro-oeste do Brasil. Essa correlação sugere uma associação fraca da correlação entre o fenômeno El Niño com o aumento da precipitação nessas áreas em relação ao presente (Figura 7.a). No entanto, houve uma correlação de $-0,3$ na região do extremo norte do continente, resultando em uma associação fraca da correlação entre o El Niño e a precipitação naquela região, provocando assim um efeito ao contrário.

Ao longo do período de 3150 - 2850 AP (Figura 7.d), observa-se uma continuidade dos padrões de associação de correlação entre o El Niño e a precipitação em diferentes regiões da América do Sul. A região norte e nordeste do Brasil, juntamente com o extremo norte do continente sul-americano, manteve uma correlação negativa, semelhante àquela observada no período anterior. No entanto, na região do extremo norte, nas proximidades da Colômbia, foi registrada uma correlação de $-0,4$, sugerindo uma associação fraca da correlação entre o fenômeno El Niño com a redução da precipitação. Diante disto, percebe-se que essa associação foi inferior em relação ao presente (Figura 7.a). Por outro lado, na região sul do continente, foi observada uma correlação positiva de $0,2$. Essa correlação indica que há associação muito fraca entre o El Niño e a precipitação. Todavia, na região sudeste, obteve uma correlação positiva de $0,4$, sugerindo uma associação fraca do El Niño com o aumento da precipitação naquela região.

No decorrer do período 6150 - 5850 AP (Figura 7.e), observou-se uma correlação de $-0,3$ na região norte do Brasil. Tal correlação indica uma associação fraca entre o fenômeno El Niño e a redução da precipitação nessa área. Já no extremo norte do continente sul-americano, a correlação atingiu $-0,4$, sugerindo também uma associação fraca entre a correlação do El Niño e a diminuição da precipitação nesta região.

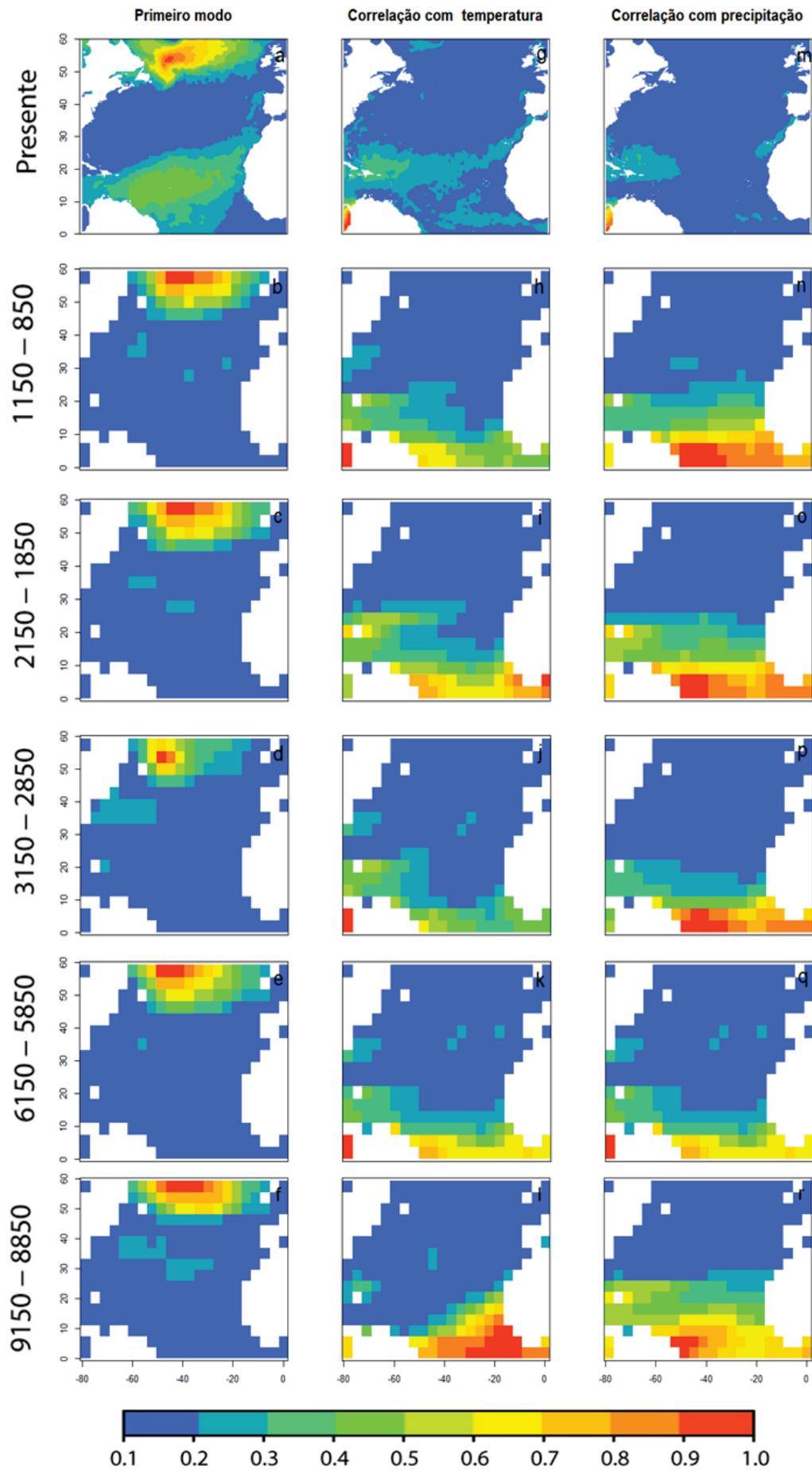
Entretanto, a associação do El Niño e a precipitação do presente (Figura 7.a) foi mais robusta do que no Holoceno médio. Similarmente, parte do litoral da região sudeste do Brasil obteve uma correlação positiva de 0,4. Esses valores de correlações também sugerem uma associação fraca entre o El Niño e o aumento da precipitação. Entretanto, essa associação foi mais fraca do que no período contemporâneo (Figura 7.a).

Durante o período 9150 - 8850 (Figura 7.f), foi observada uma correlação de -0,3 no extremo norte do continente, especialmente próximo a Colômbia. Essa correlação sugere uma associação fraca da correlação entre o El Niño e a redução da precipitação nessas regiões. Além disso, nota-se que a região norte do Brasil, obteve uma correlação de -0,2, sugerindo uma associação muito fraca da correlação entre o El Niño e a precipitação naquela região. Essa correlação entre o El Niño e a precipitação são mais fracas em relação ao presente (Figura 7.a). Por outro lado, a região sudeste e extremo sul do continente sul-americano, obteve uma correlação positiva de 0,2. Essa correlação sugere que há uma associação muito fraca entre o El Niño com o aumento da precipitação, ou seja, causando o efeito oposto nessa região. Entretanto nas região centro-oeste obteve uma correlação positiva de 0,4. Isso sugere que houve uma associação fraca da correlação entre o El Niño e o aumento da precipitação. Contudo, é importante destacar que a força das associações do presente (Figura 7.a) foi mais acentuada do que no período do Holoceno inicial.

3.1.2. Modo de variabilidade do Atlântico - Oscilação Multidecadal do Atlântico (AMO)

A Figura 8 mostra o modo de variabilidade do AMO para o Holoceno. A coluna referente ao primeiro modo mostra os modos dominantes da variabilidade da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) para cada período. Já as colunas de correlação com temperatura e precipitação indicam as regiões oceânicas que apresentam a maior correlação com a temperatura e a precipitação na América do Sul para cada período

Figura 8: Representação do modo de variabilidade AMO para cada período. O primeiro modo (A), assim como correlação com a temperatura (G) e precipitação (M) foram utilizados a TSM do modelo NOAA. Já para o passado foram utilizados a TSM do modelo Trace-21 ka. A barra de escalar representada o coeficiente de determinação (R^2).



Fonte: Gusmão, (2024).

O primeiro componente do AMO para o presente (Figura 8.a), responde por variância total de 54,45% do domínio. Contudo durante os períodos subsequentes de 1150 - 0850 AP e 2150 - 1850 AP (Figuras 8.b e 8.c), observa-se uma redução da variância explicada para 42,44% e 45,92%, respectivamente, indicando um domínio da TSM mais fraco em relação ao presente. Para o período de 3150 - 2850 AP (Figura 8.d), o primeiro componente responde por 25,19% da variância, mostrando que o sinal do domínio da TSM era ainda mais fraco do que nos períodos anteriores, além do período contemporâneo. Já durante o Holoceno médio (Figura 8.e), observa-se que esse sinal do é ligeiramente menor que o Holoceno tardio e ainda mais fraco que o presente, pois respondia por 44,11% da variância. Por último, durante o Holoceno inicial (Figura 8.f), essa proporção representa apenas 50,9% da variância explicada do domínio, apontando que do domínio da variabilidade de TSM é ligeiramente mais forte que durante os períodos do Holoceno médio e tardio, entretanto, continuou mais fraco que as condições atuais (Figura 8.a).

O ponto base do AMO explica 5,66% da variação original da temperatura da América do sul durante o presente (Figura 8.g). Nos períodos subsequentes de 1150 - 0850 AP e 2150 - 1850 AP (Figuras 8.h e 8.i), a variação original chegou a atingir 0,86% e 1,26%, respectivamente, apontando um menor sinal da temperatura em relação ao presente. Para o intervalo de 3150 - 2850 AP (Figura 8.j), esse ponto responde por 0,97% da variação original, indicando que o sinal a temperatura é mais forte em relação ao Holoceno tardio, entretanto, ainda mais fraco que atualmente. Já durante o Holoceno Médio (Figura 8.k), se aproxime daquela do Holoceno tardio, atingindo 1,01%, indicando que o sinal da temperatura seja semelhante ao período tardio, mas ainda menor que o atual e por último, durante o Holoceno inicial (Figura 8.l), essa influência é substancialmente menor, representando apenas 0,64% da variação total, indicando um sinal térmico mais fraco em comparação com o período contemporâneo (Figura 8.g).

