

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**

**VARIAÇÕES DE TAMANHO EM FORAMINÍFEROS
PLANCTÔNICOS DO QUATERNÁRIO TARDIO NA BACIA
DE PELOTAS**

INGRID VIEIRA SILVA

Orientadora: María Alejandra Gómez Pivel

Porto Alegre, 2021

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**

**VARIAÇÕES DE TAMANHO EM FORAMINÍFEROS
PLANCTÔNICOS DO QUATERNÁRIO TARDIO NA BACIA
DE PELOTAS**

INGRID VIEIRA SILVA

Orientadora: María Alejandra Gómez Pivel

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dra. Carla Van der Haagen Custódio Bonetti

Dra. Fabiane Sayuri Iwai

Prof. Dr. Karlos Guilherme Diemer Kochhann

Dissertação de Mestrado apresentada
ao Programa de Pós-graduação da
Universidade Federal do Rio Grande do
Sul como requisito parcial para obtenção
do título de Mestre em Ciências.

Porto Alegre, 2021

CIP - Catalogação na Publicação

Silva, Ingrid
Variações de tamanhos em foraminíferos planctônicos
do Quaternário tardio na Bacia de Pelotas / Ingrid
Silva. -- 2021.
103 f.
Orientador: Maria Pivel.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa
de Pós-Graduação em Geociências, Porto Alegre, BR-RS,
2021.

1. Análise de tamanho. 2. Bacia de Pelotas. 3.
Produtividade. 4. Dissolução. 5. Quaternário. I.
Pivel, Maria, orient. II. Título.

RESUMO

A análise de tamanho de foraminíferos planctônicos pode ser considerada uma ferramenta útil na reconstrução das variações ambientais que ocorreram ao longo do tempo, devido à alta sensibilidade deste grupo. Registros do Quaternário tardio da Bacia de Pelotas, Oceano Atlântico Sul ocidental, mostram intensas mudanças oceanográficas, especialmente de temperatura e produtividade. Estudos anteriores mostram que o tamanho dos foraminíferos planctônicos responde principalmente às variações de temperatura. Tendo em vista a dinâmica oceanográfica da região nos últimos 43 mil anos, esse estudo teve como objetivo identificar mudanças no tamanho das testas de foraminíferos planctônicos, através da mensuração da área de seis táxons mais abundantes de um testemunho recuperado do talude da Bacia de Pelotas. Para isso, a Análise de Componentes Principais (PCA) foi utilizada como uma síntese das mudanças registradas pelas populações e o Componente Principal (PC1) da PCA para as correlações entre os tamanhos e as variáveis ambientais relacionadas a temperatura, produtividade (*G. glutinata* (%), $\delta^{13}\text{C}$ em *Uvigerina*), dissolução (CaCO_3 , PF/g) e fatores bióticos (abundância relativa, diversidade de Shannon (H) e riqueza de espécies). Diferentemente de trabalhos passados, os tamanhos dos foraminíferos da Bacia de Pelotas não mostraram correlação significativa com a temperatura, mas sim com os *proxies* de dissolução e produtividade. Os intervalos de maior produtividade na região podem ter aumentado a liberação de CO_2 no fundo e com isso, afetado a preservação das testas carbonáticas. Explorando essas correlações para conhecer melhor a relação do tamanho com outros parâmetros ambientais, neste estudo, os tamanhos parecem ter sido afetados pela dissolução. Desta forma, os tamanhos não representariam as condições de superfície, mas sim as de fundo (*post-mortem*), indicando que cuidados devem ser tomados ao realizar interpretações com base nos tamanhos.

Palavras-chave: paleoprodutividade, dissolução, Bacia de Pelotas

ABSTRACT

The analysis of planktonic foraminifera sizes can be considered a useful tool in the reconstruction of environmental variations that occurred over time, due to the high sensitivity of this group. Late Quaternary records from the Pelotas Basin, western South Atlantic Ocean, show intense oceanographic changes, especially in terms of temperature and productivity. Previous studies have shown that the size of planktonic foraminifera mainly depends on temperature variations. Given the region's oceanographic dynamics over the last 43 kyr, this study aimed to identify changes in the size of planktonic foraminifera tests, by measuring the area of the six most abundant taxa of a core retrieved at the Pelotas Basin slope. For this purpose, the Principal Component Analysis (PCA) was used to synthesize the size changes occurred within the population, and the Principal Component (PC1) of the PCA was used for the correlations between sizes and as environmental variables related to temperature, productivity (*G. glutinata* (%), $\delta^{13}\text{C}$ in *Uvigerina*), dissolution (CaCO_3 , PF / g), and biotic factors (abundance, Shannon diversity (H) and species richness). Unlike previous studies, the sizes of foraminifera from the Pelotas Basin are not likely related to temperature, but rather to dissolution and productivity proxies. The intervals of greater productivity in the region may have increased the release of CO_2 at the seafloor and, as a result, affecting the preservation of carbonate headlands. To better understand the relationship between size and environmental parameters, in this study we explored the correlations, and found that sizes appear to have been affected by dissolution. In this way, sizes would not represent surface conditions, but instead the seafloor (*post-mortem*) conditions, indicating that care should be taken when performing size-based interpretations.

Key-words: paleoproductivity, dissolution, Pelotas Basin

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Circulação superficial esquemática (simplificada) do Atlântico Sul com base em Peterson & Stramma (1991), sobreposta à temperatura superficial média anual (em °C) de acordo com o World Ocean Atlas (2018). AC = Corrente das Agulhas, BC = Corrente do Brasil, BeC = Corrente de Benguela, MC = Corrente das Malvinas, BMC = Confluência Brasil - Malvinas, SEC = Corrente Sul Equatorial, SAC = Corrente do Atlântico Sul e ACC = Corrente Circumpolar Antártica..... 13
- Figura 2. Circulação superficial na porção sudoeste da margem continental brasileira. Próximo a 39°S ocorre o encontro entre a Corrente das Malvinas (MC), em azul, que transporta a Água Subantártica (SAW) e a Corrente do Brasil (BC), em vermelho, transportando a Água Tropical (TW). Sobre a plataforma estas águas se modificam pela mistura com águas da drenagem continental e fluem em ramos mais próximos à costa (linhas amarela e azul claro). As águas da Pluma do Rio da Prata (PPW) têm seu trajeto alterado durante os meses de A) verão e B) inverno. Adaptado de Möller *et al.* (2008). 16
- Figura 3. Oscilações na concentração de clorofila geradas pela variação da pluma do Rio da Prata. Em A) janeiro de 2021 a pluma relativamente restrita à sua foz e exibindo menor produtividade na região. Em B) julho de 2020 a pluma se estendeu em direção a norte aumentando a concentração de clorofila em toda a área. 17
- Figura 4. Mapa de localização do testemunho SAT-048A na Bacia de Pelotas..... 18
- Figura 5. Espécies selecionadas e fotografadas neste estudo para análise da variação de tamanho. A barra em branco corresponde à escala de 500 µm. A) *Globigerina bulloides*, B) *Globigerinita glutinata*, C) *Globigerinoides ruber albus*, D) *Globigerinoides ruber ruber*, E) *Globoconella inflata*, F) *Neogloboquadrina incompta*. 20
- Figura 6. Demonstração do procedimento de correção do contorno de testas quebradas no software *ImageJ*. Escala de 500 µm. A) Testa quebrada de *G. ruber albus*. B) resultado do contorno corrigido..... 21
- Figura 7. demonstração do resultado do processo de preenchimento de aberturas nas imagens binárias no software *ImageJ*. A) a imagem após o processo de transformação para binária ainda exhibe falhas no preenchimento das aberturas das testas. B) resultado da imagem após o preenchimento. 22

Figura 8. Comparação entre os descritores de tamanho de *G. inflata* e *G. ruber albus*. Os descritores apresentam divergências ao longo do intervalo analisado, como entre 42 – 38 ka. As linhas verticais em cinza marcam os intervalos com variações dos descritores.....25

Figura 9. Comparação de tamanhos_{PC1} de táxons (A) *G. ruber albus*, (B) *G. ruber ruber*, (C) *N. incompta*, (D) *G. inflata*, (E) *G. bulloides* e (F) *G. glutinata* com as curvas de (G) variação de SST_{0-75m} (°C); (H) abundância relativa de *G. glutinata* (%) e (I) composição isotópica do carbono de *Uvigerina* spp. ($\delta^{13}C_{Uvi}$, em ‰, em relação ao padrão V-PDB) como indicadores de produtividade obtidos de Frozza *et al.* (2020); (J) foraminíferos planctônicos por grama de sedimento (PF/g) e (K) conteúdo de CaCO₃ como proxies de dissolução obtidos de Suárez-Ibarra *et al.* (2021); (L) diversidade representada pelo índice de Shannon e (M) riqueza de espécies como proxies bióticos ao longo dos últimos 43 kyr. Todos os dados pertencem ao testemunho SAT-048A. Os estágios de isótopos marinhos (MIS) são indicados por linhas verticais (MIS 2 em azul). As linhas verticais pretas dentro do MIS 2 indicam o Último Máximo Glacial (LGM) e a linha vertical pontilhada vermelha indica o início do Holoceno.27

Figura 10. Comparação entres os tamanhos_{PC1} e as abundâncias relativas (%) para cada táxon. A) e B) *G. ruber albus*; C) e D) *G. ruber ruber*, E) e F) *N. incompta*; G) e H) *G. inflata*; I) e J) *G. bulloides*; K) e I) *G. glutinata*.30

Figura 11. Imagem MEV de uma testa de *G. ruber* do testemunho SAT-048 exibindo cicatrizes no local onde teria a sutura da última câmara. Barra de escala: 100 μ m. .38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Lista dos táxons analisados e respectivas províncias biogeográficas.	19
Tabela 2. Correlação de Spearman entre os tamanhos _{PC1} dos táxons e os proxies utilizados. Correlações significativas possuem $p < 0,05$	31
Tabela 3. Correlação de Spearman entre os tamanhos _{PC1} dos táxons.	32

LISTA DE ABREVIATURAS

- AC – Corrente das Agulhas (*Agulhas Current*)
- ACC – Corrente Circumpolar Antártica (*Antarctic Circumpolar Current*)
- BC – Corrente do Brasil (*Brazil Current*)
- BeC – Corrente de Benguela (*Benguela Current*)
- BMC – Confluência Brasil – Malvinas (*Brazil - Malvinas Confluence*)
- LGM – Último Máximo Glacial (*Last Glacial Maximum*)
- MAT – Técnica do Análogo Moderno (*Modern Analog Technique*)
- MC – Corrente das Malvinas (*Malvinas Current*)
- MIS – Estágio Isotópico Marinho (*Marine Isotope Stage*)
- NBC – Corrente Norte do Brasil (*North Brazil Current*)
- PC1 – Componente Principal (*Principal Component*)
- PCA – Análise de Componente Principais (*Principal Component Analysis*)
- PPW – Água da Pluma do Rio da Prata (*Plata Plume Water*)
- SAC – Corrente do Atlântico Sul (*South Atlantic Current*)
- SACW – Água Central do Atlântico Sul (*South Atlantic Central Water*)
- SEC – Corrente Sul Equatorial (*South Equatorial Current*)
- TW – Água Tropical (*Tropical Water*)
- V-PDB – *Vienna Pee Dee Belemnite*

SUMÁRIO

1. Introdução	9
2. Estado da arte	10
2.1 <i>Aspectos gerais sobre os foraminíferos planctônicos</i>	10
2.2 <i>A variação de tamanho como guia nas reconstruções</i>	11
3. Contextualização das condições oceanográficas do Atlântico Sul	13
3.1 <i>Circulação superficial no Atlântico Sul</i>	13
3.2 <i>Área de estudo</i>	15
4. Materiais e métodos	17
4.1 <i>Amostragem e processamento das amostras</i>	17
4.2 <i>Aquisição de imagens e medidas</i>	18
4.3 <i>Modelo de idade</i>	22
4.4 <i>Tratamento dos dados para análise dos tamanhos</i>	22
4.5 <i>Parâmetros ambientais</i>	23
4.6 <i>Correlações</i>	24
5. Síntese dos resultados	24
5.1 <i>Variações dos tamanhos ao longo dos últimos 43 mil anos</i>	24
5.2 <i>Estimativas de paleotemperaturas (SST_{0-75m})</i>	28
5.3 <i>Parâmetros bióticos</i>	29
5.4 <i>Correlações de Spearman</i>	31
6. Discussões	32
6.1 <i>Efeito da temperatura</i>	32
6.2 <i>Efeito da produtividade</i>	35
7. Conclusões	38
8. Referências bibliográficas	39
9. Artigo Submetido	48

ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

O corpo principal desta dissertação de mestrado, está estruturado em torno do artigo submetido ao periódico *Marine Micropaleontology* classificado no estrato Qualis – CAPES como A2, precedido por um texto integrador.

O texto integrador compreende os seguintes capítulos: 1) Introdução; 2) Estado da arte; 3) Contexto oceanográfico; 4) Materiais e métodos; 5) Síntese dos resultados; 6) Discussões; 7) Conclusões; e 8) Referências bibliográficas. Finalmente, o artigo submetido é apresentado no capítulo 9.

1. Introdução

O Quaternário (últimos 2,58 Ma da história geológica da Terra) é marcado por variações entre ciclos glaciais e interglaciais que se refletiram em intensas mudanças nas condições paleoceanográficas (Pisias & Moore, 1981; Hudson & Anderson, 1989; Robinson *et al.*, 1995; Sarnthein *et al.*, 1995; Jian *et al.*, 2000; Aniya, 2013). A utilização de foraminíferos planctônicos e bentônicos, com diferentes métodos, tem desempenhado papel fundamental na compreensão dessas diversas oscilações das condições oceânicas que ocorreram ao longo do tempo. O sucesso na utilização dos foraminíferos, especialmente os planctônicos, é atribuído principalmente à sua sensibilidade às condições do meio em que vivem, resultando na possibilidade de utilização de vários sinais geoquímicos, à sua ampla distribuição geográfica, abundância, diversidade e boa preservação ao longo das seções (Kucera, 2007; Schiebel & Hemleben, 2017).

Tendo em vista essa sensibilidade, os foraminíferos planctônicos passaram por uma série de modificações ao longo do tempo geológico, tanto relacionadas a sua diversidade quanto as suas características morfológicas (Renaud & Schmidt, 2003; Schmidt *et al.*, 2004a, 2004b; Kaiho *et al.*, 2006; Wade & Olsson, 2009; Birch *et al.*, 2012; Davis *et al.*, 2013; Wade *et al.*, 2016). Nesse sentido, estudos analisando a variação de tamanho têm se tornado promissores na tentativa de compreender melhor o comportamento desse grupo em relação às variáveis ambientais e estabelecer *proxies* a partir da variação das características morfológicas (como tamanho, porosidade, densidade, espessura da parede) (Bé, 1968; Schmidt *et al.*, 2004b; Constandache *et al.*, 2013; Duque-Castaño *et al.*, 2019; Zarkogiannis *et al.*, 2019; Todd *et al.*, 2020).

A porção sudoeste da margem continental brasileira possui uma dinâmica oceânica controlada principalmente pela intensidade dos ventos, pelo encontro da Corrente do Brasil com a Corrente das Malvinas e pela influência da drenagem continental como o Rio da Prata. Essa região corresponde a uma zona transicional com mudanças bem documentadas nos parâmetros ambientais, principalmente no Quaternário tardio (por exemplo, Toledo *et al.*, 2007; Lessa *et al.*, 2014; Gu *et al.*, 2017; Pereira *et al.*, 2018; Portilho-Ramos *et al.*, 2019).

Esta região apresenta oscilações principalmente em termos de produtividade primária, com um cenário de maior produtividade durante os intervalos glaciais

resultado da intensificação dos ventos (Portilho-Ramos *et al.*, 2015; Lessa *et al.*, 2017), maior ressurgência (Pereira *et al.*, 2018; Portilho-Ramos *et al.*, 2019), maior contribuição da pluma do Rio da Prata (Gu *et al.*, 2017, 2018) e pelo aumento da exportação de ácido sílico pela massa de água do Atlântico Central (Portilho-Ramos *et al.*, 2019).