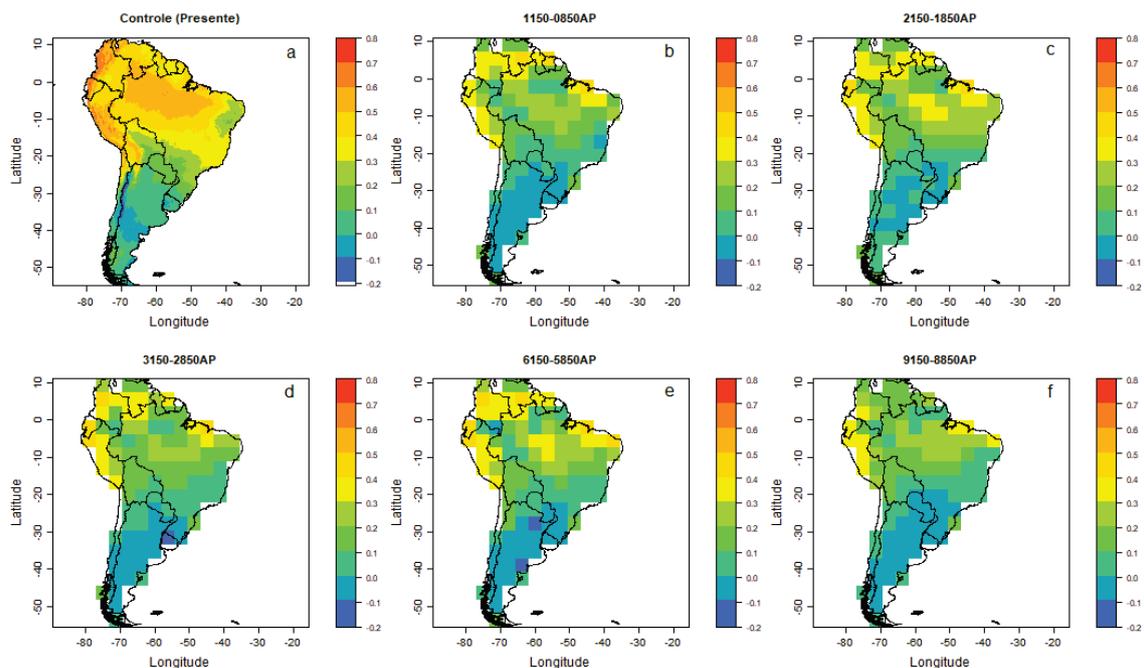
Durante o presente (Figura 8.m), o sinal do ponto base do AMO explica aproximadamente 3,39% da variação original da precipitação da América do sul. Já nos períodos subsequentes de 1150 - 0850 AP e 2150 - 1850 AP (Figuras 8.n e 8.o), a variação atinge 0,92% e 1,13%, respectivamente, apontando um menor sinal da precipitação em relação ao presente. Entre o período 3150 - 2850 AP (Figura 8.p), responde por 1,12% da

variação original, sugerindo que o sinal da precipitação é semelhante ao Holoceno tardio, mas ainda menos expressivo do que o observado atualmente. Entretanto, no Holoceno Médio (Figura 8.q), a contribuição se assemelha àquela do Holoceno tardio, atingindo 0,95%, sugerindo uma similaridade no padrão de precipitação, no entanto, ainda é mais fraco que o presente. No entanto, durante o Holoceno Inicial (Figura 8.r), essa influência é menos pronunciada, representando apenas 1,36% da variação total, indicando um sinal de precipitação menor em comparação com o presente, entretanto, superior aos outros períodos do Holoceno.

3.1.2.1. Influência na Temperatura

A figura 9 mostra a resposta da temperatura média da América do sul em relação a Oscilação Multidecadal do Atlântico. Onde, o período controle (Figura 7.A) foi utilizado a temperatura da superfície do ar do modelo ERA 5 Land enquanto as do passado, foram utilizados a temperatura da superfície do mar 2 m do modelo Trace-21 ka.

Figura 9: Representação da resposta da correlação entre o AMO e a temperatura da média da América do Sul para cada período do Holoceno e o presente. A barra de escala representa os valores da correlação entre as variáveis.



Fonte: Gusmão, (2024).

De acordo com os dados do presente (Figura 9.a), observou-se uma correlação positiva de 0,6 na região do norte do Brasil e parte do nordeste, bem como uma correlação de 0,7 na região noroeste do continente sul-americano. Isso sugere uma associação forte entre anomalias do Atlântico e o aumento da temperatura. Além disso, nota-se que a região sudeste do Brasil e extremo sul obtiveram do continente sul-americano apresentaram correlações de -0,1 e -0,2, respectivamente. Essas correlações sugerem uma associação muito fraca entre as condições do Atlântico e a temperatura nessas regiões ocasionando um efeito ao contrário, ou seja, esses valores sugerem uma associação muito fraca entre o Atlântico e a redução da temperatura nessas regiões.

Comparado ao período de controle, a influência da AMO na temperatura da América do Sul durante o Holoceno foi significativamente reduzida, como indicado pelos valores mais baixos de variância explicada. Assim, não foram identificadas correlações tão robustas quanto no período de controle; durante o Holoceno, as correlações oscilaram de muito fracas a moderadas no continente.

Durante os períodos 1150 - 0850 AP (Figura 9.b), 2150 - 1850 AP (Figura 9.c) e 3150 - 2850 AP (Figura 9.d), foi observada uma correlação positiva de 0,4 na região do extremo norte do continente, sugerindo uma associação fraca entre as anomalias do Atlântico e o aumento da temperatura. No entanto, no lado noroeste do continente sul-americano, essa correlação foi mais marcante, atingindo 0,5, indicando uma ligação moderada entre as anomalias do Atlântico e a temperatura nessas áreas. Apesar de menos intensa do que o presente (Figura 9.a), essa associação foi notável, como evidenciado pelas figuras. Além disso, em todos esses períodos, foram identificados valores de correlação negativa nas regiões sul e sudeste do continente, sugerindo que a influência do Atlântico estava associada a um efeito oposto na temperatura dessas áreas.

Já durante o Holoceno médio (Figura 9.e), os resultados da correlação negativa foram semelhantes ao do Holoceno tardio. Em compensação, na região norte do Brasil e nordeste, foi observada uma correlação positiva de 0,3, indicando uma associação fraca entre as anomalias do Atlântico e o aumento da temperatura naquela região. Essa análise sugere que, embora haja uma associação entre as anomalias do Atlântico e as temperaturas regionais, a magnitude dessas anomalias foi menor durante o Holoceno médio (Figura 9.e) em comparação com o presente.

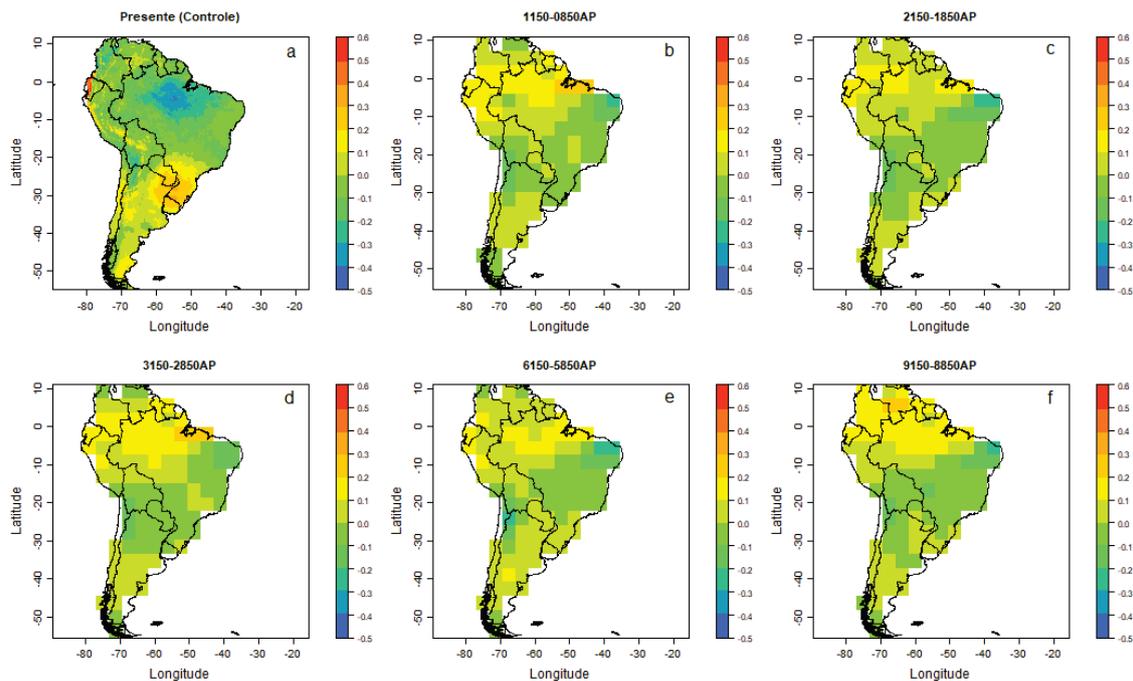
De acordo com o período 9150 - 8850 AP (Figura 9.f), foi observado uma correlação de -0,2 na região sudeste e sul do continente sul-americano. Esses valores de correlação sugerem uma associação muito fraca da correlação entre a temperatura da superfície do mar do Atlântico e a precipitação nessas regiões. Esse resultado da correlação é consistente com o presente (Figura 9.a), cujo, também foi próximo de zero.

Por outro lado, na região norte do Brasil e extremo norte do continente obteve uma correlação positiva de 0,3. Esses valores de correlação sugerem uma associação fraca da correlação do Atlântico com o aumento da temperatura. Nota-se também uma correlação positiva de 0,4 na região noroeste do continente da América do sul. Isso sugere também uma associação fraca da correlação do Atlântico a temperatura. Todavia, é importante ressaltar que a associação desse período foi menos intensa em relação ao presente (Figura 9.a).

3.1.2.2. Influência na Precipitação

A figura 10 mostra a resposta da precipitação do continente da América do Sul em relação à Oscilação Multidecadal do Atlântico. Onde, o período controle (presente) foi utilizado a precipitação do modelo ERA 5 Land enquanto o passado, foram utilizados a precipitação do modelo Trace-21 ka.

Figura 10: Representação da resposta da Oscilação Multidecadal do Atlântico na precipitação da América do Sul para cada período do Holoceno. A barra de escala representa os valores da correlação entre as variáveis.



Fonte: Gusmão, (2024).

De acordo com o presente (Figura 10.a), foi observado uma correlação positiva de 0,5, sugerindo uma correlação moderada entre o Atlântico e o aumento da precipitação e na região norte e extremo norte do continente obteve uma correlação de 0,3, sugerindo associação fraca da correlação entre o Atlântico em relação ao aumento da precipitação. Em contrapartida, na região norte do Brasil obteve correlação negativa de -0,5, ocasionando um efeito oposto, ou seja, esse resultado sugere uma associação moderada da correlação entre anomalias do Atlântico e a redução da precipitação. Além disso, obteve uma correlação de -0,3 na região nordeste do Brasil. Essa correlação sugere uma associação fraca da correlação entre anomalias do Atlântico e a redução da precipitação.

Em comparação com o período controle, a influência do AMO na precipitação da América do Sul durante o Holoceno foi consideravelmente diminuída, conforme evidenciado pelos níveis inferiores de variação explicada. Como resultado, não foram encontradas associações tão consistentes quanto as observadas no período presente; ao longo do Holoceno, as correlações variaram de muito fracas a moderadas em todo o continente. Ao longo do período dos períodos 1150-0850 AP (Figura 10.b) e 2150 -1850 AP (Figura 10.c), foi observado valores de correlação positiva de 0,3/0,4 na região norte do Brasil, sugerindo uma associação fraca da correlação entre o Atlântico e o aumento da precipitação nessas regiões. Todavia, o oposto ocorrer na região na região nordeste do

Brasil, onde foram registrados valores de correlação negativa de $-0,3$, sugerindo uma associação fraca do Atlântico e a redução da precipitação.

No decorrer do período de 3150 - 2850 AP (Figura 10.d), nota-se uma correlação positiva de $0,4$ na região norte do Brasil e extremo norte do Continente. Esse resultado sugere uma associação fraca da correlação entre anomalias do Atlântico e o aumento da precipitação naquela região. Além disso, outras regiões do Brasil apresentaram correlação positiva de $0,1$. Essa correlação sugere que há uma associação fraquíssima entre a correlação do Atlântico na precipitação. Observa-se que a intensidade da associação do presente (Figura 10.a) nessas regiões foi maior que nesse período. No entanto, o oposto ocorreu nas regiões sudeste e centro, onde foi registrado uma correlação de $-0,3$, indicando uma associação fraca da correlação entre o Atlântico e a redução da precipitação naquela região.

Durante o período de 6150 - 5850 AP (Figura 10.e), observou-se uma correlação positiva no norte do Brasil e no extremo norte do continente, similar ao período do Holoceno inicial (Figura 10.b). No entanto, no extremo norte do continente, essa correlação foi mais pronunciada, atingindo uma correlação positiva de $0,3$. Isso sugere que nessa região teve uma associação fraca da correlação entre o Atlântico e a precipitação. Essa elevação na correlação sugere que o aquecimento do Atlântico contribuiu para o aumento na precipitação nessas regiões. Entretanto, essas anomalias foram menos robustas do que o presente (Figura 10.a). Por outro lado, na região nordeste, a correlação permaneceu $-0,3$ e $-0,4$. Esse valor da correlação indica que houve uma associação fraca entre anomalia do Atlântico e a redução da precipitação nessas regiões, provocando um efeito ao contrário.

Por último durante o período 9150 - 8850 AP (Figura 10.f), foi observado uma correlação positiva de $0,1$ na região norte do Brasil. Essa correlação positiva sugere uma associação muito fraca ou nula entre as anomalias do Atlântico e a precipitação nessas regiões. Contudo, há uma associação fraca entre o Atlântico e a precipitação na região do extremo norte do continente sul-americano, devido a uma correlação positiva de $0,3$, sugerindo um aumento da precipitação nessa região. Ao interpretar esses resultados de correlação, percebe-se que essa associação durante o Holoceno inicial foi menos pronunciada em comparação com os padrões atuais (Figura 10.a). Por outro lado, foram registrados valores de correlação de $-0,3$ na região nordeste do Brasil. Através dessa correlação nota-se que também ocorreu uma associação fraca da correlação do Atlântico

e a precipitação, mostrando que houve um efeito oposto da precipitação em relação a região norte do continente

4. DISCUSSÃO

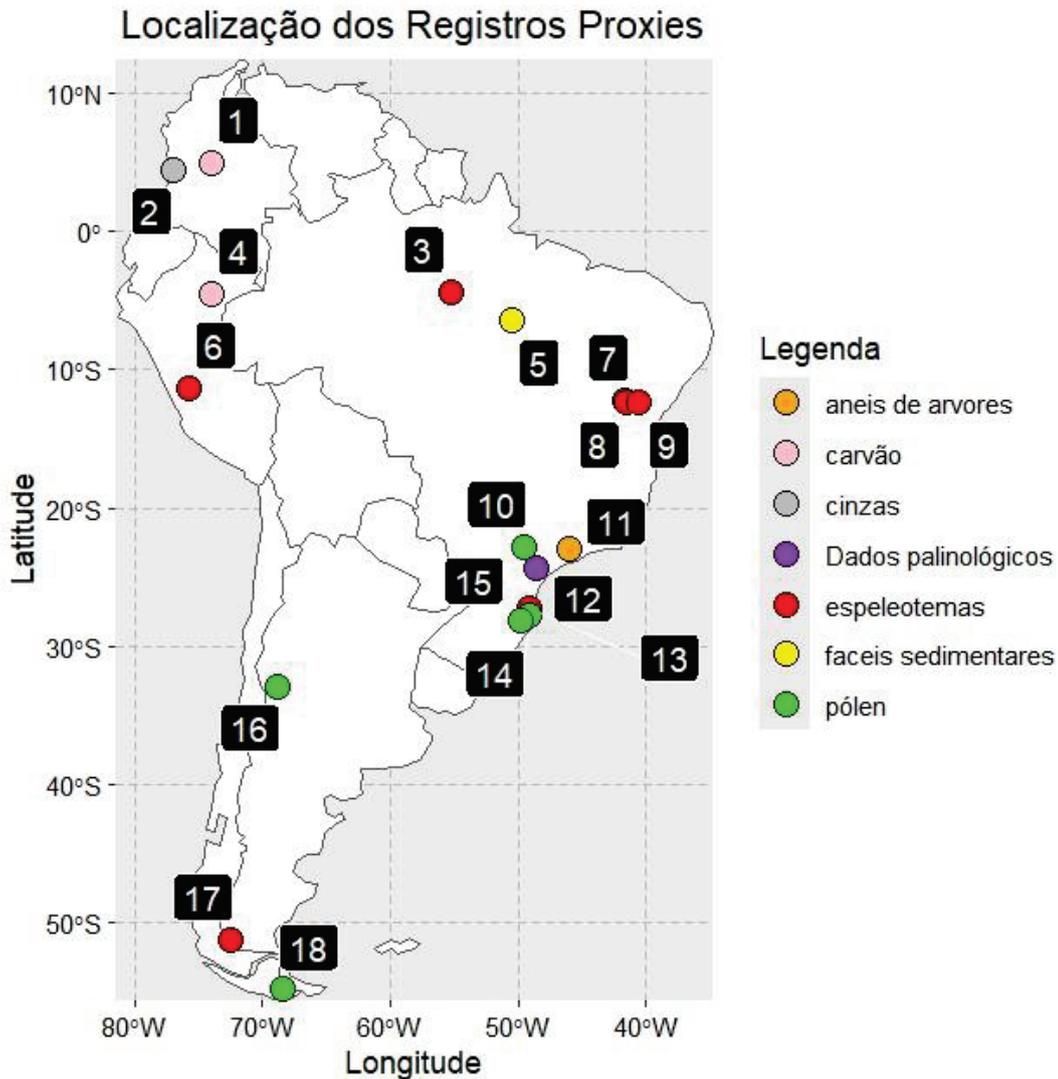
Nessa seção será realizado uma análise comparativa entre os resultados obtidos por meio dos modelos e os registros proxies extraído da literatura. Na Tabela 3 e Figura 11 abaixo estão representados todos os registros proxies identificados, os quais serão confrontados com os resultados obtidos através dos modelos climáticos.

Tabela 3: Representação dos registros proxies

Proxies	Nº	Latitude	Longitude	Período	Localização	Autor
Carvão fosseis	1	5	-74	~4600AP 3500 - 2100AP	Laguna de Ubaque	Bird et al., (2017)
Cinzas	2	4,5	-77	3000AP a 0	Paleolago Cauca	Martinez et al., (2015)
Espeleotemas	3	-4,4	-55,3	11000 - 7000AP	Caverna Paraiso	Prado et al., (2020)
Carvão fosseis	4	-4,51	-73,97	4700AP a 0	Andes Orientais da Colômbia	Bird et al., (2017)
Fáceis sedimentares	5	-6,42	-50,42	12000– 6000AP	Lago Serra Sul	Absy et al., (1991); Hermanowski et al., (2012)
Dois espeleotemas	6	-11,3	-75,8	7000AP a 0	Andes central do Peru	Kanner et al., (2013)
Espeleotemas (estalagmites)	7	-12,2	-41,6	3000 AP a 0	Nordeste brasileiro	Novello et al., (2012)
Espeleotemas (estalagmites)	8	-12,38	-41,58	3000 AP a 0	Caverna Diva de Maura	Novello et al., (2012)
Espeleotemas (estalagmites)	9	-12,4	-40,6	3000 AP a 0	Caverna Torrinha	Novello et al., (2012)
Pólen	10	-22,78	-49,55	11000 AP a 0	Serra Boa Vista	Behling (1995)
Testemunho de turfeira	11	-23	-46	5000 – 3000AP 3000 – 1950AP	Mata Atlântica	Garcia et al., (2004)
Dados palinológicos	12	-24,39	-48,53	2612 – 1945AP 1945 – 0950AP	Lagoa Vermelha	Oliveira et al., (2014)
Espeleotemas	13	-27,2	-49,15	~9000 AP	Sul do Brasil	Bernal et al., (2016)
Pólen	14	-27,7	-49,15	12000AP a 0	Serra do Rio Rastro	Behling et al., (1995)
Pólen	15	-28,18	-49,86	10300AP a 0	Morro da Igreja	Behling et al., (1995)
Pólen de uma estepe herbácea	16	-32,88	-68,84	10000– 8000AP 4500 – 3500AP	Leste dos Andes	Mancini. (1998)
Espeleotema	17	-51,24	-72,54	1900 – 1300AP	Patagônia	Rueter et al., (2009)
Pólen	18	-54,81	-68,45	6700AP a 0	Vale do Rio Pipo	Borromei et al., (2016).