A intensificação da produtividade é identificada principalmente pela abundância de espécies oportunistas como *Globigerina bulloides* e *Globigerinita glutinata* na coluna d'água. Tais condições podem levar a uma maior exportação de matéria orgânica (MO) para o fundo oceânico. Ali, a decomposição e oxidação dessa MO, libera CO₂ podendo promover a dissolução do carbonato e, portanto, das carapaças (Conan *et al.*, 2002; Schiebel, 2002). Desde o último interglacial, os intervalos de maior dissolução na Bacia de Pelotas ocorreram durante os estágios isotópicos marinhos (MIS) 4 a 2 (Petró *et al.* 2021).

Tais características fazem dessa região um cenário ideal para compreender melhor como ambientes afetados principalmente pelo mecanismo de ressurgência, podem impactar nas variações de tamanho das testas de foraminíferos planctônicos. Com esse objetivo, foi mensurada a área das seis espécies mais abundantes ao longo do testemunho SAT-048A, recuperado do talude da Bacia de Pelotas e que abrange o intervalo de 43 – 5 ka.

2. Estado da arte

2.1 Aspectos gerais sobre os foraminíferos planctônicos

Os foraminíferos planctônicos são protozoários habitantes de ambientes marinhos, reconhecidos principalmente por ser um grupo bem-sucedido e eficiente no fornecimento de uma variedade de *proxies* por meio da análise de suas testas de carbonato de cálcio que auxiliam na interpretação sobre a dinâmica dos oceanos. Esses indivíduos que surgiram no Jurássico e se diversificaram ao longo do tempo, presenciaram uma série de eventos geológicos de escala global e que modificaram as condições da vida na Terra (Hart *et al.*, 2003; Hudson *et al.*, 2009; Gradstein *et al.*, 2017). Atualmente, são reconhecidas aproximadamente 47 morfoespécies que habitam os oceanos modernos (Siccha & Kucera, 2017; Schiebel & Hemleben, 2017).

Os foraminíferos planctônicos habitam o oceano aberto e podem estar presentes entre 10 m (zona epipelágica) a 2000 m (zona batipelágica), o que vai depender de algumas características das espécies como, por exemplo, se são portadoras ou não de simbioses (Schiebel & Hemleben, 2017). No entanto, isso não define que uma determinada espécie seja restrita somente a uma certa faixa de profundidade ao longo de sua ontogenia. Como já mencionado em alguns estudos (Boltovskoy, 1973; Field, 2004; Meilland *et al.*, 2019), algumas espécies migram verticalmente controlando sua flutuabilidade, submergindo ou emergindo ao longo da coluna d'água, durante o seu ciclo de vida. A distribuição na coluna d'água dos foraminíferos planctônicos pode ser irregular e facilmente mutável, e ainda há discussões sobre as migrações verticais diurnas (Meilland *et al.*, 2019).

A testa dos foraminíferos planctônicos é a principal ferramenta nos estudos paleoceanográficos e pode apresentar as mais diversas morfologias. Dessa forma, é de suma importância uma boa classificação taxonômica. Dependendo do(s) autor(es), os critérios utilizados durante a classificação podem variar, mas de modo geral levam em consideração a composição das testas, a presença e tamanho dos poros, a presença ou ausência de espinhos, o arranjo das câmaras, o padrão de enrolamento, a forma das câmaras, a presença de aberturas primárias ou secundárias e ornamentações (Bé, 1967; Bé *et al.*, 1977; Bolli & Saunders, 1989; Hemleben *et al.*, 1989; Kemle-von Mücke & Hemleben, 1999; Schiebel & Hemleben, 2017). Além disso a classificação em morfotipos de foraminíferos planctônicos é feita nas carapaças em fase adulta, a fim de evitar possíveis erros.

Atualmente a distribuição das assembleias de foraminíferos planctônicos modernos é associada a cinco províncias biogeográficas de escala global (Kucera, 2007). Partindo dos polos tem-se a província polar, subpolar, transicional, subtropical e tropical e, tanto o tamanho como o número de espécies, aumentam dos polos aos trópicos (Schmidt *et al.*, 2004b; Kucera, 2007).

2.2 A variação de tamanho como guia nas reconstruções

A literatura acerca dos foraminíferos constantemente enfatiza a sensibilidade desses organismos às condições de seus habitats, principalmente em relação à temperatura, disponibilidade de nutrientes, pH, salinidade, concentração de clorofila, intensidade de luz e oxigênio. A partir disso, pesquisas a fim de compreender ou reconstruir as condicionantes químicas, físicas e biológicas dominantes nesses

habitats, têm sido realizadas através de métodos como: análise da composição de elementos-traço e de isótopos estáveis de carbono e oxigênio das carapaças, variações de tamanho, variações de peso, evidências de dissolução, forma de desenvolvimento, etc.

Em Schmidt *et al.* (2004b), os autores abordam justamente a sensibilidade dos foraminíferos aos fatores ecológicos, relacionando as variações de tamanho das testas das cinco zonas biogeográficas a fatores como temperatura média anual da superfície do mar, variação sazonal máxima de temperatura, salinidade, de concentração de fosfato e nitrato e produtividade primária durante o Quaternário. De acordo com os autores, a variação do tamanho das testas dos foraminíferos está associada principalmente à temperatura. No entanto, deve-se levar em consideração outros parâmetros que são associados a essa variável ambiental tais como eficiência metabólica, supersaturação do CaCO₃, riqueza dos nichos, diversidade e produtividade local.

Em ambientes que apresentam condições instáveis como, por exemplo, as frentes polares, subtropicais e zonas de ressurgência o tamanho das testas é abaixo da média esperada, pois tais condições são diferentes de seus ótimos ambientais (Schmidt *et al.*, 2004b) sendo este representado pela abundância relativa das espécies (Moller *et al.*, 2013; Weinkauff *et al.*, 2013). Algumas espécies podem não responder às condições estressantes com alterações em seu tamanho, o que seria o caso de espécies resistentes ou oportunistas como *Globoconella inflata* e *Globigerina bulloides*, que se apresentam dominantes em tais condições.

A análise de tamanho em foraminíferos planctônicos não se restringe ao Quaternário e já foi utilizada para outros intervalos de tempo, principalmente no limite Cretáceo – Paleógeno (por exemplo, Kucera & Malmgren, 1998; Abramovich & Keller, 2003; Keller & Abramovich, 2009; Birch *et al.*, 2012; Karabeyoğlu *et al.*, 2019) e em intervalos associados a mudanças consideráveis nas condições oceânicas (por exemplo, Hart *et al.*, 2003; Kaiho *et al.*, 2006; Petrizzo, 2007; Wade & Olsson, 2009; Alegret *et al.*, 2010; Schmidt *et al.*, 2016). Nessas reconstruções é possível observar que, desde o seu surgimento (assim como outros grupos), os foraminíferos planctônicos tiveram sua abundância, diversidade e características morfológicas modificadas em consequência das mudanças nas condições paleoceanográficas, muitas dessas associadas às atividades tectônicas e vulcânicas e que impactaram consideravelmente o sistema atmosfera-oceano.

Diante de tais modificações, em busca da adaptação às condições presentes,

as assembleias de foraminíferos nos oceanos foi sendo modificada, seja pela eliminação seletiva de espécies especializadas, seja por alterações morfológicas como a diminuição do tamanho e perda de ornamentação (Abramovich & Keller, 2002; Keller & Abramovich, 2009; Abramovich *et al.*, 2010; Kopaeovich, 2019; Ferraro *et al.*, 2020). Estima-se que os foraminíferos das assembleias atuais possuem os maiores tamanhos já identificados no registro e começaram essa tendência de aumento globalmente na metade do Mioceno, no entanto, em algumas localidades, isso já foi notado em amostras mais antigas (Schmidt *et al.*, 2004a; Wade & Olsson, 2009; Kaiho *et al.*, 2006; Todd *et al.*, 2020).

3. Contextualização das condições oceanográficas do Atlântico Sul

3.1 Circulação superficial no Atlântico Sul

A atual configuração da circulação superficial no Oceano Atlântico é controlada por dois grandes giros e pelos sistemas de correntes circumpolar e equatorial (Peterson & Stramma, 1991). O giro subtropical do Atlântico Sul é influenciado pela ação de algumas correntes superficiais (Fig. 1), sendo elas descritas a seguir.

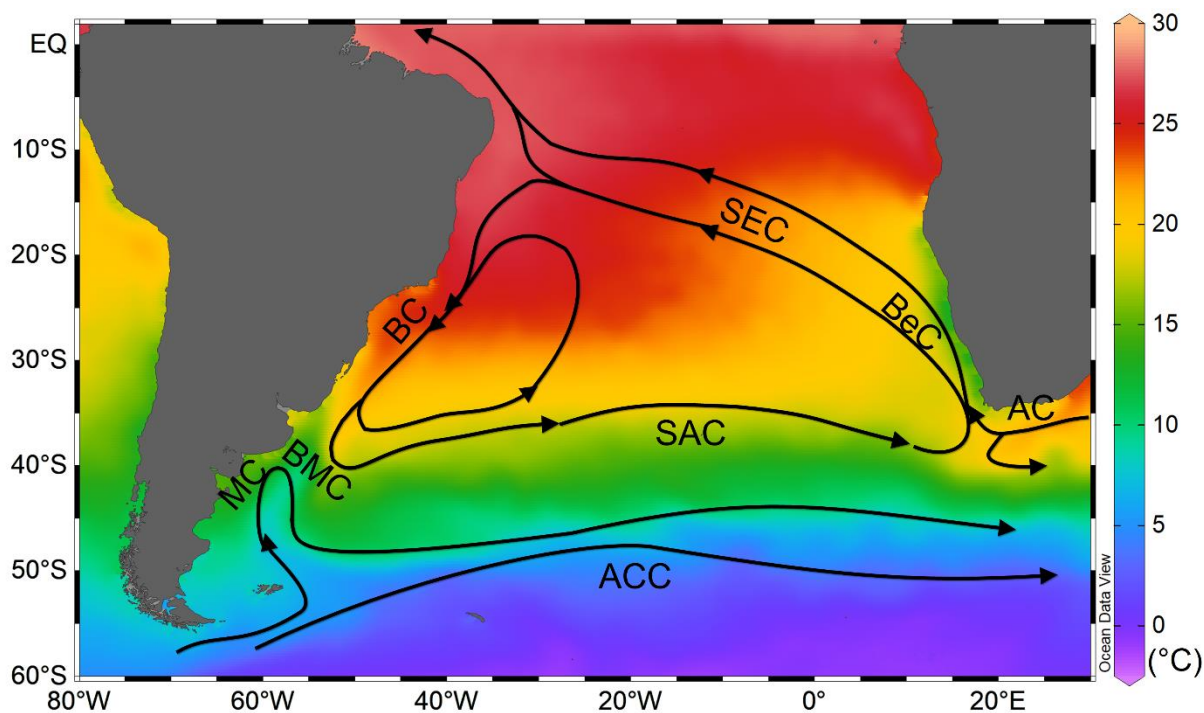


Figura 1. Circulação superficial esquemática (simplificada) do Atlântico Sul com base em Peterson & Stramma (1991), sobreposta à temperatura superficial média anual (em °C) de acordo com o World Ocean Atlas (2018). AC = Corrente das Agulhas, BC = Corrente do Brasil, BeC = Corrente de Benguela, MC = Corrente das Malvinas, BMC = Confluência Brasil - Malvinas, SEC = Corrente Sul Equatorial, SAC = Corrente do Atlântico Sul e ACC = Corrente Circumpolar Antártica.

Para explicar a configuração de tais correntes, um ponto de partida interessante de abordar brevemente é a Corrente das Agulhas (AC), apesar desta fazer parte do subgiro do sudoeste do Oceano Índico (Fig. 1). A AC é uma corrente que flui bordejando a porção sul do continente africano em direção a oeste, entre as latitudes de 28,5°-34°S. Durante seu percurso, devido à fisiografia da região, principalmente ao passar pelo embaiamento de Natal (próximo à costa de Durban, África do Sul), é comum a formação de meandros que se formam ao menos seis vezes por ano e que contribuem na transferência de águas quentes e salgadas do Índico para o Atlântico Sul (Peterson & Stramma, 1991; Lutjeharms, 2009). Além disso, os redemoinhos do canal de Moçambique também influenciam na formação e na durabilidade de tais meandros (Schouten *et al.*, 2002). De acordo com Garzoli & Gordon (1996), a AC contribui em até 25% na formação da Corrente de Benguela (BeC).

A BeC (corrente de contorno leste) é formada pela mistura das águas do Oceano Atlântico através da Corrente do Atlântico Sul (SAC), do Oceano Índico pela AC e pelas águas subantárticas através da Corrente Circumpolar Antártica (ACC) (Peterson & Stramma, 1991; Gordon *et al.*, 1992; Garzoli & Gordon, 1996). É uma corrente controlada pelos sistemas de alta e baixa pressão da região e pelos ventos que conduzem à formação de uma importante ressurgência que é mais intensa durante os meses da primavera (Shannon, 2001). Ao se separar da costa africana, aproximadamente em 30°S, essa corrente flui para noroeste, contribuindo com a Corrente Sul Equatorial (SEC) que, mais a oeste, em aproximadamente 10° S, se bifurca em duas outras correntes: a Corrente Norte do Brasil (NBC), que flui para o hemisfério norte e a Corrente do Brasil (BC), que flui para sul sobre a plataforma continental brasileira (Peterson & Stramma, 1991).

A BC, se comparada a NBC é menos intensa, pois a maior parte da água transportada pela SEC é direcionada para o hemisfério norte, mas à medida que avança para sul a BC é intensificada principalmente por uma célula de recirculação e pelo seu aprofundamento de 100 m para 600 m (Peterson & Stramma, 1991; Müller *et al.*, 1998; Piola & Matano, 2009). Esta corrente, originada entre 10°-15°S que segue bordejando a costa brasileira é caracterizada por transportar na camada superior, águas quentes e salinas, limitadas inicialmente à plataforma continental (Silveira *et al.*, 2000; Piola & Matano, 2009). Em torno de 15°S a BC passa a se afastar da costa e a partir disso, encontra mudanças na topografia da região (como a cordilheira Trindade-Vitória), o que contribui na geração de vórtices e meandros que

são significativos no processo de ressurgência, principalmente na região de Cabo Frio (Silveira *et al.*, 2000; Rodrigues & Lorenzetti, 2001).

Em torno de 39°S ocorre a formação da Confluência Brasil-Malvinas, uma zona de intensa energia formada pelo encontro de águas tropicais carregadas pela BC e de águas subantárticas da Corrente das Malvinas (MC) (Piola & Matano, 2009). A partir desse ponto, que pode variar sazonalmente, a BC junto com parte da MC migra para leste, formando a Corrente do Atlântico Sul (SAC) e fechando o giro subtropical do Atlântico Sul (Martins, 1984; González-Silvera *et al.*, 2006).

A MC, após se separar da Corrente Circumpolar Antártica (ACC) na passagem de Drake, tem sua ocorrência entre 40°-50°S carregando águas frias (de 4-16°C) que vão aquecendo progressivamente conforme sua migração para norte, e menos salinas ($S < 34.2$) se comparada a Corrente do Brasil ($S > 36$) (Piola & Matano, 2009). As variações nessa corrente, que atualmente tem uma largura extensa (~150 km) porém com seu fluxo concentrado em dois jatos com até 20 km, são responsáveis por mudanças nos ecossistemas marinhos e no clima da região (Brandini *et al.*, 2000; Piola *et al.*, 2013; Krechik, 2020).

De modo geral, pode-se afirmar que as correntes situadas à leste do Oceano Atlântico Sul possuem papel significativo na dinâmica da circulação atual e nos cenários de ressurgência da região (Peterson & Stramma, 1991).