Fonte: Gusmão, (2024)

Figura 11: Representação das localizações dos registros proxies



Fonte: Gusmão, (2024)

4.1. Modo de variabilidade do Pacífico - El Niño Oscilação Sul

A análise dos resultados revela padrões significativos na variabilidade do domínio do ENOS ao longo do tempo, especialmente durante os períodos do Holoceno. Uma observação crucial é que a variabilidade do primeiro componente do ENOS em relação à temperatura da superfície do mar (TSM) na atualidade é significativamente maior comparada aos períodos do Holoceno, indicando uma mudança nas dinâmicas climáticas ao longo dos milênios.

Durante o Holoceno, as análises mostram que a variância da primeira componente, assim como os pontos base da temperatura e precipitação, apresentaram

oscilações significativas. Essas oscilações indicam uma maior predominância do domínio do ENOS no Pacífico, com uma tendência particularmente evidente do Holoceno médio até o final do tardio, período em que se observou uma intensificação desse fenômeno. Este resultado sugere uma tendência de intensificação do domínio do ENOS, evidenciada pela crescente influência da TSM no Pacífico desde o Holoceno tardio até o presente.

Essas predominâncias estão em concordância com os resultados do Holoceno obtidos por Kanner *et al.* (2013), que através de análise de isótopos estáveis de oxigênio ($\delta^{18}\text{O}$) em dois espeleotemas da caverna Huagapo, localizados nos Andes centrais do Peru (Tabela 3 e Figura 11), identificaram padrão positivo do ENOS na faixa equatorial do Pacífico durante o Holoceno médio ao tardio. Estes dados são fundamentais, pois indicaram que os padrões climáticos regionais influenciados pelo ENOS têm sido uma característica persistente ao longo de anos.

Adicionalmente, a análise de lâmina clástica em um lago montanhoso equatorial realizado por Riedinge *et al.*, (2002), seguindo o estudo de Rodbell *et al.* (1999), encontram que a variabilidade domínio do ENOS ocorreu entre 3000 e 1200 AP. Esse período de variabilidade também é corroborado por proxies lítico para ENSO do Peru (Rein *et al.*, 2005). Por outro lado, registros de $\delta^{18}\text{O}$ obtidos de corais das ilhas Christmas (2°N, 157°W) e Fanning (4°N, 160°W), exibiram que durante o Holoceno inicial até o médio houve uma redução da variabilidade do sinal do ENOS no Pacífico (Cobb *et al.*, 2013).

No entanto, uma mudança significativa foi observada durante o período contemporâneo, caracterizado por um domínio mais intenso do ENOS. Esse aumento indica uma influência mais pronunciada sobre a TSM em comparação com os períodos do Holoceno. Esse pronunciamento de TSM está em concordância com o estudo de Carré *et al.*, (2014), que analisaram isótopos de oxigênio em conchas fosseis, localizado no Peru. Os resultados desse estudo mostraram que, no período presente, o sinal da variabilidade do ENOS é mais forte do que durante todos os períodos do Holoceno.

Os resultados apresentados neste estudo proporcionaram uma compreensão das mudanças climáticas ao longo do Holoceno, destacando o papel significativo que o ENOS. A robustez dos achados é reforçada pela consistência dos dados obtidos de diferentes proxies, como espeleotemas, lâminas clásticas e registros de corais. Esses múltiplos indicadores convergem para um entendimento de que o ENOS tem sido fundamental na modulação dos padrões climáticos ao longo dos últimos milhares de anos.

4.1.1. Influência na Temperatura da América do Sul

Os padrões de correlação observados ao longo de diferentes períodos do Holoceno na América do Sul oferecem uma visão detalhada do fenômeno El Niño e seus efeitos nas condições climáticas regionais.

Uma das descobertas é a presença de correlações diferenciadas entre o fenômeno El Niño e as temperaturas em diferentes regiões do continente sul-americano. Especialmente nas regiões norte do Brasil, extremo norte do continente e nordeste ao longo dos períodos do Holoceno (9150-8850, 6150-5850, 3150-2850, 2150-1850, 1150-0850 AP), observou-se uma variação na intensidade dessa relação. Em certos intervalos, a influência do El Niño nas temperaturas dessas regiões mostrara-se fraca, enquanto em outros períodos a correlação foi significativamente moderada. Esses achados indicam que o El Niño está diretamente relacionado ao aumento das temperaturas nessas regiões. Esses aumentos da temperatura estão em concordância com os resultados obtidos por Padro *et al.* (2020), que realizaram análises de espeleotemas da Caverna Paraíso (Tabela 3 e Figura 9) e constataram um aumento significativo da temperatura na região norte ao longo do Holoceno inicial. Este aumento de temperatura está relacionado à intensificação do ENOS. Adicionalmente, o estudo de Garcia *et al.* (2004), que analisou testemunhos de turfeiras em uma floresta da Mata Atlântica, revelou um período de seca associado a um aumento da temperatura na região costeira do Sudeste entre 5500 e 3000 anos AP. Esses achados sugerem que a influência do El Niño foi um fator crítico para o aumento da temperatura e períodos de seca nessas áreas durante o Holoceno.

Por outro lado, observa-se que nas regiões do extremo sul e sudeste do continente, tanto no presente quanto no passado, houve uma inversão desses fenômenos devido aos valores de correlação negativos. Isso indica que o fenômeno El Niño influenciou na redução da temperatura nessas regiões. Essa queda de temperatura é consistente com as reconstruções de temperatura baseadas em anéis de árvores durante os últimos 1200 anos antes do presente (Villalba *et al.*, 2003; Neukom *et al.*, 2010). As correlações diferenciadas entre regiões podem ser explicadas pelas variações regionais nas respostas climáticas ao El Niño, refletindo a complexidade dos padrões de circulação atmosférica e a interação entre diferentes forçantes climáticas.

Adicionalmente, análise do pólen de Cañadón del Toro, localizado no vale do Rio Pipo, Terra do fogo (Tabela 3 e Figura 11) (Borromei *et al.*, 2016), revelou que durante o Holoceno médio ao tardio ocorreu uma mudança climática em direção a condições mais

frias e úmidas. Estas mudanças facilitou a expansão da floresta densa nas encostas da Cordilheiras dos Andes, no lado do Pacífico, no extremo sul da Terra do Fogo (Borromei *et al.*, 2016). Este achado sugere que as condições climáticas influenciadas pelo ENOS também tiveram um papel crucial na moldagem da vegetação e dos ecossistemas na região

Esses resultados ressaltam a importância de compreender as variações regionais e temporais das respostas climáticas ao El Niño. As diferentes respostas observadas nas várias regiões da América do Sul sugerem que a influência do El Niño é modulada por uma série de fatores regionais, incluindo padrões de circulação atmosférica e interações com outras forçantes climáticas. Além disso, os resultados obtidos reforçam a ideia de que a variabilidade climática natural, como a associada ao ENOS, teve um papel significativo na modelagem dos ecossistemas e da vegetação ao longo do Holoceno no continente sul-americano.

4.1.2. Influência na precipitação da América do Sul

Ao contrário das observações sobre a temperatura, os dados fornecidos da precipitação durante os períodos específicos do Holoceno (9150-8850 AP, 6150-5850 AP, 3150-2850 AP, 2150-1850 AP e 1150-0850 AP), revelaram uma associação fraca e moderada do fenômeno El Niño e a precipitação nas regiões sudeste do Brasil, extremo sul e centro-oeste do continente sul-americano. Isso quer dizer que o El Niño tem influenciado muito no aumento da precipitação nessas regiões. Mancini. (1998), examinando registros de pólen de uma estepe herbácea (Asteraceae tubuliflorae) ao longo do leste dos Andes durante o período de 10000 a 8000 AP observou um aumento na precipitação e condições frias no sul da Argentina. O retorno dos táxons estepários, especialmente gramínoides, também indicou condições frias semelhantes ao início do Holoceno, juntamente com o aumento da precipitação. Por volta de 4500 anos atrás, a vegetação era dominada por uma estepe gramíneo-arbustiva, com condições semelhantes, persistindo após 3500 AP, e o desenvolvimento de uma floresta mais extensa no Holoceno, possivelmente devido a temperaturas mais frias.

Além disto, um outro estudo de Bernal *et al.*, (2016), em análise de espeleotemas, localizado no estado de Santa Catarina, no sul do Brasil e encontraram que a maioria das precipitações durante o Holoceno foram causadas pela intensidade do SAMS, portanto a precipitação tem sido dominante nos últimos 9000 AP na região sudeste e sul. Essa

intensificação do SAMS, ocasionou o aumento da precipitação na região sudeste desde o início até o final do Holoceno. Esses achados do aumento também estão de acordo com outros registros proxy do sudeste do Brasil (Sallun *et al.*, 2012), e registros de espeleotemas do Brasil central (Cheng *et al.*, 2009).

Em contraste, um efeito oposto foi observado nas regiões norte do Brasil e extremo norte do continente, onde houve uma queda significativa da precipitação nessas regiões associada ao fenômeno El Niño. Esse padrão é corroborado por Uribe *et al.*, (2012), que, através de sítio de pólen, observaram que durante o período 9000 AP, a região da Colômbia passou por intervalo secos.

Adicionalmente, estudos de fácies sedimentares, isótopos estáveis no lago Serra Sul de Carajás (Tabela 3 e Figura 11), durante o Holoceno inicial e médio indicou uma queda na precipitação (Absy *et al.*, 1991; Hermanowski *et al.*, 2012), associada a eventos do El Niño (Sifeddine *et al.*, 2001). Essas condições também foram observadas na própria Serra de Carajás (Turq *et al.*, 1998; Cordeiro *et al.*, 2008). Estudos de González-Carranza. (2012) (Tabela 3 e Figura 11), realizou análise de dois sítios de pólen e Bird *et al.*, (2017), que analisaram carvão fosseis, ambos obtidos na Colômbia, encontraram também que nas regiões do extremo norte houve secas relacionadas a queda da precipitação durante o Holoceno tardio.