3.2 Área de estudo

O testemunho analisado nesta dissertação foi coletado no talude da Bacia de Pelotas, localizada na porção sul da Plataforma Continental Brasileira, entre as latitudes 28°S e 34°S. A Bacia de Pelotas, delimitada a norte pelo Alto de Florianópolis e a sul pelo Alto de Polônio, é uma bacia marginal que foi formada durante o processo de fragmentação do supercontinente Gondwana e abertura do Atlântico, que resultou na formação das demais bacias ao longo da margem continental brasileira (Bueno *et al.*, 2007; Mohriak, 2003). O preenchimento sedimentar desta bacia, que pode chegar até 8.000 metros em sua parte mais profunda é constituído por sequências clásticas continentais e transicionais (Barboza *et al.*, 2008)

Conforme descrito na seção 3.1, as condições oceanográficas na área de estudo são regidas principalmente pelo encontro contrastante de duas correntes superficiais: a BC, que transporta águas tropicais e a MC, que transporta águas

subantárticas, gerando uma zona de convergência, situada em 39°S (Figura 2) (Piola e Matano, 2001). Além disso, a região em estudo é influenciada sazonalmente pelas águas da pluma do Rio de La Plata que tem uma vazão anual que varia de 22.000-28.000 m³/s em anos normais (Nagy *et al.*, 2008). As águas do Rio da Prata possuem um papel fundamental na produtividade primária (Figura 3) da região e, além disso, podem influenciar em outros parâmetros na coluna d'água como temperatura e salinidade. A pluma pode penetrar mais ao norte da margem continental brasileira ou se manter mais retida próxima à sua foz. Como identificado por Pimenta *et al.* (2005), a maior ou menor intrusão da pluma depende principalmente da posição inicial da pluma na plataforma e da intensidade e durabilidade dos ventos. Dessa forma, é importante levarmos em conta essa variabilidade ao longo do tempo no testemunho em estudo.

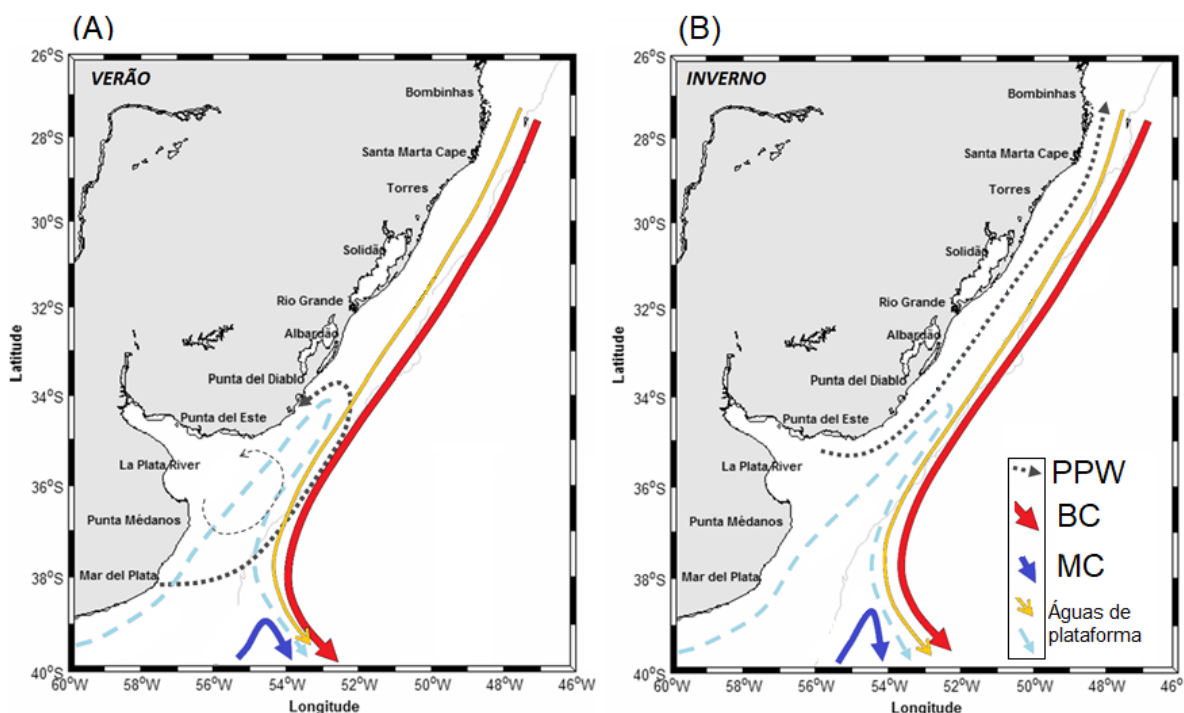


Figura 2. Circulação superficial na porção sudoeste da margem continental brasileira. Próximo a 39°S ocorre o encontro entre a Corrente das Malvinas (MC), em azul, que transporta a Água Subantártica (SAW) e a Corrente do Brasil (BC), em vermelho, transportando a Água Tropical (TW). Sobre a plataforma estas águas se modificam pela mistura com águas da drenagem continental e fluem em ramos mais próximos à costa (linhas amarela e azul claro). As águas da Pluma do Rio da Prata (PPW) têm seu trajeto alterado durante os meses de A) verão e B) inverno. Adaptado de Möller *et al.* (2008).

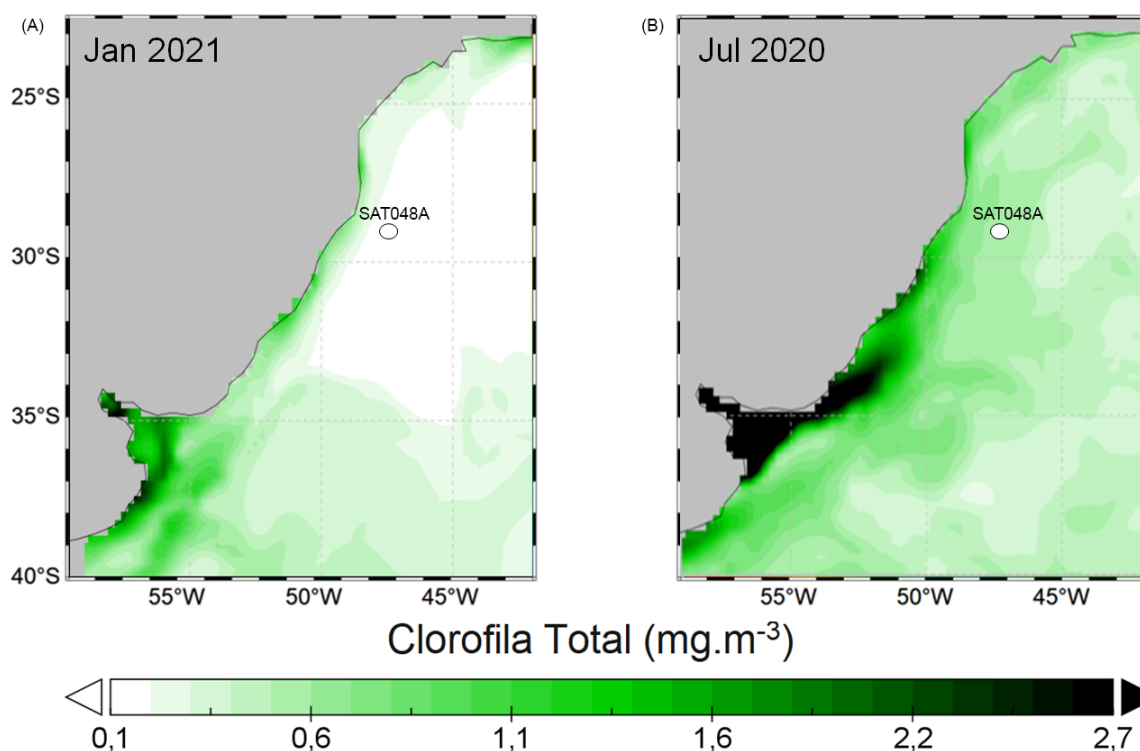


Figura 3. Oscilações na concentração de clorofila geradas pela variação da pluma do Rio da Prata. Em A) janeiro de 2021 a pluma relativamente restrita à sua foz e exibindo menor produtividade na região. Em B) julho de 2020 a pluma se estendeu em direção a norte aumentando a concentração de clorofila em toda a área.

3 Materiais e métodos

3.1 Amostragem e processamento das amostras

Para a realização desta dissertação foram utilizadas 49 amostras de sedimentos do testemunho SAT-048A, com profundidade de 1.542 m e 3,15 m de recuperação. O testemunho foi coletado nas coordenadas 29°11'52,110"S e 47°15'10,219"O (Bacia de Pelotas) (Figura 4).

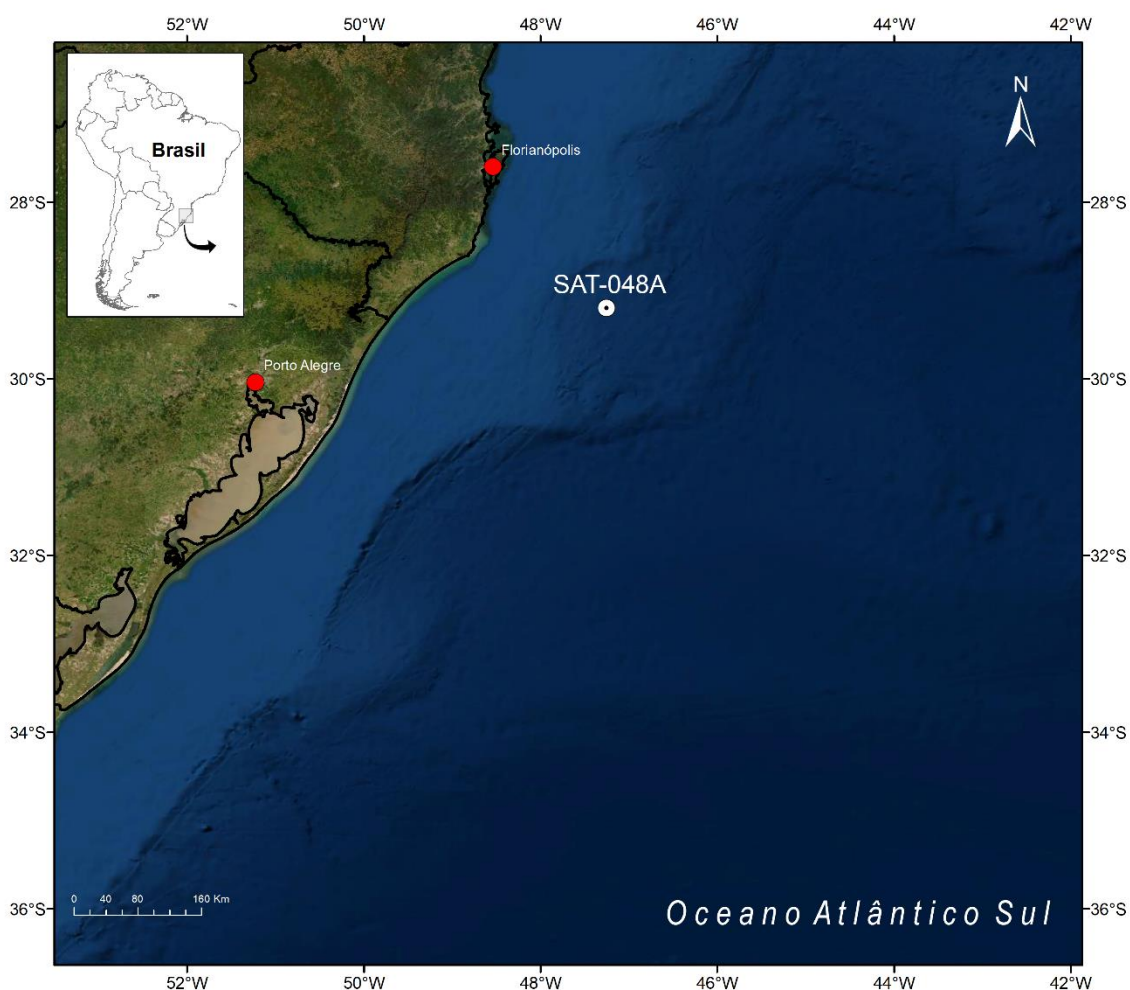


Figura 4. Mapa de localização do testemunho SAT-048A na Bacia de Pelotas.

As amostras de sedimentos utilizadas para a realização desta pesquisa já haviam sido preparadas, pelo método padrão, no trabalho de Frozza *et al.* (2020) e Suárez-Ibarra *et al.* (2020). Inicialmente, as amostras foram lavadas em peneira de 63 μm para remoção da fração fina (silte e argila) e secas na estufa em temperatura de até 60 °C. Em seguida, foi realizado um segundo peneiramento (a seco) através da malha de 150 μm para a análise da fração grossa. Após o processo inicial de preparação, as amostras foram classificadas e separadas em lâminas com auxílio de lupa binocular. A classificação taxonômica seguiu os critérios de Bé (1967), Bé *et al.* (1977), Bolli & Saunders (1989), Hemleben *et al.* (1989), Kemle-von Mücke & Hemleben (1999), (Schiebel & Hemleben (2017) e Morard *et al.* (2019).

4.2 Aquisição de imagens e medidas

Para a realização da análise da variação do tamanho foram escolhidas as seguintes espécies de foraminíferos planctônicos: *Globigerina bulloides*, *Globigerinita glutinata*, *Globigerinoides ruber* (*ruber* e *albus*), *Globoconella inflata* e *Neogloboquadrina incompta* (Tab. 1, Fig. 5). A escolha de tais espécies deve-se à sua maior abundância no testemunho para se ter maior robustez nos dados. Além disso, com a escolha dessas espécies tem-se representação de quatro das cinco zonas biogeográficas definidas por Kucera (2007): transicional, subtropical, tropical e subpolar.

A área foi a medida escolhida para mensurar a variação do tamanho nas testas dos foraminíferos, que apesar de não ser uma medida tridimensional apresenta consistência e confiabilidade como já testado por Brombacher *et al.* (2017, 2018).

Inicialmente as carapaças foram posicionadas com o lado umbilical para cima e os cuidados para deixá-las com a menor inclinação possível foram tomados a fim de evitar possíveis distorções na extração dos dados. Vale ressaltar que testas quebradas, de forma que comprometesse a medida do formato da testa, foram excluídas da contagem. Somente em alguns casos de testas quebradas que não tiveram seu contorno afetado, foi realizado o preenchimento do espaço evitando assim a diminuição do número amostral, como demonstrado na Figura 6.

Tabela 1. Lista dos táxons analisados e respectivas províncias biogeográficas.

Táxon	Província (Kucera, 2007)
<i>Globigerinoides ruber ruber</i> d'Orbigny (1839)	Tropical
<i>Globigerinoides ruber albus</i> Morard <i>et al.</i> 2019	Subtropical
<i>Globigerina bulloides</i> d'Orbigny (1826)	Transicional
<i>Globigerinita glutinata</i> (Egger 1895)	Transicional
<i>Globoconella inflata</i> (d'Orbigny 1839)	Transicional
<i>Neogloboquadrina incompta</i> (Cifelli 1961)	Subpolar

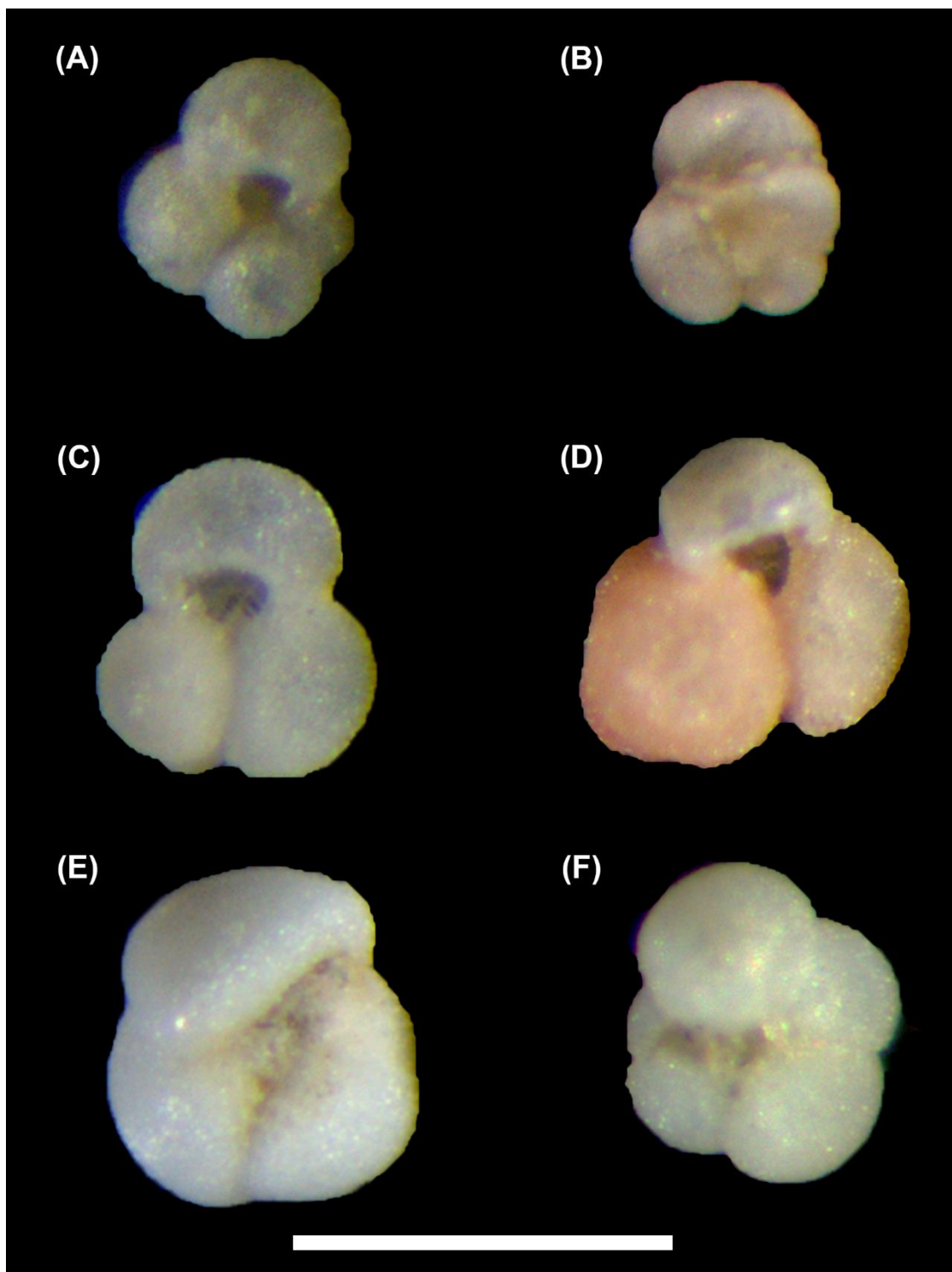


Figura 5. Espécies selecionadas e fotografadas neste estudo para análise da variação de tamanho. A barra em branco corresponde à escala de 500 μm . A) *Globigerina bulloides*, B) *Globigerinita glutinata*, C) *Globigerinoides ruber albus*, D) *Globigerinoides ruber ruber*, E) *Globoconella inflata*, F) *Neogloboquadrina incompta*.

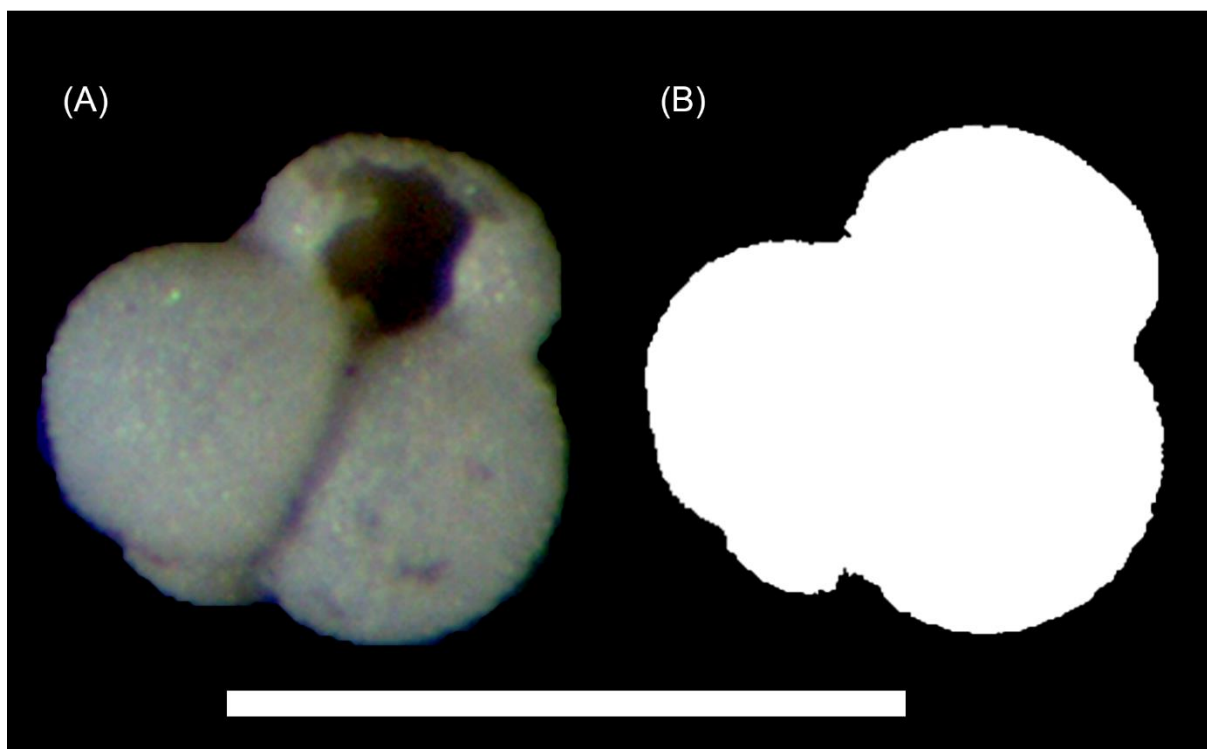


Figura 6. Demonstração do procedimento de correção do contorno de testas quebradas no software *ImageJ*. Escala de 500 μm . A) Testa quebrada de *G. ruber albus*. B) resultado do contorno corrigido.

As imagens foram obtidas manualmente utilizando o software *Zen 2.6 lite (blue edition)* e o estereomicroscópio da marca *Zeiss*, modelo *Discovery V8 Stereo* com a câmera digital *Axiocam 105 color* acoplada. Com o uso desse software e do estereomicroscópio foi possível obter as imagens com escala gráfica de referência e ajustar as configurações de foco, luz e contraste.

Para a realização das medidas das testas através das imagens obtidas foi utilizado o software *ImageJ* (Abràmoff *et al.*, 2004), disponível gratuitamente em <https://imagej.nih.gov/ij/>. No software, como passo inicial, foi definida a medida de interesse pelo comando *Analyze*→*Set Measurements*, onde foi selecionada a variável área. Em seguida, após abrir a imagem, adicionar a escala conhecida e realizar o processo de segmentação transformando-a primeiramente para escala em tons de cinza e posteriormente em binária pela função *Threshold* foi realizado o preenchimento de aberturas, pelo comando *Process*→*Binary*→*Fill holes* podendo essas aberturas serem da testa do foraminífero ou simplesmente, por falta do preenchimento durante a fase de transformação da imagem em binária (Figura 7). Esse processo foi adotado para evitar possíveis distorções nas medidas de área.

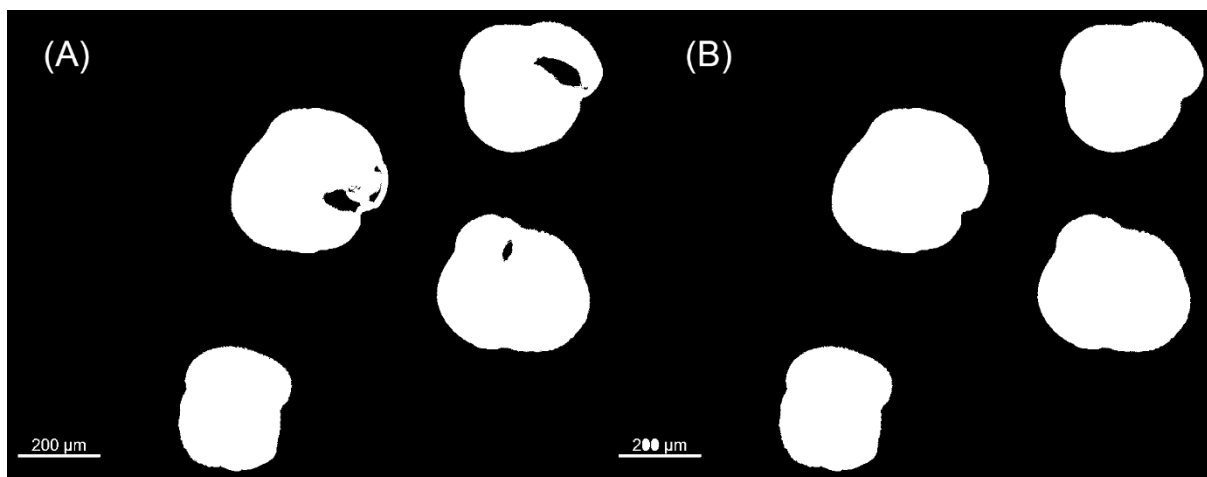


Figura 7. demonstração do resultado do processo de preenchimento de aberturas nas imagens binárias no software *ImageJ*. A) a imagem após o processo de transforma o para binária ainda exibe falhas no preenchimento das aberturas das testas. B) resultado da imagem após o preenchimento.

Para a obten o das medidas de forma mais rápida, foi escolhido o intervalo de tamanho de 300-*infinity* através do comando *Analyze* → *Analyze particles* para o software, automaticamente, identificar as testas dos foraminíferos presentes na imagem. Com isso,   gerada uma lista de resultados contendo o número de testas presentes na imagem e a medida de interesse selecionada anteriormente.

Para o resultado de cada imagem foi verificado o número de testas presentes para evitar contabiliza es erradas. Além disso, os resultados obtidos em formato .txt foram exportados para planilhas no Excel. No total, foram obtidas 15.771 medidas de  rea.

4.3 Modelo de idade

O modelo de idade aqui apresentado corresponde a uma versão revisada de Frozza *et al.* (2020), realizada por Savian *et al.* (submetido), com base em dez data es de radiocarbono por AMS ^{14}C (*Accelerator Mass Spectrometry*) mais a excursão geomagnética de Laschamp. Dadas as incertezas, quaisquer referências   idade mencionadas ao longo desta disserta o, correspondem a estimativas aproximadas.

4.4 Tratamento dos dados para análise dos tamanhos

Após a fase de obten o das medidas de área (μm^2), estas foram transformadas em logaritmo e, em seguida, para analisar a varia o do tamanho ao longo do tempo, foi realizada uma Análise de Componentes Principais (PCA) para

cada espécie utilizando os descritores de tamanho: 1º quartil, 3º quartil, média, mediana e percentil 95.

De modo geral, a PCA é realizada para extrair e criar novas variáveis ortogonais, chamadas de componentes principais (PC), que mostram semelhanças dentro do conjunto de dados da matriz (Abdi & Williams, 2010). No entanto, aqui usamos a PCA como uma alternativa de sintetizar a variação de toda a estrutura da população usando os descritores de tamanho. O número sintético do primeiro PC (PC1), gerado com o PCA, foi usado para correlacionar medidas de tamanho vs. parâmetros ambientais.

4.5 Parâmetros ambientais

Os parâmetros ambientais analisados foram temperatura superficial do mar (SST), produtividade, dissolução e fatores bióticos. Para realizar as estimativas de SST as abundâncias relativas de foraminíferos planctônicos de Suárez-Ibarra *et al.* (2020) foram utilizadas pela Técnica do Análogo Moderno (MAT, Hutson, 1980), com o auxílio do software PAST (versão 3.2; Hammer *et al.*, 2001). A calibração foi realizada usando os dados do Atlântico Sul do banco de dados *ForCenS* (Siccha & Kucera, 2017) e a SST média anual para a camada superior entre 0 e 75 m (SST_{0-75m}), extraído do *World Ocean Atlas 2013* (Locarnini *et al.*, 2013), utilizando o software *Ocean Data View* (Schlitzer, 2021).

Os *proxies* de produtividade utilizados foram a abundância relativa de *G. glutinata* (%) e a composição de isótopos estáveis de carbono em foraminíferos bentônicos do gênero *Uvigerina* ($\delta^{13}\text{C}_{Uvi}$), ambos apresentados anteriormente por Frozza *et al.* (2020). Em relação à dissolução, foi utilizado o teor de carbonato CaCO_3 (%) e a abundância de foraminíferos planctônicos por grama de sedimento (PF/g) gerados por Suárez-Ibarra *et al.* (2021).

Os fatores bióticos nesse estudo correspondem à diversidade e à riqueza de espécies. Ambos foram calculados usando o software de análise estatística PAST (versão 3.2., Hammer *et al.*, 2001). Utilizamos o índice de diversidade de Shannon (H), que corresponde a um índice de diversidade que leva em consideração o número de indivíduos (abundância), bem como o número de taxa (riqueza) para tentar entender se há alguma relação entre o tamanho das testas e da diversidade no conjunto.

4.6 Correlações

Com o objetivo de correlacionar as variáveis ambientais e os tamanhos, a correlação de *Spearman* foi realizada entre os valores de PC1 (a partir daqui denominado de tamanho_{PC1}) obtidos pela PCA. Sendo assim, foram testadas as correlações dos tamanhos_{PC1} com: 1) SST_{0-75m}; 2) *proxy* de produtividade da superfície do mar pela abundância relativa de *G. glutinata*; 3) *proxy* de produtividade de exportação de matéria orgânica para o fundo do mar inferida pelo isótopo de carbono estável de foraminíferos bentônicos do gênero *Uvigerina* ($\delta^{13}\text{C}_{Uvi}$); 4) *proxies* de dissolução (conteúdo de CaCO₃ e foraminíferos planctônicos por grama de sedimento seco (PF/g)); 5) indicadores bióticos (incluindo suas próprias abundâncias relativas, índice de diversidade de Shannon (H) e riqueza de espécies); e 6) correlação entre os próprios tamanhos_{PC1} das espécies.

5. Síntese dos resultados

5.1 Variações dos tamanhos ao longo dos últimos 43 mil anos

Os diferentes descritores de tamanho utilizados (1^o e 3^o quartis, média, mediana e percentil 95) não seguem as mesmas tendências, conforme exemplificado pelos dados de *G. inflata* representados na Figura 8. Na figura 8, os descritores de *G. ruber albus* e *G. inflata* exibem diferenças nas amplitudes de variação ao longo do tempo. Além disso, em intervalos como entre 42 – 38 ka de *G. inflata*, os descritores média, mediana e PC1 mostram uma tendência completamente oposta de P₉₅. Isso reforça a necessidade de uma metodologia padronizada que reflita com segurança as mudanças no tamanho da população ao longo do tempo. A análise, baseada nos tamanhos sintéticos obtidos por meio da PCA (tamanho_{PC1}), produz valores adimensionais, que podem ser considerados descritores mais confiáveis para identificar as mudanças de tamanho.