Essa semelhança entre esses períodos do Holoceno se deu, por causa do aumento gradual do Sistema de Monção da América do Sul (Burbride *et al.*, 2004) e o deslocamento ou migração da ITZC (Zona de Convergência Intertropical) para sul e manteve-se uma posição mais meridional (Haug *et al.*, 2001; Seilles *et al.*, 2016; Ledru *et al.*, 2022).

Essas variações regionais nas respostas ao El Niño ressaltam a complexidade das interações climáticas na América do Sul. Enquanto algumas regiões experimentaram aumento na precipitação, outras enfrentaram períodos de seca. A compreensão dessas variações é fundamental para previsões climáticas futuras.

4.2. Modo de variabilidade do Atlântico - Oscilação Multidecadal do Atlântico.

A análise dos resultados revela padrões integrantes na variabilidade do AMO ao longo do tempo, especialmente durante os períodos do Holoceno. Observou-se que a contribuição do primeiro componente do ENOS para a variabilidade total da TSM na atualidade é significativamente maior em comparação com os períodos do Holoceno.

Durante os períodos do Holoceno, é possível observar flutuações notáveis na variação explicada do domínio, além de correlações significativas da temperatura e precipitação. Essas variações sugerem uma influência considerável da temperatura da superfície do mar no Atlântico Norte ao longo do tempo. Por exemplo, as análises indicaram que durante o Holoceno inicial, o domínio do Atlântico Multidecadal Oscillation (AMO) estava em um estado mais forte, conforme evidenciado por estudos de espeleotemas (estalagmites) de Iraquara d180 (tabela 3 e Figura 11), situados na região Nordeste (Novello *et al.*, 2012). Além disso, percebe-se que durante o Holoceno tardio, a temperatura do domínio também apresentava uma ligeira elevação. Uma reconstrução da oscilação Multidecadal do Atlântico realizada por Mann *et al.* (2009), corroborou esses achados, mostrando que as temperaturas do Atlântico eram ligeiramente mais altas durante o Holoceno tardio. Essas descobertas não apenas destacam a complexidade das mudanças climáticas ao longo do tempo, mas também ressaltam a importância de compreender suas implicações nos padrões oceânicos e ecossistemas marinhos.

Além disso, nota-se que durante o início do Holoceno, a Oscilação Multidecadal do Atlântico (AMO) mostrou-se mais marcada do que nos períodos subsequentes. Essa observação está alinhada com as descobertas de Lohmann. (2012), que destacam a variabilidade do Atlântico ao longo das diferentes fases do Holoceno. Esse fenômeno pode ser atribuído a uma série de fatores, incluindo o deslocamento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) para o norte e a predominância do El Niño Oscilação Sul no Pacífico equatorial, como sugerido por Hastenrath (2000).

4.2.1. Influência na Temperatura da América do Sul

Os padrões de correlação observados ao longo de diferentes períodos do Holoceno na América do Sul oferecem uma visão detalhada das anomalias do Atlântico e seus efeitos nas condições climáticas regionais. Este estudo revela padrões intrigantes de associação entre o Atlântico e a temperatura em distintas regiões do continente sul-americano ao longo do tempo, especialmente durante os períodos do Holoceno.

Ao longo de todo o período do Holoceno, foram identificadas correlações positivas, nas regiões norte, extremo norte e oeste do continente, indicando uma relação fraca e moderada entre o Atlântico e o aumento da temperatura. Esses aumentos de temperatura estão em concordância com os resultados Prado *et al.* (2013), que através de uma compilação de multiproxy de dados paleoclimáticos (pólen e carvão) obtidos na

região leste do continente da América do sul, sendo eles a Serra Boa Vista, Serra do Rio Rastro e o Morro da Igreja (Tabela 3 e Figura 11). Encontraram que na região norte e nordeste do Brasil durante o Holoceno médio houve clima mais quente, além de que durante o Holoceno tardio obteve aumento da temperatura nessas regiões. Por outro lado, observa-se que uma inversão desses fenômenos nas regiões sul e sudeste do continente da América do Sul, ou seja, nessas regiões houve queda da temperatura associados às anomalias do Atlântico.

Esses resultados são importantes porque demonstram que as respostas climáticas às anomalias do Atlântico não são uniformes em toda a América do Sul. Enquanto o norte e o nordeste do Brasil experimentaram aumentos de temperatura, as regiões sul e sudeste passaram por resfriamentos. Isso sugere que as dinâmicas climáticas regionais são complexas e influenciadas por uma série de fatores interligados.

4.2.2. Influência na precipitação da América do Sul

Durante os diferentes períodos do Holoceno, a região norte do Brasil e o extremo norte do continente sul-americano apresentaram aumento da precipitação devido as anomalias do Atlântico. Esses resultados de aumento da precipitação estão de acordo com os encontrados por Martinez *et al.* (2015), que realizaram uma análise espectral da escala de cinza do núcleo San Nicolas do Paleolago Cauca, no norte dos Andes colombianos (Tabela 3 e Figura 11). Eles observaram um aumento da precipitação no período de 3000 AP na região do extremo norte do continente sul-americano, atribuindo esse aumento à possível correlação entre o fenômeno ENOS (El Niño-Oscilação Sul) e a fase positiva da AMO (Oscilação Multidecadal do Atlântico).

Por outro lado, observa-se que a região nordeste do Brasil apresentou redução da precipitação devido a influência do Atlântico. Essa redução também foi encontrada por Utida *et al.* (2019), que analisaram mudanças na precipitação no Nordeste através de sedimentos lacustres de alta resolução de composição isotópica de hidrogênio em ceras vegetais, coletados do Lago Boqueirão (5°14'S; 35°32'W). Eles descobriram que a região nordeste enfrentou secas severas entre 1500 e 500 AP.

Adicionalmente, Reuter *et al.*, (2009), analisaram os registros de espeleotemas obtidos da Caverna Cascayuga (Tabela 3 e Figura 11) e encontraram um aumento da precipitação sobre o oeste da Amazônia durante a Pequena Idade do Gelo, o que acabou resultando em uma maior subsidência, conseqüentemente, ocasionando a redução da

precipitação na região nordeste do Brasil (Novello *et al.*, 2012). Além disso, análise de sedimentos lacustre de lagos salinos (Tabela 3 e Figura 11), sugere que durante o Holoceno médio a região norte do Chile é mais seca (Berman *et al.*, 2017). Gorenteisien *et al.* (2022), também realizaram uma reconstrução climática para o período do Holoceno médio. Foram compilados 173 diferentes a região dos SMAS e observaram que a região sudeste e principalmente a região nordeste do Brasil obteve uma redução. Além disso, análise de sedimentos lacustre de lagos salinos (Tabela 3 e Figura 9), sugere que durante o Holoceno médio a região norte do Chile é mais seca (Berman *et al.*, 2017). Gorenteisien *et al.* (2022), também realizaram uma reconstrução climática para o período do Holoceno médio. Foram compilados 173 diferentes a região dos SMAS e observaram que a região sudeste e principalmente a região nordeste do Brasil obteve uma redução.

Esses resultados são importantes porque demonstram que as respostas climáticas às anomalias do Atlântico não são uniformes em toda a América do Sul. Enquanto a região nordeste do Brasil experimentou a redução da precipitação, as região norte do Brasil e extremo norte do continente passaram por aumento da precipitação. Isso sugere que as dinâmicas climáticas regionais são complexas e influenciadas por uma série de fatores interligados.

5. CONCLUSÃO

Este estudo procurou-se analisar como as variáveis climáticas de temperatura e precipitação no continente da América do Sul são influenciadas pelos sinais dos modos de variabilidade oceânicas (ENOS e AMO) durante certos períodos do Holoceno. Para isso utilizou-se a Teleconexão Ortogonal Empírica (EOT), uma técnica que permite investigar as relações entre padrões climáticos distantes entre si.

Os resultados demonstraram um ajuste satisfatório dos modos de variabilidades e suas respostas na temperatura e precipitação da América do Sul, simulados para os períodos do Holoceno, evidenciado pelo bom alinhamento com os dados do presente. Esses alinhamentos são respaldados não apenas pela comparação com os registros observacionais, mas também pela coerência apresentada pelos registros proxies disponíveis na literatura.

Para os períodos do Holoceno (9150 - 8850, 6150 - 5850, 3150 - 2850, 2150 - 1850 e 1150 - 0850), conclui-se que: O El Niño Oscilação Sul- ENOS: era mais fraco em geral, contudo, encontrou-se correlações diferenciadas entre o El Niño e a temperatura,

dependendo da localização geográfica. Nas regiões norte e nordeste do continente foram identificados valores de correlações que variam de fracas a fortes entre o El Niño e a temperatura, ou seja, nessas regiões o fenômeno El Niño ocasionou o aumento da temperatura. Contudo, no extremo sul foram observadas correlações negativas fracas a moderadas entre o El Niño e a temperatura, indicando uma inversão da influência desses fenômenos. Isto quer dizer que, o El Niño ocasionou a redução da temperatura nessas regiões. Quanto a precipitação, observamos padrões semelhantes de associação com o EL Niño. Nas regiões norte do Brasil e extremo norte do continente, foram encontradas associações de correlação fracas a moderadas entre o El Niño e a precipitação. Isso quer dizer que esses fenômenos estão relacionados a aumento da precipitação nessas regiões. Em contraste, uma inversão da influência do El Niño ocorre nas regiões sudeste do Brasil e no extremo sul do continente, onde observa-se uma tendência oposta a da precipitação, ou seja, diminuição da precipitação

A Oscilação Multidecadal do Atlântico – AMO: também era mais fraco, entretanto, nas na região norte do Brasil e extremo norte do continente houve valores de correlações fracas/moderadas entre o Atlântico e a temperatura, indicando que esse fenômeno está relacionado ao aumento da temperatura. Já o efeito oposto ocorre na região nordeste do Brasil e extremo sul do continente devido aos valores de correlações negativas, ou seja, esse fenômeno influencia na redução da temperatura. No campo da precipitação, na região norte do Brasil e extremo norte do continente sul-americano houve aumento da precipitação ocasionado pela influência da Oscilação do Atlântico. Já o inverso ocorre na região nordeste do Brasil, ou seja, queda da precipitação devido aos valores negativos da correlação nessas regiões.