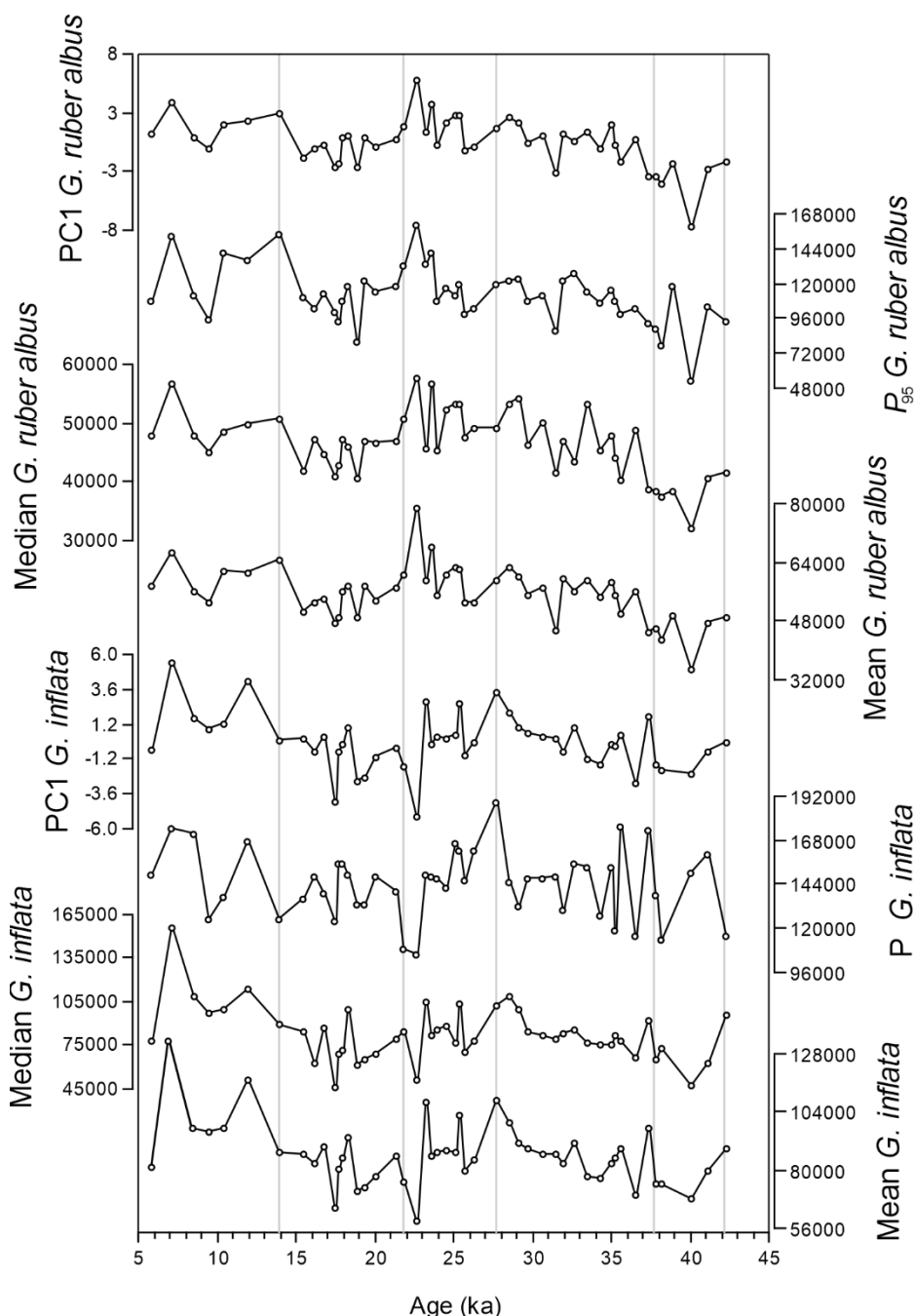


Figura 8. Comparação entre os descritores de tamanho de *G. inflata* e *G. ruber albus*. Os descritores apresentam divergências ao longo do intervalo analisado, como entre 42 – 38 ka. As linhas verticais em cinza marcam os intervalos com variações dos descritores.

Ao longo dos últimos 43 mil anos os tamanhos oscilaram de diferentes maneiras para cada uma das espécies. O tamanho de *G. ruber albus* exibe uma distribuição relativamente homogênea ao longo do registro, sem grandes intervalos de variação (Fig. 9A). Seu tamanho mínimo é observado em 40 ka o máximo em 23 ka. Partindo do tamanho mínimo em 40 ka, de modo geral, o tamanho mostra uma tendência positiva em direção ao presente. Entre 28 – 23 ka os tamanhos são relativamente maiores pontuados por algumas amostras de tamanho médio. Após

este intervalo, entre 22 - 15 ka os tamanhos diminuem e os intervalos de variação são menos significativos. Os tamanhos só aumentam novamente após 14 ka. Entre 14 - 10 ka, o tamanho de *G. ruber albus* permaneceu relativamente estável, mostrando um tamanho ligeiramente maior do que no intervalo anterior de tamanho reduzido (22 - 15 ka).

Dentre os táxons analisados, *G. ruber ruber* apresentou as maiores amplitudes de variação de tamanho ao longo do tempo (Fig. 9B). Os tamanhos mínimos mais notáveis foram identificados em 37, 32 e 17 ka e os valores máximos foram alcançados em 23, 18 e 7 ka. A curva de tamanho revela picos negativos e positivos para amostras consecutivas dentro do período glacial. Entre 15 – 5 ka, os tamanhos possuem uma aparente tendência de estabilidade, sem flutuações repentinas.

Os tamanhos mínimos mais notáveis para *N. incompta* podem ser observados em 40, 18 e 7 ka e o máximo próximo a 9 ka (Fig. 9C). A variação do tamanho de *N. incompta* pode ser dividida em três fases: a primeira entre 40 - 32 ka marcada por uma ampla faixa de variação de tamanho e aumento progressivo. A segunda, entre 32 - 18 ka, onde os tamanhos diminuem e permanecem relativamente estáveis, exceto por um curto intervalo com tamanhos maiores entre 25 - 21 ka. A última fase, em torno de 14 ka, mostra os maiores intervalos de tamanho e nenhuma tendência clara.

Para *G. inflata* os tamanhos mínimos são registrados em torno de 23 e 17 ka e os máximos em 28, 23, 13 e 7 ka (Fig. 9D). Iniciando com tamanhos relativamente menores entre 45 - 38 ka, *G. inflata* mostra uma tendência de aumento de tamanho entre 38 - 23 ka. Em torno dos 23 ka, há uma queda acentuada nos tamanhos (primeiro mínimo), seguida por uma recuperação e uma segunda (menos intensa), diminuição, próximo a 18 ka. A partir daí, os tamanhos aumentam atingindo os maiores valores observados ao longo de todo o intervalo de tempo.

Entre 45 – 36 ka, *G. bulloides* exibe os menores tamanhos durante o período glacial com dois mínimos em 38 e 36 ka (Fig. 9E). Esses mínimos são apenas maiores do que uma amostra do Holoceno (em 7 ka), que representa o tamanho mínimo observado ao longo do intervalo. Os mínimos glaciais são seguidos por uma tendência de aumento nos tamanhos a partir de 35 ka. A partir desse momento, os tamanhos se mantêm relativamente maiores e constantes, mas ainda com pequenas variações, até 12 ka. Em 12 ka, essa estabilidade é interrompida e os tamanhos começam a entrar em declínio atingindo seu mínimo em 7ka.

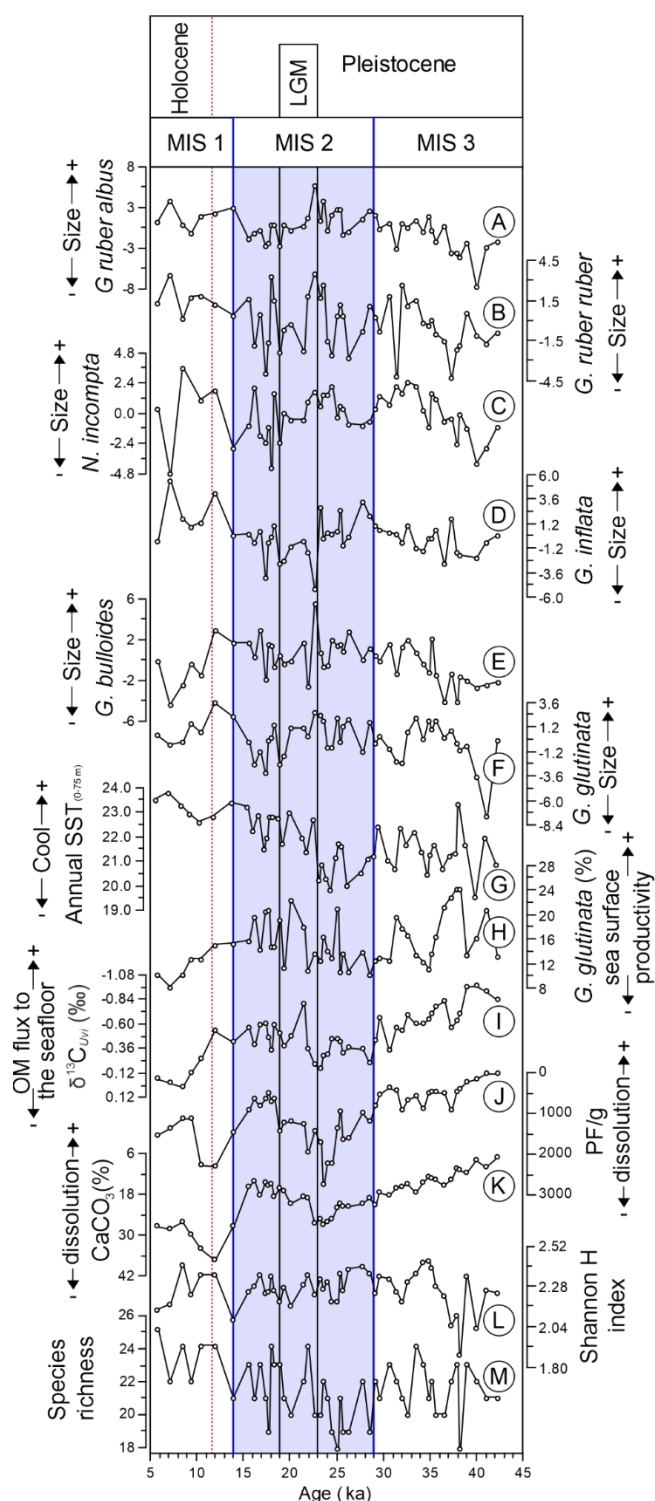


Figura 9. Comparação de tamanhos_{PC1} de táxons (A) *G. ruber albus*, (B) *G. ruber ruber*, (C) *N. incompta*, (D) *G. inflata*, (E) *G. bulloides* e (F) *G. glutinata* com as curvas de (G) variação de SST_{0-75m} (°C); (H) abundância relativa de *G. glutinata* (%) e (I) composição isotópica do carbono de *Uvigerina* spp. ($\delta^{13}C_{Uvi}$, em ‰, em relação ao padrão V-PDB) como indicadores de produtividade obtidos de Frozza *et al.* (2020); (J) foraminíferos planctônicos por grama de sedimento (PF/g) e (K) conteúdo de CaCO₃ como *proxies* de dissolução obtidos de Suárez-Ibarra *et al.* (2021); (L) diversidade representada pelo índice de Shannon e (M) riqueza de espécies como *proxies* bióticos ao longo dos últimos 43 kyr. Todos os dados pertencem ao testemunho SAT-048A. Os estágios de isótopos marinhos (MIS) são indicados por linhas verticais (MIS 2 em azul). As linhas verticais pretas dentro do MIS 2 indicam o Último Máximo Glacial (LGM) e a linha vertical pontilhada vermelha indica o início do Holoceno.

O tamanho mínimo de *G. glutinata* é observado em torno de 41 ka e o máximo próximo a 12 ka (Fig. 9F). Entre 41 - 36 ka, os tamanhos de *G. glutinata* apresentam um aumento significativo seguido de uma relativa estabilidade. Entre 36 - 16 ka, os tamanhos não mostram uma tendência clara ao longo do tempo e apenas mostram variações em suas amplitudes. Após valores relativamente baixos entre 19 - 18 ka, a situação muda e há um aumento de tamanho próximo a 11 ka, seguido de uma nova diminuição.

De modo geral, no intervalo correspondente ao MIS 3, todas as seis espécies possuem uma tendência de aumento progressivo de tamanho que começa a diminuir no final de MIS 3 ou, logo após, no início de MIS 2 (Fig. 9). Exceto para *G. inflata*, as espécies restantes apresentam mínimos durante o MIS 3. Metade das espécies (*G. ruber albus*, *G. ruber ruber* e *G. bulloides*) mostram seus tamanhos máximos durante o MIS 2. No início do LGM, todas as espécies apresentaram picos nos tamanhos, mas que foram seguidos por uma queda. Posteriormente, eles mostram uma tendência progressiva de aumento durante o MIS 1. No início do Holoceno, os tamanhos mostram uma redução.

Em aproximadamente 7 ka, *N. incompta* e *G. bulloides* exibem tamanhos mínimos que coincidem com um tamanho máximo para *G. inflata* e tamanhos maiores para *G. ruber ruber*. Além disso, os tamanhos máximos de *G. bulloides* logo após o início do LGM, em torno de 23 ka, coincidem com um dos tamanhos mínimos observados para *G. inflata*.

5.2 Estimativas de paleotemperaturas (SST_{0-75m})

A curva de SST_{0-75m} na figura 9G obtida através da MAT para a faixa de profundidade de 0 – 75 m mostra um mínimo de $\sim 19,5^{\circ}\text{C}$ em torno de 40 ka e um máximo de $\sim 24^{\circ}\text{C}$ em 7 ka. Entre 43 - 29 ka (MIS 3), a curva indica uma tendência de aquecimento fortemente variável, mas geral. No limite MIS 3/MIS 2 (29 ka), esse padrão muda e as temperaturas diminuem até um segundo mínimo ($\sim 19,5^{\circ}\text{C}$) antes do início do LGM. A partir de então, há uma tendência geral de aquecimento com valores mais variáveis ao longo do degelo e valores mais estáveis durante MIS 1.

5.3 Parâmetros bióticos

O índice de Shannon (H) (Fig. 9L) mostra um mínimo de 1,9 em 38 ka e um máximo de 2,4 em 35 ka e 8 ka. A diversidade apresenta ampla variação durante o MIS 3, variando de 1,9 a 2,4. A partir do mínimo de 1,9 em 38 ka, a diversidade mostra uma tendência positiva até 35 ka e depois disso diminui, mas se mantém acima de 2,1. Entre 29 - 26 ka a diversidade se mantém alta (entre 2,2 - 2,4). Em 25 ka, os valores de H começam a diminuir lentamente até 14 ka. A partir de 14 ka a diversidade aumenta novamente e permanece em torno de 2,3 após o início do Holoceno, atingindo um máximo em ~ 8 ka.

A riqueza de espécies (Fig. 9M) também mostra uma grande variação ao longo do tempo, especialmente durante o MIS 3 e o MIS 2. O valor mínimo para a riqueza de espécies foi 18 e o máximo foi 25. Entre 43 - 29 ka, mostra uma tendência decrescente, apesar de alguns picos como em torno de 34 ka que mostra uma riqueza de 24. A partir de 29 ka esta tendência decrescente torna-se mais evidente e entre o início do MIS 2 (29 ka) e o início do LGM (23 ka) a riqueza permanece baixa, com um mínimo de 18 e não superior a 22. Após esse intervalo, em ~ 22 ka, a riqueza atinge o pico em 24, mas depois diminui e sobe em torno de ~19 ka. A partir de 14 ka, a riqueza mostra uma tendência de aumento progressivo e em ~5 ka atinge seu valor máximo.

A abundância relativa de *G. ruber* foi descrita por Frozza *et al.* (2020), no entanto, esse trabalho não diferencia as duas subespécies (*G. ruber albus* e *G. ruber ruber*). A curva de *G. ruber albus* é mais homogênea e estável entre 40 - 23 ka (Fig. 10A e B). A partir de 23 ka, próximo ao início do LGM, uma tendência de aumento na abundância começa e permanece alta pelo restante do intervalo.

A curva de abundância relativa de *G. ruber ruber* (Fig. 10C e D) exibe uma faixa de variação maior em comparação com a de *G. ruber albus* entre 40 - 16 ka. Além disso, neste intervalo, há uma relativa tendência de aumento. Por volta de 16 ka, a abundância relativa aumenta consideravelmente e, a partir daí, permanece mais elevada do que no intervalo anterior, porém, com uma ligeira tendência de diminuição ao longo do Holoceno.

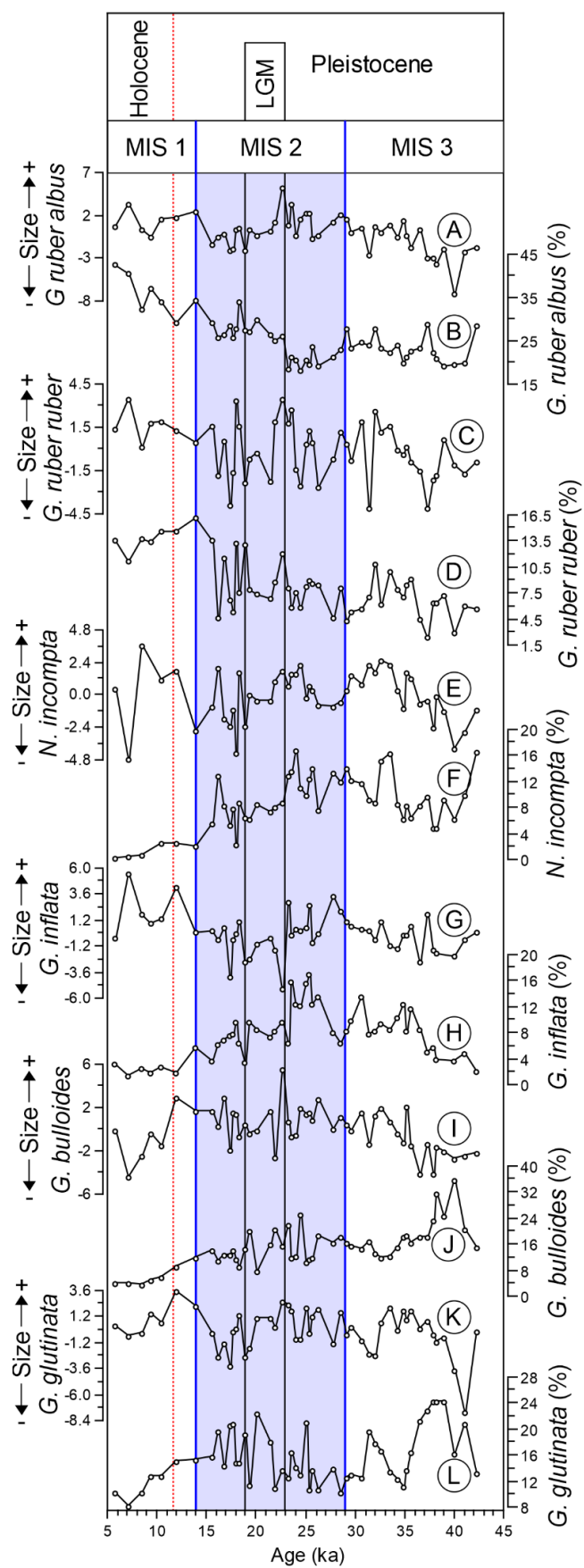


Figura 10. Comparação entres os tamanhos_{PC1} e as abundâncias relativas (%) para cada táxon. A) e B) *G. ruber albus*; C) e D) *G. ruber ruber*, E) e F) *N. incompta*; G) e H) *G. inflata*; I) e J) *G. bulloides*; K) e I) *G. glutinata*.

5.4 Correlações de Spearman

Os resultados da correlação de *Spearman* são apresentados nas tabelas 2 e 3. Na tabela 2 são apresentadas as correlações dos tamanhos_{PC1} com as variáveis e na tabela 3 as correlações dos tamanhos_{PC1} entre as espécies. As correlações consideradas significativas foram aquelas com $p < 0,05$. As correlações significativas com valores entre 0 - 0,33 foram consideradas como correlação fraca (ou baixa), entre 0,34 - 0,66 como moderada e $> 0,66$ como forte (ou alta). Todas as correlações significativas foram positivas, exceto aquelas entre tamanho_{PC1} e abundância relativa de *G. glutinata*.

Tabela 2. Correlação de *Spearman* entre os tamanhos_{PC1} dos táxons e os proxies utilizados. Correlações significativas possuem $p < 0,05$.

	Abundância relativas da espécie (%)	SST ₀₋₇₅ m Média Anual	<i>G.</i> <i>glutinata</i> (%)	$\delta^{13}\text{C}_{\text{Uvi}}$	CaCO ₃ (%)	PF/g	Riqueza de espécies	Índice de Shannon (H)
<i>G. ruber</i> <i>albus</i>	0.079	0.056	-0.506	0.537	0.69	0.563	0.038	0.257
	0.59	0.705	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.794	0.075
<i>G. ruber</i> <i>ruber</i>	0.533	0.36	-0.449	0.477	0.468	0.298	0.334	0.188
	0.815	0.011	0.001	0.001	0.001	0.037	0.019	0.196
<i>G.</i> <i>bulloides</i>	-0.145	0.095	-0.083	0.188	0.319	0.322	-0.172	0.212
	0.32	0.515	0.571	0.195	0.026	0.024	0.238	0.144
<i>G. inflata</i>	-0.135	0.012	-0.352	0.327	0.432	0.215	0.109	0.307
	0.362	0.935	0.014	0.023	0.002	0.142	0.459	0.034
<i>N.</i> <i>incompta</i>	0.363	-0.104	-0.258	0.309	0.225	0.186	0.199	0.292
	0.011	0.481	0.077	0.033	0.124	0.206	0.175	0.044
<i>G.</i> <i>glutinata</i>	-0.214	0.02		0.191	0.43	0.394	-0.078	0.229
	0.14	0.891		0.189	0.002	0.005	0.594	0.114

Para *G. ruber albus*, o tamanho foi significativamente correlacionado aos proxies de produtividade (*G. glutinata* (%) e $\delta^{13}\text{C}_{\text{Uvi}}$, Tab. 2) e de dissolução (CaCO₃ (%) e PF/g). Entre eles, as correlações variaram de moderadas a altas. CaCO₃ (%) apresentou a maior correlação com *G. ruber albus* ($r = 0,690$) e a mais baixa para *G. glutinata* ($r = 0,506$).

As correlações significativas para *G. ruber ruber* variaram de baixas a moderadas. A maior correlação significativa com o tamanho foi produtividade ($\delta^{13}\text{C}_{\text{Uvi}}$, $r = 0,477$) e a mais fraca com a dissolução (PF/g, $r = 0,298$).

O tamanho de *G. bulloides* apresentou apenas correlações significativas baixas, sendo estas com os proxies de dissolução (CaCO₃, $r = 0,319$ e PF/g, $r = 0,322$).

Tabela 3. Correlação de Spearman entre os tamanhos_{PC1} dos táxons.

	<i>G. ruber albus</i>	<i>G. ruber ruber</i>	<i>G. bulloides</i>	<i>G. inflata</i>	<i>N. incompta</i>	<i>G. glutinata</i>
<i>G. ruber albus</i>		0.001	0.015	0.009	0.039	0.001
<i>G. ruber ruber</i>	0.633		0.159	0.055	0.007	0.01
<i>G. bulloides</i>	0.346	0.204		0.26	0.304	0.018
<i>G. inflata</i>	0.373	0.278	0.166		0.33	0.107
<i>N. incompta</i>	0.299	0.387	0.152	0.144		0.403
<i>G. glutinata</i>	0.448	0.367	0.336	0.235	0.124	

Para *G. inflata*, as correlações significativas variaram de baixas (positivas para o índice de Shannon, $\delta^{13}\text{C}_{Uvi}$) a moderadas (negativas para abundância relativa *G. glutinata* e positivas para CaCO_3). A maior correlação foi com o proxy de dissolução (CaCO_3 , $r = 0,432$) e a menor com (H) ($r = 0,307$).

As correlações significativas para *N. incompta* variaram de baixas a moderadas, sendo estas com parâmetros bióticos (abundância relativa e H) e produtividade ($\delta^{13}\text{C}_{Uvi}$). A maior correlação ($r = 0,363$) foi com a abundância relativa e a menor ($r = 0,292$) com o H.

Para *G. glutinata* as correlações significativas foram moderadas, sendo estas apenas com os parâmetros de dissolução. CaCO_3 (%) apresentou a maior correlação ($r = 0,430$) e PF/g a menor ($r = 0,394$).

6. Discussões

6.1 Efeito da temperatura

Ao comparar as mudanças de tamanho com as estimativas de $\text{SST}_{0-75\text{m}}$, exceto por *G. ruber ruber*, os menores tamanhos coincidem com as temperaturas mais baixas (19,5°C, em torno de 40 ka). Para algumas espécies como, *G. ruber albus*, *N. incompta* e *G. glutinata*, este momento coincide com seus tamanhos mínimos. O aumento progressivo (mas variável) da $\text{SST}_{0-75\text{m}}$ entre 40-29 ka parece coincidir, com um aumento também progressivo nos tamanhos das espécies (novamente, exceto para *G. ruber ruber*, que inicia esta tendência 3 mil anos depois). A resposta dos tamanhos de *G. ruber albus* às variações da $\text{SST}_{0-75\text{m}}$ pode ser explicada pela preferência da espécie por águas subtropicais, apesar de sua alta adaptação às diferentes condições ambientais (Bijma *et al.*, 1990; Kemle-von Mücke

& Hemleben, 1999; Schiebel & Hemleben, 2017). Portanto, essas condições não corresponderiam à faixa térmica ótima para *G. ruber albus*, que acabou exibindo tamanhos menores.

Em relação a *N. incompta*, uma espécie abundante em águas subpolares (Schiebel *et al.*, 2001), seu tamanho deveria ser maior (ou não afetado) em temperaturas mais baixas, no entanto, como o tamanho não responde apenas a uma variável ambiental, outros parâmetros como, por exemplo, a produtividade precisam ser levados em consideração para o estabelecimento das suas condições ideais. Além disso, Kuroyanagi & Kawahata (2004) observaram, no Mar do Japão, que *N. incompta* apresentou maiores abundâncias em águas mais rasas e quentes com altas concentrações de clorofila – a.

No caso de *G. glutinata*, a espécie é mais abundante em águas subtropicais a temperadas e é controlada principalmente pela produtividade e, por isso, a temperatura por si só não é suficiente para explicar suas variações de tamanho (Bijma *et al.*, 1992; Naidu & Malmgren, 1995; Lessa *et al.*, 2014).

Durante o MIS 2, *G. ruber ruber*, *N. incompta* e *G. inflata* apresentam uma tendência geral de diminuição dos tamanhos, enquanto para *G. bulloides*, o tamanho permanece relativamente em estabilidade. Próximo a 23 ka, as estimativas de SST_{0-75m} indicam o início de uma tendência de aquecimento (até 22,5°C), que coincide com o tamanho máximo para *G. ruber albus*, *G. ruber ruber*, *G. bulloides*, e o tamanho mínimo para *G. inflata*. No caso de *G. ruber ruber*, considerada uma espécie típica de verão e tolerante a altas temperaturas (Bé & Hamlin, 1967; Kemlevon Mücke & hemleben, 1999), o aumento do tamanho com o aumento da SST_{0-75m} pode estar associado a preferências desta subespécie por águas tropicais (Kemlevon-Mücke e Hemleben, 1999; Schiebel e Hemleben, 2017).

Esse mínimo no tamanho de *G. inflata*, mencionado anteriormente, condiz com sua preferência por águas de transição e subtropicais (Boltovskoy *et al.*, 1996; Schiebel & Hemleben, 2017). Contudo, nossas estimativas de SST_{0-75m} podem não ser suficientes para explicar esta variação, uma vez que esta espécie é encontrada em maiores profundidades de calcificação (Bé *et al.*, 1977; Groeneveld & Chiessi, 2011; Schiebel & Hemleben, 2017).

Ao longo do MIS 1, uma tendência crescente de tamanho é observada para *G. inflata*, que exibe seu maior tamanho coincidindo com o maior valor estimado de SST_{0-75m}. Uma tendência oposta é exibida por *G. bulloides* e *G. glutinata*, que respondem ao aumento SST_{0-75m} com uma diminuição progressiva no tamanho

durante MIS 1. Conforme observado para *G. inflata* e *G. glutinata*, a temperatura em si não seria suficiente para explicar a variação de tamanho de *G. bulloides*, uma vez que esta espécie é controlada principalmente pelas condições hidrológicas e disponibilidade de alimento, portanto, principalmente associada às condições de produtividade (Naidu & Malmgren, 1995; Conan & Brummer, 2000; Darling *et al.*, 2017; Schiebel *et al.*, 2001; Taylor *et al.*, 2018).

Levando em consideração as tendências já descritas e a relação entre tamanho e temperatura previamente documentada na literatura (Deuser *et al.*, 1981; Schmidt *et al.*, 2004a; Lombard *et al.*, 2009; Davis *et al.*, 2013), era esperado que as mudanças de tamanho estivessem significativamente correlacionadas com as variações de SST_{0-75m}, mas apenas *G. ruber ruber* mostrou uma correlação significativa (0,360). Rillo *et al.* (2020) não encontraram nenhuma relação significativa entre *G. ruber* e SST. Isso pode ser uma consequência do tratamento de *G. ruber* como uma única espécie e, portanto, a não correlação (aqui mostrada) de *G. ruber albus* pode mascarar o sinal individual de *G. ruber ruber*.

Além disso, alguns dos estudos lidam com variações de tamanho, considerando associações inteiras em vez de espécies individuais (Deuser *et al.*, 1981; Schmidt *et al.*, 2004b; Lombard *et al.*, 2009; Davis *et al.*, 2013; Todd *et al.*, 2020). Por exemplo, Schmidt *et al.* (2004a, b) reconheceram a tendência quase linear no tamanho das testas aumentando com a temperatura, exceto onde as frentes oceânicas e a ressurgência levam a condições mais estressantes e produtivas. Considerando a redução no tamanho das espécies tipicamente representativas de cada província biogeográfica de tropical a polar, a análise das mudanças de tamanho para assembleias inteiras ao longo do tempo pode realmente refletir nada além de mudanças nas proporções das espécies relacionadas às mudanças latitudinais na extensão das províncias biogeográficas.

Além disso, é preciso levar em consideração as escalas consideradas em cada estudo. Schmidt *et al.* (2004b) analisaram assembleias de todas as bioprovíncias, observando, assim, mudanças de tamanho relacionadas a toda a amplitude de variação da SST moderna. Em contraste, nosso estudo se concentra nas variações de tamanho ao longo do tempo em um único local. Portanto, mesmo sob uma grande variedade de condições climáticas, como aquelas ocorridas no final do Quaternário, a amplitude de variação da SST teria sido comparativamente restrita.

A combinação de pequenas mudanças nas estimativas de SST com um erro esperado do método de cerca de 1°C (Malmgren *et al.*, 2001) pode de fato mascarar qualquer relação entre tamanho e SST. Além disso, nossas estimativas de SST podem ter sido influenciadas pela dissolução seletiva dos foraminíferos planctônicos. Conforme documentado por Petró *et al.* (2021) e (Suárez-Ibarra *et al.*, 2021), amostras da Bacia de Pelotas do final do Quaternário documentam pulsos de dissolução que foram associados ao aumento da produtividade por Suárez-Ibarra *et al.* (submetido) durante os períodos glaciais, principalmente entre 40 e 14 ka, como resultado da maior contribuição da pluma do Rio da Prata para o norte, a maior exportação de ácido silícico transportado pela Água Central do Atlântico Sul (SACW) e ventos mais fortes intensificando os pulsos de ressurgência (Gu *et al.*, 2017; Pereira *et al.*, 2018; Portilho-Ramos, *et al.*, 2019). Portanto, não podemos rejeitar totalmente a influência de SST_{0-75m} nos tamanhos dos táxons estudados.

6.2 Efeito da produtividade

Para comparar a variação de tamanho das espécies com a paleoprodutividade (Pereira *et al.*, 2018), foi utilizado o registro de abundância relativa de *G. glutinata* fornecido por Suárez-Ibarra *et al.* (2020). De modo geral, quando a abundância relativa de *G. glutinata* é baixa (sugerindo baixa produtividade), os tamanhos das testas são maiores para todos os táxons analisados, exceto para *G. bulloides*. Esse padrão pode ser facilmente percebido no final do LGM (~19 ka). A análise de correlação de Spearman mostra que a abundância relativa de *G. glutinata* está negativamente correlacionada com os tamanhos de todas as espécies analisadas, no entanto, essa correlação só é significativa para *G. ruber albus*, *G. ruber ruber* e *G. inflata*. Além disso, a correlação mais alta foi com *G. ruber albus*.