As diferenças entre as condições atuais e aquelas registradas em certos períodos específicos do Holoceno foram examinadas por meio das anomalias climáticas, a fim de determinar a magnitude das variações dos elementos climáticos e desta forma conclui-se que, durante esses períodos, o continente da América do Sul apresentava associação de temperaturas e precipitação inferiores as observadas atualmente, devido aos valores da correlação. Além disso, esses resultados da temperatura e precipitação foram corroborados pelos registros proxies encontrados na literatura, validando tanto as tendências de temperatura quanto de precipitação. Essa abordagem reforça a compreensão das mudanças climáticas ao longo do Holoceno

Finalmente, podemos concluir que os modelos representam uma boa ferramenta para simulações paleoclimáticas, uma vez que conseguem reproduzir de forma precisa os padrões climáticos da América do Sul, assim como os principais padrões de teleconexões.

6. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ABSY, M. L.; CLEEF, A.; FORNIER, M.; SERVANT, M.; SIFFEDINE, A.; DA SILVA, M. F.; SOUBIES, F.; SUGUIO, K.; TURCQ, B.; VANDER, H. T. Mise em evidence de quatre phases d'overture de la foret dense dans le sud-est de L'Amazonie au course des 60,000 dernieres annees. Premiere comparaison avec d'autres regions tropicales. Comptes Reudues Acad. Des. Sci. II312,673-678.

AMBRIZZI, T. El Niño/Oscilação Sul e teleconexões atmosféricas no hemisfério austral. São Paulo: USP/IAG, 2003.

ANDREOLI, R.V., OLIVEIRA, S.S., KAYANO, M.T., VIEGAS, J., SOUZA, R. A. F., & CANDIDO, L. A. The influence of different El Niño types on the South American rainfall. *Int. J. Climatology*, 3, 1374-1390. doi: 10.1002/joc.4783. 2017.

ÁLVAREZ-BARRA, V., GIESECKE, T., & FONTANA, S.L. Late-Holocene vegetation dynamics and disturbance regimes in north Patagonia Argentina (40°S). *O Holoceno*, 30 (8), 1115-1128, 2020. <https://doi.org/10.1177/0959683620913920>.

APPELHANS T, DETSCH F, NAUSS T (2015). remote: Empirical Orthogonal Teleconnections in R. R package version 1.0.0, URL <http://CRAN.R-project.org/package=remote>.

BAKER, P. A., SELTZER, G. O., FRITZ, S. C et al., (2001). A história do Sul Precipitação tropical americana nos últimos 25.000 anos. *Ciência*291(5504): 640–643.

BEHLING, H e SAFFORD, H. D. Late-glacial and Holocene vegetation, climate and fire dynamics in the Serra dos Orgãos, Rio de Janeiro State, southeastern Brazil, *Glob. Change Biol.*, 16, 1661– 1671, doi:10.1111/j.1365 2486.2009.02029.x, 2010.

BEHLING, H. A high resolution Holocene pollen records from Lago do Pires, SE Brazil: vegetation, climate and fire history, *J. Paleolimnol.*, 14, 253–268, 1995b.

BERMAN, A. L.; SILVESTRI, G. E.; ROJAS, M.; TONELLO, M. S. Accelerated greenhouse gases versus slow insolation forcing induced climate changes in Southern South America since the Mid-Holocene. Volume 48, pages 387-404 (2017). <https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-016-3081-z>.

BERNAL, J. P; FRANCISCO, W. C; NICOLAS, M. S; XIANFENG, W; MICHAEL, D; MARIA CAROLINA, A. C; ORTEGA-OBREGÓN; HAI, C; LAWRENCE, E. R; AUGUSTO, S. A. High-resolution Holocene South American monsoon history recorded by a speleothem from Botuverá Cavé, Brazil. *Earth and Planetary Science Letters* 450 (2016) 186–196

BIRD, B. W.; RUDLOFF, O.; POLISSAR, P. Paleoclimate support for a persistent dry island effect in the Colombian Andes during the last 4700 years. *The Holocene*, 28(2), 217-228. <https://doi.org/10.1177/0959683617721324>.

BORROMEI, A. M.; MUSOTTO, L. L, CORONATO, A.; PONCE, J. F.; PONTEVEDRAPOMBAL, X. POSTGLACIAL VEGETATION AND CLIMATE

CHANGES INFERRED FROM A PEAT POLLEN RECORD IN THE RÍO PIPO VALLEY, SOUTHERN TIERRA DEL FUEGO. *Publicación Electrónica* - 2016 - Volumen 16(2): 168–183.

BULLOCK, S.H., MOONEY, H.A. AND MEDINA, E. (EDS.), *Seasonally dry tropical forests*, Cambridge University Press: Cambridge, 1995.

CARDOSO ET AL. El Niño Driven Changes in Global Fire 2015/16. *Frente. Ciências da Terra*. 8:199, 2020. doi: 10.3389/feart.2020.00199.

CARRÉ, M.; JULIN, P.; PURCA, S.; ANDREW, J.; BRACONNOT, P.; FALCON, R. A.; JULIEN, M.; LAVALLÉE, D. Holocene history of ENSO variance and asymmetry in the Eastern Tropical Pacific. *Science Express*. 2014. DOI: 10.1126/Science. 1252220.

CHENG, H; FLEITMANN, D; EDWARDS, R. L; WANG, X; CRUZ, F. W; AULER, A. S; MANGINI, A; WANG, Y; KONG, X. Timing and structure of the 8.2kyr B.P. event inferred from $\delta^{18}O$ records of stalagmites from China, Oman and Brazil. *Geology* 37, 1007–1010. 2019.

COBB, K. N; WESTPHAL, H; SAYANI, E. D; LORENZO, C; CHARLES, H; CHENG e EDWARDS. El Niño/Southern Oscillation and tropical Pacific climate during the last millennium, *Nature*, 424, 271-276.

CORDEIRO, R.C.; TURCQ, B.; SUGUIO, K.; OLIVEIRA, S.A.; SIFEDDINE, A.; VOLKMMER, C. Holocene fires in East Amazonia (Carajas), new evidences, chronology and relation with palaeoclimate. *Glob. Planet. Change* 61, 49-62. 2008.

COLLINS, W. D ET AL. The formulation and atmospheric simulation of the Community Atmosphere Model Version 3 (CAM3). *J. Clima*, 19, 2144–2161, 2006a.

CHRISTOPHERSON, ROBERT W. *GEOSSISTEMAS: Uma introdução a*. 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012. Francisco Mendonça.

CRUZ, F.W., BURNS, S.J., KARMANN, I., SHARP, W.D., VUILLE, M., CARDOSO, A.O., FERRARI, J.A., SILVIA DIAS, P.L., VIANA, O. Insolation-driven changes in atmospheric circulation over the past 116,000 years in subtropical Brazil. *Nature* 434, 63e66, 2005.

CRUZ, J.F.W., BURNS, S.J., KARMANN, I., SHARP, W.D., VUILLE, M. Reconstruction of regional atmospheric circulation features during the late Pleistocene in subtropical Brazil from oxygen isotope composition of speleothems. *Earth and Planetary Science Letters* 248, 495e507, 2006.

del PUERTO L, GARCIA-RODRIGUEZ, L. F.; INDA, H.; BRACCO, R.; CASTIÑEIRA, C.; ADAMS, J. Evidência paleolimnológica de mudanças climáticas do Holoceno no Lago Blanca, sul do Uruguai. *J Paleolimnol* 36(2):151–163.2006.

DELTON, G. H.; KARLEN, W. Holocene climatic variations – their pattern and possible cause. *Quaternary Research*, v. 3, p. 155-205, 1973.

ERB, M. P.; MCKAY, N. P.; STEIGER, N.; DEE, S.; HANCOCK, C. **Reconstructing Holocene temperatures in time and space using paleoclimate data assimilation.** School of Earth and Sustainability, Northern Arizona University, Flagstaff, AZ, USA. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2022-184>, 2022.

FEITOSA, Y. O.; ABSY, M. L.; LATRUBESSE, E. M. **Late Quaternary vegetation dynamic from central parts of the Madeira River in Brazil: Acta Botanica Brasilica**, v. 29, p. 120-128, 2015. Doi:10.1590/0102-33062014abbb3711.

FERNANDEZ, J. P. R.; FRANCHITO, S. H.; BRAHMANANDA, RAO. V.; LLOPART. M.; Changes in Koppen–Trewartha climate classification over South America from RegCM4 projections. *Atmospheric Science Letters*. V.18, 427–434, 2017. <http://dx.doi.org/10.1002/asl.785>

FERRAZ, S. S. E. T. Variabilidade Climática. **Ciências e Natura**, v. 1, p. 105-113, 2007.

FERREIRA, G. R. Eventos extremos de precipitação nas bacias hidrográficas dos rios doce e paraíba do sul. 2019.

FORMERLY THE NATIONAL CLIMATC DATA CENTER. National Oceanic and Atmospheric Administration. NOAA. Acesso em: 28 de junho de 2019.

GARCIA, M. J.; OLIVEIRA, P. E.; SIQUEIRA, E.; FERNANDES, R. S. A Holocene vegetational and climatic record from the Atlantic rainforest belt of coastal States of São Paulo, SE BRAZIL. *Review of Palaeobotany and Palynology*, v. 131, n. 3-4, p. 181-199, 2004.

GONG D, WANG S. Definition of Antarctic oscillation index. *Geophys Res Lett* 26(4):459–462. <https://doi.org/10.1029/1999GL900003>, 1999.

GONZÁLEZ-CARRANZA, Z., HOOGHIEMSTRA, H. and VELEZ, M.I. 2012. A 14,000 yr pollen and diatom based record of environmental and climatic change from South Colombian Andes shows decadal climate variability. *The Holocene* 22:12271241. DOI:10.1177/0959683612451183, 2012.

GORENSTEIN, I et al. A fully calibrated and updated mid-Holocene climate reconstruction for Eastern South America. *Quaternary Science Review*, v. 292, p. 1076446, set. 2022.

HACK, J. J.; CARON, J. M.; DANABASOGLU, G.; OLESON, K. W.; BLITZ, C. M. CCSM-CAM3 climate simulation sensitivity to changes in horizontal resolution. *J. Climate*, 19, 2267-2289, 2006.

HAUG, G. H, HUGHE, K. A, SIGMAN, D. M, PETERSON, L. C, & ROHL, U.: Migração para o sul da zona de convergência intertropical através do Holoceno, *Science*, 293, 1304-1308, 1304-1308, 2001. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1059725>.