Os tamanhos_{PC1} também foram comparados com o registro de isótopos estáveis de carbono bentônico ($\delta^{13}\text{C}_{Uvi}$), que está relacionado à produtividade e exportação de matéria orgânica para o fundo do mar, onde valores mais baixos são interpretados como maior produtividade e maior exportação de matéria orgânica rica em ^{12}C para o fundo do mar (Wefer *et al.*, 1999 Ravelo & Hillaire-Marcel, 2007). Embora os registros bentônicos de $\delta^{13}\text{C}$ tenham sido usados para reconstruir a geometria das massas d'água profundas (por exemplo, Curry & Oppo, 2005), em nossa região, o sinal de $\delta^{13}\text{C}$ está fortemente ligado a mudanças anteriores de

produtividade da superfície do mar (Toledo *et al.*, 2007; Dias *et al.*, 2018; Rodrigues *et al.*, 2018). As correlações de *Spearman* entre $\delta^{13}\text{C}_{\text{UVI}}$ e os tamanhos_{PC1} foram positivas e $\geq 0,3$ para todas as espécies, exceto *G. bulloides* e *G. glutinata*, que não apresentaram correlações significativas. Do mesmo modo como ocorre a correlação entre tamanho_{PC1} e *G. glutinata* (%), *G. ruber ruber* e *G. ruber albus* mostram as correlações mais altas.

Ao contrário da SST, os tamanhos_{PC1} de todos os táxons analisados, exceto *G. bulloides* e *G. glutinata*, mostraram correlação significativa com indicadores de produtividade. Em épocas de maior produtividade, as espécies portadoras de simbiontes (*G. ruber albus* e *G. ruber ruber*) mostram uma diminuição no tamanho. Essa diminuição pode estar associada à necessidade de luz para realizar atividades metabólicas (Bijma *et al.*, 1990; Kemle-von Mücke & Hemleben, 1999). Portanto, a atenuação da luz pelo aumento da quantidade de matéria em suspensão acaba inibindo a atividade fotossintetizante que, por sua vez, provoca uma diminuição na taxa respiratória do hospedeiro, resultando em testas menores (Bijma *et al.*, 1992). Isso significa que, apesar da maior disponibilidade de nutrientes durante o período glacial causado pela intensificação dos mecanismos de ressurgência e pela presença contínua das águas da pluma do Rio da Prata (Pereira *et al.*, 2018; Portilho-Ramos *et al.*, 2019; Frozza *et al.*, 2020), *G. ruber albus* e *G. ruber ruber*, não responderam com tamanhos maiores devido à inibição da atividade fotossintetizante. Portanto, em condições mais produtivas, as espécies portadoras de simbiontes como *G. ruber* mostram uma tendência de diminuir o tamanho das testas.

Durante os eventos de ressurgência, as espécies oportunistas se adaptam melhor, atingindo suas maiores abundâncias relativas (Chiessi *et al.*, 2007; Souto *et al.*, 2011; Lessa *et al.*, 2014). Abundâncias relativas elevadas foram interpretadas como ótimos ecológicos (Weinkauff *et al.*, 2013), onde grandes tamanhos seriam esperados (Schmidt *et al.*, 2004b; Moller *et al.*, 2013). No entanto, as espécies oportunistas se desenvolvem rapidamente, mas não necessariamente atingem tamanhos maiores. Isso explica por que *G. bulloides* e *G. glutinata*, ambas espécies sem simbiontes, cuja abundância é controlada pela disponibilidade de alimento, não apresentam correlação entre seu próprio tamanho e produtividade.

Em condições de ressurgência, considerando que uma maior entrada de nutrientes resulta em aumento da produtividade primária local e que durante esses episódios também se observa uma diminuição da SST, a abundância relativa da

espécie dominante *G. ruber* também diminui devido às temperaturas mais baixas. No entanto, em nosso caso, a diminuição da SST não é drástica e, portanto, em termos de riqueza de espécies, não há alteração significativa entre as condições oligotróficas e eutróficas. Em vez disso, há uma mudança na espécie dominante. Assim, essas mudanças também não refletem significativamente na diversidade e, por isso, podemos explicar, em parte, a falta de correlações entre parâmetros bióticos e tamanhos. A relação entre produtividade, temperatura e tamanho, conforme já demonstrado por Rillo *et al.* (2020), não é suficiente para explicar a variação de tamanho entre as diferentes espécies.

Associada à produtividade, a dissolução de fundo deve ser levada em consideração. Como visto na seção 5.4, os tamanhos possuem as maiores correlações com os indicadores de dissolução, exceto *N. incompta*, que é considerada a espécie mais resistente à dissolução de acordo com o ranking definido por Petró *et al.* (2018). Quando a produtividade é maior, as correlações mostram maior dissolução e menores tamanhos. Isso levanta a questão do que exatamente controla as alterações de tamanho em nossa área de estudo: i) é um sinal paleoecológico (nesse caso, a produtividade) relacionado às condições ambientais da superfície do mar que controlam o tamanho máximo que as testas podem desenvolver; ii) ou são tamanhos significativamente influenciados por danos tafonômicos causados pela dissolução no fundo do mar. Esta questão é difícil de responder, especialmente considerando as evidências fornecidas por Suárez-Ibarra *et al.*, (submetido) de dissolução significativa neste local específico da Bacia de Pelotas desencadeadas pelo aumento da produtividade.

O fato de *N. incompta* corresponder à espécie mais resistente à dissolução para o Atlântico Sul ocidental (Petró *et al.*, 2018), além de correlação significativa entre seus *proxies* de tamanho e dissolução, corrobora com a ideia de que a dissolução modificou o tamanho das outras espécies. No entanto, também de acordo com a classificação de Petró *et al.* (2018), nenhuma das espécies analisadas é particularmente suscetível à dissolução: *G. bulloides* e *G. ruber albus* têm baixa solubilidade, enquanto *G. inflata*, *G. ruber ruber* e *G. glutinata* têm solubilidade moderada. Assim, com taxas com solubilidade baixas a moderadas, poderíamos esperar um sinal ecológico em vez de um sinal tafonômico relacionado à preservação das testas em nossos dados. Apesar de ser uma espécie com resistência à dissolução, durante a fase de aquisição das fotos das testas, foi possível observar, especialmente em *G. ruber ruber*, algumas marcas deixadas pela

perda da última câmara, que é mais fina e frágil, restando apenas cicatrizes onde seriam as suturas (Fig. 11). A perda da câmara final em *G. ruber* pode ser favorecida pelas aberturas secundárias que reduzem sua superfície de contato entre as câmaras, diminuindo assim sua resistência. Para esta questão, recomendamos estudos futuros que buscam esclarecer e quantificar como e quanto de dissolução teria afetado as testas através de análises detalhadas da superfície das testas e cicatrizes deixadas nelas pela perda de câmaras.

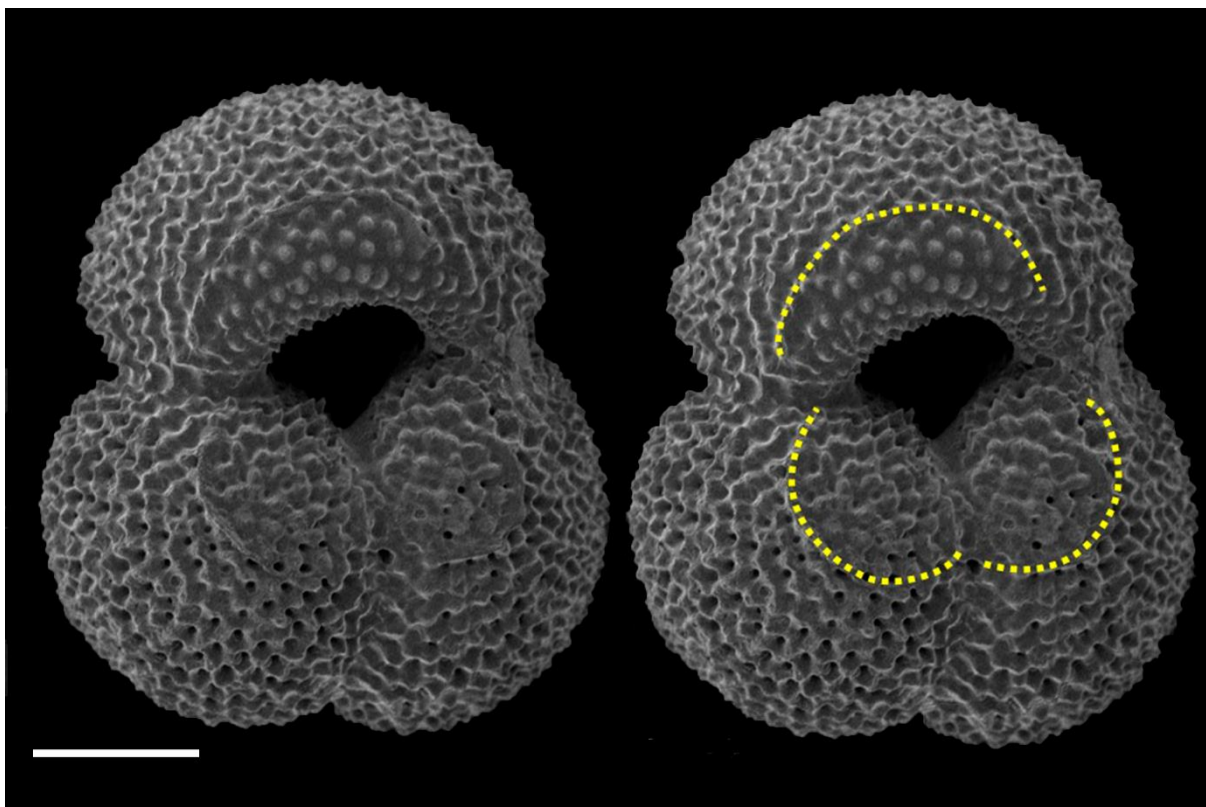


Figura 11. Imagem MEV de uma testa de *G. ruber* do testemunho SAT-048 exibindo cicatrizes no local onde teria a sutura da última câmara. Barra de escala: 100 μ m.

7. Conclusões

Como esperado, considerando que cada táxon tem suas preferências ambientais (Schmidt *et al.*, 2004a,b; Moller *et al.*, 2013) e responde de forma diferente aos diferentes estímulos ambientais, cada táxon apresentou uma curva de variação de tamanho distinta ao longo dos últimos 43 mil anos na Bacia de Pelotas.

A variação de tamanho das espécies analisadas individualmente não apresentou correlação com as paleotemperaturas como normalmente é identificado em outros estudos, mas sim com as condições de produtividade e consequentemente, a dissolução. Sobre essas condições, os tamanhos não podem

ser utilizados fielmente para representar as condições de produtividade da superfície pois é possível que tenham sido afetados pela dissolução local, mesmo se tratando de espécies resistentes como demonstrado no ranking de Petró *et al.* (2018). É possível que, se as análises de tamanho tivessem sido realizadas para assembleias inteiras, elas poderiam apontar correlação com a SST.

A questão da dissolução não deve ser descartada visto que se trata de uma região altamente produtiva e, portanto, possui períodos com maior índice de dissolução (principalmente durante os períodos glaciais) como demonstrado por Suárez-Ibarra *et al.* (submetido) e Petró *et al.* (2021). Dessa forma, dadas as altas taxas de dissolução, não podemos descartar completamente a relação entre SST e tamanhos de testas, uma vez que as estimativas de SST obtidas pela técnica MAT podem ter sido afetadas pela dissolução seletiva de espécies. Para confirmar a falta de correlação significativa entre tamanho e temperatura, outro *proxy* de SST não afetado pela dissolução de carbonato de cálcio, como as alquenonas, pode ser usado.

Também vimos que, em nosso caso, os parâmetros bióticos de ótimo ambiental, não são claramente correlacionáveis com os tamanhos, visto que, entre condições mais e menos produtivas, não há grandes alterações em termos de proporções de espécies, mas apenas uma mudança quanto às espécies dominantes. Em condições eutróficas as assembleias são dominadas por *G. bulloides* e, em condições oligotróficas, são dominadas por *G. ruber*.

Este trabalho contribuiu para um melhor entendimento de ambientes com flutuações de produtividade e mostrou como é necessário levar em consideração outros parâmetros ambientais que podem afetar as interpretações das variações de tamanho de foraminíferos planctônicos ao longo do tempo.

8. Referências bibliográficas

- Abdi, H.; Williams, L. J. 2010. Principal component analysis. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 2(4): 433–459.
- Abràmoff, M. D., Magalhães, P. J. & Ram, S. J. 2004. Image processing with ImageJ Part II. *Biophotonics International*, 11(7): 36–43.
- Abramovich, S., Yovel-Corem, S., Almogi-Labin, A. & Benjamini, C. 2010. Global climate change and planktic foraminiferal response in the Maastrichtian. *Paleoceanography*, 25(2): 1–15.
- Abramovich, S. & Keller, G. 2002. High stress late Maastrichtian paleoenvironment: Inference from planktonic foraminifera in Tunisia. *Palaeogeography*,

Palaeoclimatology, Palaeoecology, 178(3/4): 145–164.

Abramovich, S. & Keller, G. 2003. Planktonic foraminiferal response to the latest Maastrichtian abrupt warm event: A case study from South Atlantic DSDP Site 525A. *Marine Micropaleontology*, 48(3/4): 225–249.

Alegret, L., Ortiz, S., Arenillas, I. & Molina, E. 2010. What happens when the ocean is overheated? The foraminiferal response across the Paleocene-Eocene Thermal Maximum at the Alamedilla section (Spain). *Bulletin of the Geological Society of America*, 122(9–10): 1616–1624.

Aniya, M. 2013. Holocene glaciations of Hielo Patagónico (Patagonia Icefield), South America: A brief review. *Geochemical Journal*, 47(2): 97–105.

Barboza, E. G., Rosa, M. L. C. C. & Ayup-Zouain, R. N. 2008. Cronoestratigrafia da Bacia de Pelotas: uma revisão das seqüências deposicionais. *Gravel*, 6(1): 125–138.

Bé, A. W. H. 1968. Shell Porosity of Recent Planktonic Foraminifera as a Climatic Index. *Science*, 161(3844): 881–884.

Bé, 1967. Foraminifera families: Globigerinidae and Globorotaliidae. Conseil Permanent International pour l'exploration de la mer. *Zooplankton Sheet*, 108: 1–9.

Bé, A.W.H., Hemleben, C., Anderson, O.R., Spindler, M., Hacunda, J., & Tuntivate-Choy, S. 1977. Laboratory and Field Observations of Living Planktonic Foraminifera. *Micropaleontology*, 23(2): 155–179.

Bé, A.W.H. & Hamlin, W. H. 1967. Ecology of Recent planktonic foraminifera. *Micropaleontology*, 13(1): 87–106.

Bijma, J., Hemleben, C., Oberhaensli, H. & Spindler, M. 1992. The effects of increased water fertility on tropical spinose planktonic foraminifera in laboratory cultures. *The Journal of Foraminiferal Research*, 22(3): 242–256.

Bijma, J., Faber, W. W. & Hemleben, C. 1990. Temperature and salinity limits for growth and survival of some planktonic foraminifera in laboratory cultures. *The Journal of Foraminiferal Research*, 20(2): 95–116.

Birch, H. S., Coxall, H. K. & Pearson, P. N. 2012. Evolutionary ecology of Early Paleocene planktonic foraminifera: size, depth habitat and symbiosis. *Paleobiology*, 38(3): 374–390.

Bolli, H.M. & Saunders, J.B. 1989. Oligocene to Holocene low latitude planktic foraminifera. In: Bolli, Hans M., Saunders, J. B. & Perch-Nielsen, K. (Ed.). *Plankton Stratigraphy*. Cambridge University Press, p. 155–179.

Boltovskoy, E. 1973. Daily vertical migration and absolute abundance of living planktonic foraminifera. *The Journal of Foraminiferal Research*, 3(2): 89–94.

Boltovskoy, E., Boltovskoy, D., Correa, N. & Brandini, F. 1996. Planktic foraminifera from the southwestern Atlantic (30°–60°S): Species-specific patterns in the upper 50 m. *Marine Micropaleontology*, 28(1): 53–72.