HERSBACH, H., BELL, B., BERRISFORD, P., HIRAHARA, S., HONANYI, A., MUÑOZ-SABATER, J & THÉPAUT, J. N. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly*

Journal of the Royal Meteorological Society, 146(730), 1999-2049. 2020.
<https://doi.org/10.1002/qj.3803>

HERMANOWSKI, B.; COSTA, M. L.; CARVALHO, A. T.; BEHLING, H. Palaeoenvironmental dynamics and underlying climatic changes in Southeast Amazonia (Serra Sulde Carajas, Brazil) during the late Pleistocene and Holocene. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Paleoe-col.* 365-366, 227-246. 2012.

HUANG, B., C. LIU, V. BANZON, E. FREEMAN, G. GRAHAM, B. HANKINS, T. SMITH, and H.-M. ZHANG: Improvements of the Daily Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (DOISST) Version 2.1, *Journal of Climate*, 34, 2923-2939. 2021. doi: 10.1175/JCLI-D-20-0166.1

HIJMANS RJ, VAN ETTEN J. raster: Geographic Data Analysis and Modeling. R package version 2.3-33, URL <http://CRAN.R-project.org/package=raster,2015>.

HIJMANS RJ et al. raster: Geographic Data Analysis and Modeling. R package version 2.3-33, URL <http://CRAN.R-project.org/package=raster,2023>.

HODGSON, D. A., WHITEHOUSE, P., CORT, G., BERG, S., VERLEYEN, E., TAVERNIER, I., ROBERTS, S. J., VYVERMAN, W., SABBE, K. O'BRIEN, P.: **Rapid Early Holocene sea-level rise in Prydz Bay, East Antarctica.** *Global and Planetary Change* 139, 128 – 140, doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.12.020, 2016.

JUSTINO, F., AND W. R. PELTIER, 2008: Climate Anomalies Induced by the Arctic and Antarctic Oscillations: Glacial Maximum and Present-Day Perspectives. *J. Climate*, 21, 459–475, <https://doi.org/10.1175/2007JCLI1703.1>

KANNER, L. C., BURNS, S. J., CHENG, H., EDWARDS, R. L., VUILLE, M. Highresolution variability of the South American summer monsoon over the last seven millennia: insights from a speleothem record from the central Peruvian Andes. *Quaternary Science Reviews*, v. 75, p. 1-10, 2013.

Kerr, R. A. (2000). A North Atlantic climate pacemaker for the centuries. *Science*, 288(5473), 1984-1986.

KOUTAVAS, A. P; MENOCA, G; OLIVE and Lynch-Stieglitz. Mid-Holocene El Niño-Southern Oscillation (ENSO) attenuation revealed by individual foraminifera in Eastern tropical Pacific sediments. *Geology*, 34, 993-996.

LEDRU, M. P, AQUINO-ALFONSO, O., FINSINGER, W., SAMANIEGO, P., e HIDALGO, S.: Mudanças na vegetação e no ciclo da água do Páramo equatorial durante os últimos 5000 anos, *O Holoceno*, 32, <http://dx.doi.org/10.1177/09596836221101251>, 2022.

LEE, T.; MCPHADEN, M.J. 2010. Increasing intensity of El Niño in the central-equatorial Pacific. *Geophysical Research Letters*, 37(14): 1-5.

LIU, Z., OTTO-BLIESNER, B. L., HE, F., BRADY, E. C., TOMAS, R., CLARK, P. U., CARLSON, A. E., LYNCH-STIEGLITZ, J., CURRY, W., BROOK, E., ERICKSON, D.,

JACOB, R., KUTZBACH, J., AND CHENG, J.: Transient Simulation of Last Deglaciation with a New Mechanism for Bølling-Allerød Warming, *Science*, 325, 310–314, <https://doi.org/10.1126/science.1171041>, 2009.

LIU, Z. & ALEXANDER, M. Atmospheric bridge, oceanic tunnel, and global climatic teleconnections. *Rev. Geophys*, 45(2), 27-40, 2007. doi: 10.1029/2005RG000172.

LIU, Z., ZHU, J., ROSENTHAL, Y., ZHANG, X., OTTO-BLIESNER, B. L., TIMMERMANN, A., SMITH, R. S., LOHMANN, G., ZHENG, W., AND ELISON, T. O.: The Holocene temperature conundrum, *P. Natl. Acad. Sci. USA*, 111, 3501–3505, <https://doi.org/10.1073/pnas.1407229111>, 2014.

LOHMANN, G. Simulated Atlantic Multidecadal Oscillation during Holocene. *Journal of Climate*. p. 6989–7002. 2012. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00667.1>.

MANCINI, M.V., 1998. Vegetational changes during the Holocene Extra-Andean Patagonia, Santa Cruz Province, Argentina. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 138, 207–219

MANN, MICHAEL E.; STEINMAN, BYRON A.; MILLER, SONYA K. Absence of internal multidecadal and interdecadal oscillations in climate model simulations. *Nature Communications* 11 1–9, 2020. [ISSN 2041-1723. doi:10.1038/s41467-019-13823-w](https://doi.org/10.1038/s41467-019-13823-w).

MANN, M. E et al. Global signatures and dynamical origins of the Little Ice Age and Medieval Climate Anomaly. *Science*, v. 326, p. 1256-1260, 2009.

MARTÍNEZ, J. I.; OBROCHTA, S.; YOKOYAMA, Y.; BATTARBEE, R. W: Oscilação Multidecadal do Atlântico (AMO) forçando a dinâmica do paleolago Cauca do Holoceno tardio, norte dos Andes da Colômbia, *Clim. Discussão anterior.*, 11, 2649–2664, <https://doi.org/10.5194/cpd-11-2649-2015>, 2015.

MATSCHULLAT, J. The human impact on the natural environment. *Environmental Earth Sciences*, v. 72, n. 12, p. 5235-5236, 2015.

MAYESKI, P. A. Holocene climate variability. *Quaternary Research*, v. 62, p. 243-255, 2004.

MAYLE, FRANCIS E; BURBRIDGE, RACHEL; KILLEN, TIMOTHY J. Millennial-Scale Dynamics of Southern Amazonian Rain Forests. *Science*, New Series, v. 290, n. 5500, p. 2291–2294, 2000. Disponível em: <<http://www.jstor.org/sTabela/3081711>>.

McPHADEN, M. J. "Genesis and Evolution of the 1997-98 El Niño." *Science*, 283(5404), 950-954. 1999.

MCOHADEN, M.J. El Niño and La Niña: Causes and Global Consequences. In: *Encyclopedia of Global Environmental Change*, Vol 1, John Wiley and Sons, LTD., Chichester, UK, p. 353-370, 2002.

MECHOSO, C.R.; ROBERTSON, A. W.; ROPELEWSKI, C. F.; GRIMM, A. M. The American monsoon systems: an introduction. *The Global Monsoon System: Research and Forecast*. WMO-IWM-III, v. 13, p. 197-206, 2005.

MUÑOZ SABATER, J. (2019): ERA5-Land hourly data from 1950 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). DOI: [10.24381/cds.e2161bac](https://doi.org/10.24381/cds.e2161bac) (Accessed: 21 de Agosto de 2023).

NOVELLO, V. F.; KARMANN, S. J.; STRIKIS, N. M.; VUILLE, M.; CHENG, H.; LAWRENCE, E. R.; SANTOS, R. VFRIGO, E.; BARRETO, E. A. S. Multidecal climate variability in Brazil Nordeste during the last 3000 years baseado n speleothem isotope record. *Geophys. Res. Lett.* 39, L 23706. 2012.

NCAR: National Center for Atmospheric Research, 2011. **TraCE-21ka: Simulation of the Transient Climate of the Last 21,000 Years**. Acesso em: 27 de fevereiro de 2023.

NEIRA, E., VERCHEURE, H. AND REVENGA, C., 2002. Chile's Frontier forests: conserving a global treasure. *Global Forest Watch*, WRI: Washington.

NEUKOM, R.; LUTERBACHER, J.; VILLALBA, R.; KUTTEL, M.;FRANK, D.; JONES, P. D.; GROSJEAN, M.; WANNER, H.; ARAVENA, J. C.; BLACK, D. E.; CHRISTIE, D. A.; D' ARRIGO, R.; LARRA, A.; MORALES, M.; SOLIZGAMBOA, C.; SRUR, A.; URRUTIA, R.; VONGUNTEN, L. Multiproxy summer and winter surface air temperature field reconstructions for southern South America covering the past centuries. *Climate Dynamics* 37 (1-2), 35-51. 2010a

NEUKOM, R.; LUTERBACHER, J.; VILLALBA, R.; KUTTEL, M.; FRANK, D.; JONES, P. D.; GROSJEAN, M.; ESPER, J.; LOPEZ, L.; WANNER, H. 2010b. multi-centennial summer and winter precipitation variability in southern South America. *Geophysical Research Letters* 37, L14708. 2010b.

NOGUES-PAEGLE, J.; MECHOSO, C.R.; FU, R.; BERBERY, E.H.; CHAO, W.C.; CHEN, T.-C.; COOK, K.; DIAZ, A.F.G.; ENFIELD, D.; FERREIRA, R.; GRIMM, A.M.; KOUSKY, V.; LIEBMANN, B.; MARENGO, J.; MO, K.; NEELIN, J.D.; PAEGLE, J.; ROBERTSON, A.W.; SETH, A.; VERA, C.S.; ZHOU, J. Progress in Pan American CLIVAR research: understanding the South American Monsoon. *Meteorologica*, v. 27, p. 3-30. 2002.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA). A Paleo Perspective on Global Warming. Disponível em: <<https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/paleoclimatologydata/datasets/speleothem>>. 2015.

OLIVEIRA, P. E.; GARCIA, M. J.; MEDEIROS, V.B.; PESSENDA, L. C. R.; SUGUIO, K.; SANTOS, R. A.; SIQUEIRA, E.; FERNANDES, R. S. Paleoclima e Paleovegetação do Quaternário no estado de São Paulo. 2014. V. 5, p. 457-470.

OTTO-BLIESNER, B.L., BRADY, E.C., CLAUZET, G., TOMAS, R., LEVIS, S., KOTHAVALA, Z. Last Glacial Maximum and Holocene Climate in CCSM3. *J. Clim.* 19, 2526–2544, 2006. <https://doi.org/10.1175/JCLI3748.1>.

ORTIZ-JAUREGUIZAR, E. & CLADERA, G. A. **Paleoenvironmental evolution of southern South America during the Cenozoic.** Journal of Arid Environments. 66, pp. 498-532. 2006. DOI: 10.1016/j.jaridenv.2006.01.007.

PRADO, Guilherme Mapa Souza, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, outubro de 2020. Evolução da ocorrência de fogo na América do Sul durante o Holoceno. Orientador: Flávio Barbosa Justino.

PRADO, L. F.; WAINER, I.; CHIESSI, C. M.; LEDRU, M. P.; TURCQ, B. **A mid-Holocene climate reconstruction for eastern South America.** Clim. Past, 9, 2117–2133, 2013. doi:10.5194/cp-9-2117-2013.

R Core Team (2022). R: **A language and environment for statistical computing.** R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org>.

REBOITA, M. S., AMBRIZZI, T., CRESPO, N. M., DUTRA, L. M. M., FERREIRA, G. W. S., REHBEIN, A., DRUMOND, A., ROCHA, R. P., & SOUZA, C. A. Impacts of Teleconnection Patterns on South America Climate: a Review, Ann. NY Acad. Sci. 2021.

REIN, B; LUCKGE, A; REINHARDT, L; SIROCKO, F; WOLF, A; DULLO, W. C. El Niño variability of peru during the last 20,000 years. Paleoceanography, 20. P. PA4003. 2005.

REUTER, J.; STOTT, L.; KHIDER, D.; SINHA, A.; CHENG, H. EDWARDS, R. L. A new per-spective on the hydroclimate variability in Northern South America during the Little Ice Age. Geophys. Lett. 36, L 21706. 2009.

RIEDINGER, M. A; STEINITZ-KANNAN, W. M; BRENNER, A. ~6100 BP record of El Niño activity from the Galápos Islands. Journal of Paleolimnology, 27. Pp. 1-7. 2002.

ROCHA, R. P., REBOITA, M. S., DUTRA, L. M. M., LLOPART, M. P. & COPPOLA, E. Interannual variability associated with ENSO: present and future climate projections of RegCM4 for South America- CORDEX domain. Clim. Change 125, 95–109 (2014).

ROCHE, D. M., WIERSMA, A. P. and RENSSSEN, H.: **A systematic study of the impact of freshwater pulses with respect to different geographical locations,** Climate Dynamics., 34, 997–1013, doi:10.1007/s00382-009-0578-8, 2016.

RODBELL, D. T; SELTZER, G. O; ANDERSON, D. M; ABBOTT, M. B; ENFIELD, D. B; NEWMAN, J. H. An~15000years record of El Niño-driven alluviation in southwestern Ecuador. Science, 283, pp. 516-520. 1999.

RODRIGUES, M. J. **Influência dos modos de variabilidade oceânicas no clima da America do Sul durante o Holoceno médio.** Universidade Federal de Viçosa (UFV). Viçosa. Minas Gerais, 2011.

RODRIGUES, M. J.; BEHLING, H.; GIESECKE, T. **Holocene dynamics of vegetation change in southern and southeastern Brazil is consistent with climate forcing.** Universidade Federal de Viçosa. Viçosa. Minas Gerais, 2016.

SALLUN, A. E. M; SALLUN, W. F; SUGUIO, K; BABINSKI, M; GIOIA, S. M. C. L; HARLOW, B. A; DULEBA, W; De OLIVEIRA, P. E; GARCIA, M. J; WEBWE, C. Z; CHRISTOFOLETTI, S. R; SANTOS, C. D. S; MEDEIROS, V. B. D; SILVA, J. B; SANTIAGO-HUSSEIN, M. C; FERNANDES, R. S. Geochemical evidence of the 8.2ka event and Other Holocene environmental changes recorded in paleolago on sediments, southeastern Brazil. *Quat. Res.* 77, 31-43. 2012.

De GOUVEIA SOUZA, C. R. **Quaternário do Brasil**. Holos Editora, 2005.

SIFEDDINE, A.; MARTIN, L.; TURCQ, B.; VOLKMER-RIBEIRO, C.; SOUBIES, F.; CORDEIRO, R. C.; SUGUIO, K. Variations of the Amazonia na rainforest environment: a sedimentological record covering 30,000 years. *Palaeogeogr. Paleoclimatol. Palaeoecol.* 168, 221-235. 2001.

SILVESTRI G. E, VERA C. S. Antarctic oscillation signal on precipitation anomalies over southeastern South America. *Geophys ResLett* 30(21), 2003. [https:// doi. org/ 10. 1029/ 2003G L0182 77](https://doi.org/10.1029/2003GL018277).

SILVA, G.A.M.; AMBRIZZI, T; MARENGO, J.A. Observational evidences on the modulation of the South American Low Level Jet east of the Andes according the ENSO variability. *Annales Geophysicae*, v. 27, n. 2, p. 645-657, 2009.

SOUZA, C. A. de; REBOITA, M. S. Ferramenta para o Monitoramento dos Padrões de Teleconexão na América do Sul. *Terrae Didactica*, Campinas, SP, v. 17, n. 00, p. e02109, 2021. DOI: [10.20396/TD.v17i00.8663474](https://doi.org/10.20396/TD.v17i00.8663474)

SMITH, R. J.; MAYLE, F. E. Impact of mid-to late Holocene precipitation changes on vegetation across lowland tropical South America: a paleo-data synthesis. *Quaternary Research*, v. 89, n.1 p. 134-155, 2018.<http://dx.doi.org/10.1590/0102-778631320150142>.

SMITH, R. D E GENT, P.R. 2002: Manual de referência para o Programa Parallel Ocean (POP), componente oceânico do Community Climate System Model (CCSM2.0 e 3.0). Tecnologia Rep. LA-UR-02-2484, Laboratório Nacional de Los Alamos. Disponível online em <http://www.cesm.ucar.edu/models/ccsm3.0/pop>.

STUTZ, S.; BOREL, C. M.; FONTANA, S. L.; TONELLO, M. S. Holocene changes in trophic states of shallow lakes from the Pampa plain of Argentina, *The Holocene*, 22, 1263–1270, 2012.

SURIC, M., LONCARIC, R., BOCIC, N., LONCAR, N., BUZJAK, N. **Monitoring of selected caves as a prerequisite for the speleothem-based reconstruction of the Quaternary environment in Croatia**. *Quaternary international* v. 494, p. 263-274, 2018.

THOMPSON, L. G., MOSLEY-THOMPSON, E., DAVIS, M. E., HENDERSON, K. A., BRECHER, H. H., ZAGORODNOV, V. S., MASHIOTTA, T. A., LIN, P. N., MIKHALENKO, V. N., HARDY, D. R. AND BEER, J.: **Kilimanjaro ice core records: evidence of Holocene climate change in Tropical Africa**. *Science* 298: 589– 593, 2002.

Turcq, B.; PRESSINOTTI, M. M. N., and MARTINS, L. Paleohydrology and paleoclimate of the past 33.000 years at the Tamandua River, Central Brazil. *Quaternary Res.*, 47, 284-294, 1997.

UTIDA, G.; CRUZ, F. W.; ETOURNEAU, J.; BOULOUBASSI, I (2019). Tropical South Atlantic influence on Northeastern Brazil precipitation and ITZC displacement during the past 2300 years. February. 9:1698 | <https://doi.org/10.1038/s41598-018-38003-6>.

Van Den Dool HM (2007). *Empirical Methods in Short-Term Climate Prediction*. Oxford. University Press, Oxford.

Van Den Dool HM.; Johansson. A (2000). Empirical Orthogonal Teleconnections. *Journal of climate*, 13(8), 1421-1435.

VILLALBA, R.; LARA, A.; BONINSEGNA, J. A.; MASIOKAS, M.; DELGADO, S.; ARAVENA, J. C.; ROIG, F. A.; SCHMELTER, A.; WOLODARSKY, A.; RIPALTA, A. Large-scale temperature changes across the southern Andes: 20th-century variations in the context of the past 400 years. *Climatic Change*, 59 (1–2) (2003), pp. 177-232.

VIMEUX, F., SYLVESTRE, F., KHODRI, M. **Past climate variability in South America and surrounding regions: from the Last Glacial Maximum to the Holocene**. Springer Science & Business Media. V. 14, p. 421, 2009.

VEZY, R.; MAIRE. G.; CRISTINA. M.; GEORGIU. S.; IMBACH. S: **DynACof: a process-based model to study growth, yield and ecosystem services of coffee agroforestry systems**. Juno 2019. publication at: <https://www.researchgate.net/publication/333776631>.

WALKER, M. J. C. et al. Formal definition and dating of the GSSP (Global Stratotype Section and Point) for the base of the Holocene using the Greenland NGRIP ice core, and selected auxiliary records. **Journal of Quaternary Science**, v. 24, n. 1, p. 3-17, 2009.

WICKHAM, H, AVERICK M, BRYAN J, CHANG, W, MCGOWAN, L. D, FRANÇOIS R, GROLEMUND G, HAYES A, HENRY L, HESTER J, KUHN M, PEDERSEN, T. L, MILLER E, BACHE SM, MÜLLER K, OOMS J, ROBINSON D, SEIDEL, D. P, SPINU V, TAKAHASHI K, VAUGHAN D, WILKE C, WOO K, YUTANI H (2019). “Welcome to the tidyverse.” **Journal of Open SourceSoftware**, *4*(43), 1686. doi:10.21105/joss.01686<<https://doi.org/10.21105/joss.01686>>.

WIRTH, R., WEBER, B. AND RYEL, R. Spatial and temporal variability of canopy structure in a tropical moist forest, *Acta Oecologica*, 22: 235-244. 2001.

ZHANG, Y.; RENSSSEN, H. SEPPÄ, H.: **Effects of melting ice sheets and orbital forcing on the Early Holocene warming in the extratropical Northern Hemisphere. Amsterdam, the Netherlands**. *Climate of the Past*, 12, 1119–1135, 2016.

ZHANG, J. W et al. Holocene monsoon climate documented by oxygen and carbon isotopes from lake sediments and past peat bogs in chuna: a review and synthesis. *Quaternary Science Reviews*, v. 30, n. 15-16, p. 1973-1987, 2011.