Brandini, F., Boltovskoy, D., Piola, A., Kocmur, S., Röttgers, R., Abreu, P. C. & Lopes, R. M. 2000. Multiannual trends in fronts and distribution of nutrients and chlorophyll in the southwestern Atlantic (30–62°S). *Deep Sea Research Part I:*

Oceanographic Research Papers, 47(6): 1015–1033.

Brombacher, A. Elder, L. E., Hull, P. M., Wilson, P. A. & Ezard, T.H.G. 2018. Calibration of test diameter and area as proxies for body size in the planktonic foraminifer *globoconella puncticulata*. *Journal of Foraminiferal Research*, 48(3): 241–245.

Brombacher, A., Wilson, P.A.; & Ezard, T.H.G. 2017. Calibration of the repeatability of foraminiferal test size and shape measures with recommendations for future use. *Marine Micropaleontology*, 133: 21–27.

Bueno, G.V, Zacharias, A.A, Oreiro, S.G, Cupertino, J.A, Falkenhein, F.U.H & Neto, M.A. 2007. Bacia de Pelotas. *Boletim de Geociencias da Petrobras*, 15(2):Rio de Janeiro, p. 551–559.

Chiessi, C. M, Ulrich, S., Mulitza, S., Pätzold, J. & Wefer, G. 2007. Signature of the Brazil-Malvinas Confluence (Argentine Basin) in the isotopic composition of planktonic foraminifera from surface sediments. *Marine Micropaleontology*, 64(1–2): 52–66.

Conan, S. M. H. & Brummer, G. J. A. 2000. Fluxes of planktic foraminifera in response to monsoonal upwelling on the Somalia Basin margin. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 47(9/11): 2207–2227.

Conan, S.M.H., Ivanova, E. M. & Brummer, G. J.A. 2002. Quantifying carbonate dissolution and calibration of foraminiferal dissolution indices in the Somali Basin. *Marine Geology*, 182(3/4): 325–349.

Constandache, M., Yerly, F. & Spezzaferri, S. 2013. Internal pore measurements on macroperforate planktonic Foraminifera as an alternative morphometric approach. *Swiss Journal of Geosciences*, 106: 179–186.

Curry, W. B. & Oppo, D. W. 2005. Glacial water mass geometry and the distribution of $\delta^{13}\text{C}$ of ΣCO_2 in the western Atlantic Ocean. *Paleoceanography*, 20(1): 1–12.

Darling, K. F., Wade, C. M., Siccha, M., Trommer, G., Schulz, H., Abdolalipour, S. & Kurasawa, A. 2017. Genetic diversity and ecology of the planktonic foraminifers *Globigerina bulloides*, *Turborotalita quinqueloba* and *Neogloboquadrina pachyderma* off the Oman margin during the late SW Monsoon. *Marine Micropaleontology*, 137: 64–77.

Davis, C. V., Badger, M. P. S., Bown, P. R. & Schmidt, D. N. 2013. 2013. The response of calcifying plankton to climate change in the Pliocene. *Biogeosciences*, 10(9): 6131–6139.

Deuser, W. G., Ross, E. H., Hemleben, C. & Spindler, M. 1981. Seasonal changes in species composition, numbers, mass, size, and isotopic composition of planktonic foraminifera settling into the deep sargasso sea. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 33(1–3): 103–127.

Dias, B. B., Barbosa, C. F., Faria, G. R., Seoane, J. C. S. & Albuquerque, A. L. S. 2018. The effects of multidecadal-scale phytodetritus disturbances on the benthic foraminiferal community of a Western Boundary Upwelling System, Brazil. *Marine Micropaleontology*, 139: 102–112.

Di Donato, V., Daunis-i-Estadella, J., Martín-Fernández, J. A. & Esposito, P. Size Fraction Effects on Planktonic Foraminifera Assemblages: A Compositional Contribution to the Golden Sieve Rush. *Math Geosci*, 47: 455–470.

Duque-Castaño, M. L., Leonhardt, A. & Pivel, M. A. G. 2019. Morphometric analysis in the shells of the planktonic foraminifera *Orbulina universa*: a source for paleoceanographic information?. *Brazilian Journal of Oceanography*, 67:134–142.

Ferraro, S., Coccioni, R., Sabatino, N., Del Core, M. & Sprovieri, M. 2020. Morphometric response of late Aptian planktonic foraminiferal communities to environmental changes: A case study of *Paraticinella rohri* at Poggio le Guaine (central Italy). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 538: 109384.

Field, D. B. 2004. Variability in vertical distributions of planktonic foraminifera in the California current: Relationships to vertical ocean structure. *Paleoceanography*, 19(2): 1-22.

Frezza, C. F., Pivel, M. A. G., Suárez-Ibarra, J. Y., Ritter, M. N. & Coimbra, J. C. 2020. Bioerosion on Late Quaternary Planktonic Foraminifera Related to Paleoproductivity in the Western South Atlantic. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 35(8): 1–16.

Garzoli, S. L. & Gordon, A. L. 1996. Origins and variability of the Benguela Current. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 101: 897–906.

González-Silvera, A., Santamaria-del-Angel, E. & Millán-Núñez, R. 2006. Spatial and temporal variability of the Brazil-Malvinas Confluence and the La Plata Plume as seen by SeaWiFS and AVHRR imagery. *Journal of Geophysical Research*, 111: C06010.

Gordon, A. L., Weiss, R. F., Smethie, W. M. & Warner, M. J. 1992. Thermocline and intermediate water communication between the south Atlantic and Indian oceans. *Journal of Geophysical Research*, 97(C5): 7223-7240.

Gradstein, F., Gale, A., Kopaeich, L., Waskowska, A., Grigelis, A., Glinskikh, L. & Görög, Á. 2017. The planktonic foraminifera of the Jurassic. Part II: Stratigraphy, palaeoecology and palaeobiogeography. *Swiss Journal of Palaeontology*, 136(2): 259–271.

Groeneveld, J. & Chiessi, C. M. 2011. Mg/Ca of *Globorotalia inflata* as a recorder of permanent thermocline temperatures in the South Atlantic. *Paleoceanography*, 26(2): 1–12.

Gu, F., Chiessi, C. M., Zonneveld, K. A. F. & Behling, H. 2018. Late Quaternary environmental dynamics inferred from marine sediment core GeoB6211-2 off southern Brazil. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 496: 48–61.

Gu, F., Zonneveld, K. A. F., Chiessi, C. M., Arz, H. W., Pätzold, J. & Behling, H. 2017. Long-term vegetation, climate and ocean dynamics inferred from a 73,500 years old marine sediment core (GeoB2107-3) off southern Brazil. *Quaternary Science Reviews*, 172: 55–71.

Hammer, Ø., Harper, D. A. T. & Ryan, P. D. 2001. Past: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica*, 4(1): 1–9.

- Hart, M. B., Hylton, M. D., Oxford, M. J., Price, G. D., Hudson, W. & Smart, C. W. 2003. The search for the origin of the planktic Foraminifera. *Journal of the Geological Society*, 160(3): 341–343.
- Hemleben, C., Spindler, M. & Anderson, O. R. 1989. *Modern Planktonic Foraminifera*. New York, NY: Springer New York.
- Hudson, J. D. & Anderson, T. F. 1989. Ocean temperatures and isotopic compositions through time. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 80(3/4): 183–192.
- Hudson, W., Hart, M. B. & Smart, C. W. 2009. Palaeobiogeography of early planktonic foraminifera. *Bulletin de la Societe Geologique de France*, 180(1): 27–38.
- Hutson, W.H. 1980. The Agulhas Current During the Late Pleistocene : Analysis of Modern Faunal Analogs. *Science*, 207(4426): 64–66.
- Jian, Z., Wang, P., Chen, M.-P., Li, B., Zhao, Q., Bühring, C., Laj, C., Lin, H.-L., Pflaumann, U., Bian, Y., Wang, R. & Cheng, X. 2000. Foraminiferal responses to major Pleistocene paleoceanographic changes in the southern South China Sea. *Paleoceanography*, 15(2): 229–243.
- Kaiho, K., Takeda, K., Petrizzo, M. R. & Zachos, J. C. 2005. Anomalous shifts in tropical Pacific planktonic and benthic foraminiferal test size during the Paleocene-Eocene thermal maximum. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 237(2/4): 456–464.
- Karabeyoğlu, A. U., Özkan-Altıner, S. & Altıner, D. 2019. Quantitative analysis of planktonic foraminifera across the Cretaceous-Paleogene transition and observations on the extinction horizon, Haymana Basin, Turkey. *Cretaceous Research*, 104: 1–25.
- Keller, G. & Abramovich, S. 2009. Lilliput effect in late Maastrichtian planktic foraminifera: Response to environmental stress. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 284(1–2): 47–62.
- Kemle-von Mücke, S. & Hemleben, C. 1999. Foraminifera. In: Boltovskoy, D. (Ed.). *South Atlantic Zooplankton*. Backhuys Publishers, p. 43–73.
- Kopaevich, L. F. 2019. Shell Morphology of the Late Cretaceous Planktonic Foraminifera and Its Value in Modern Taxonomy. *Paleontological Journal*, v. 53(9): 911–915,
- Krechik, V. A. 2020. The upper layer of the Malvinas/Falkland current: Structure, and transport near 46°S in January 2020. *Russian Journal Of Earth Sciences*, 20: 1–8.
- Kucera, M. 2007. Planktonic Foraminifera as Tracers of Past Oceanic Environments. In: Hillaire-Marcel, C. & Anne de Vernal (Ed.). *Proxies in Late Cenozoic Paleoceanography*. Amsterdam: Elsevier, 2007. p. 213–254.
- Kucera, M. & Malmgren, B. A. 1998. Terminal Cretaceous warming event in the mid-latitude South Atlantic Ocean: Evidence from poleward migration of *Contusotruncana contusa* (planktonic foraminifera) morphotypes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 138(1/4): 1–15.
- Kuroyanagi, A. & Kawahata, H. 2004. Vertical distribution of living planktonic foraminifera in the seas around Japan. *Marine Micropaleontology*, 53(1/2): 173–196.

- Lessa, D. O. V., Portilho-Ramos, R., Barbosa, C. F., Silva, A. R. da, Belem, A., Turcq, B. & Albuquerque, A. L. 2014. Planktonic foraminifera in the sediment of a western boundary upwelling system off Cabo Frio, Brazil. *Marine Micropaleontology*, 106: 55–68.
- Lessa, D. V. O., Santos, T. P., Venancio, I. M. & Albuquerque, A. L. S. 2017. Offshore expansion of the Brazilian coastal upwelling zones during Marine Isotope Stage 5. *Global and Planetary Change*, 158: 13–20.
- Locarnini, R. A., Mishonov, A. V., Antonov, J. I., Boyer, T. P., Garcia, H. E., Baranova, O. K., Zweng, M. M., Paver, C. R., Reagan, J. R., Johnson, D. R., Hamilton, M. & Seidov, D. 2013. Volume 1: Temperature. In: LEVITUS, S; MISHONOV, A (Ed.). *World Ocean Atlas 2013*. NOAA Atlas NESDIS 73, 2013. v. 1: Temperatura, p. 40.
- Lombard, F., Labeyrie, L., Michel, E., Spero, H. J. & Lea, D. W. 2009. Modelling the temperature dependent growth rates of planktic foraminifera. *Marine Micropaleontology*, 70(1/2): 1–7.
- Lutjeharms, J. R. E. 2009. Agulhas Current. In: Steele, J.H., Thorpe, S. A. & Turekian, K. K. (Ed.). *Ocean Currents*. 2. ed. London: Elsevier Ltd, p. 174–183.
- Malmgren, B. A., Kucera, M., Nyberg, J. & Waelbroeck, C. 2001. Comparison of statistical and artificial neural network techniques for estimating past sea surface temperatures from planktonic foraminifer census data. *Paleoceanography*, 16(5): 520–530.
- Martins, I.R.1984. Aspectos da Oceanografia Física do Atlântico Sul. *Pesquisas em Geociências*, 16(16): 76–90.
- Meilland, J., Siccha, M., Weinkauff, M. F. G., Jonkers, L., Morard, R., Baranowski, U., Baumeister, A., Bertlich, J., Brummer, G. J., Debray, P., Fritz-Endres, T., Groeneveld, J., Magerl, L., Munz, P., Rillo, M. C., Schmidt, C., Takagi, H., Theara, G. & Kucera, M. 2019. Highly replicated sampling reveals no diurnal vertical migration but stable species-specific vertical habitats in planktonic foraminifera. *Journal of Plankton Research*, 41(2): 127–141.
- Möller, O. O., Piola, A. R., Freitas, A. C. & Campos, E. J. D. 2008. The effects of river discharge and seasonal winds on the shelf off southeastern South America. *Continental Shelf Research*, 28(13): 1607–1624.
- Moller, T., Schulz, H. & Kucera, M. 2013. The effect of sea surface properties on shell morphology and size of the planktonic foraminifer *Neogloboquadrina pachyderma* in the North Atlantic. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 391: 34–48.
- Morard, R., Füllberg, A., Brummer, G. J. A., Greco, M., Jonkers, L., Wizemann, A., Weiner, A. K. M., Darling, K., Siccha, M., Ledevin, R., Kitazato, H., De Garidel-Thoron, T., De Vargas, C. & Kucera, M. 2019. Genetic and morphological divergence in the warm-water planktonic foraminifera genus *Globigerinoides*. *PLoS ONE*, 14(12): 1–30.
- Müller, T. J., Ikeda, Y., Zangenberg, N. & Nonato, L. V. 1998. Direct measurements of western boundary currents off Brazil between 20°S and 28°S. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 103(C3): 5429–5437.

- Pisias, N.G. & Moore, T.C. JR. 1981. The evolution of Pleistocene climate: A time series approach. *Earth and Planetary Science Letters*, 52(2): 450–458.
- Nagy, G. J., Severov, D. N., Pshennikov, V. A., De los Santos, M., Lagomarsino, J. J., Sans, K. & Morozov, E. G. 2008. Rio de la Plata estuarine system: Relationship between river flow and frontal variability. *Advances in Space Research*, 41(11): 1876–1881.
- Naidu, P. D. & Malmgren, B. A. 1995. Monsoon upwelling effects on test size of some planktonic foraminiferal species from the Oman Margin, Arabian Sea. *Paleoceanography*, 10(1):117–122.
- Pereira, L. S., Arz, H. W., Pätzold, J. & Portilho-Ramos, R. C. 2018. Productivity Evolution in the South Brazilian Bight During the Last 40,000 Years. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 33(12): 1339–1356.
- Peterson, R. G. & Stramma, L. 1991. Upper-level circulation in the South Atlantic Ocean. *Progress in Oceanography*, 26(1): 1–73.
- Petrizzo, M.R. 2007. The onset of the Paleocene-Eocene Thermal Maximum (PETM) at Sites 1209 and 1210 (Shatsky Rise, Pacific Ocean) as recorded by planktonic foraminifera. *Marine Micropaleontology*, 63(3/4): 187–200.
- Petró, S. M., Pivel, M. A. G. & Coimbra, J. C. 2021. Evidence of supra-lysoclinal dissolution of pelagic calcium carbonate in the late Quaternary in the western South Atlantic. *Marine Micropaleontology*, 166: 102013.
- Petró, S. M., Pivel, M. A. G. & Coimbra, J. C. 2018. Foraminiferal Solubility Rankings: a Contribution To the Search For Consensus. *Journal of Foraminiferal Research*, 48(4): 301–313.
- Pimenta, F. M., Campos, E. J. D., Miller, J. L. & Piola, A. R. 2005. A numerical study of the Plata River plume along the southeastern South American continental shelf. *Brazilian Journal of Oceanography*, 53(3/4): 129–146.
- Piola, A. R. & Matano, R. P. 2009. Brazil and Falklands (Malvinas) Currents. In: Steele, J. H., Thorpe, S. A. & Turekian, K.K. (Ed.). *Ocean Currents*. 2. ed. London: Elsevier Ltd. p. 627.
- Piola, A. R., Franco, B. C., Palma, E. D. & Saraceno, M. 2013. Multiple jets in the Malvinas current. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(4): 2107–2117.
- Portilho-Ramos, R. da, Pinho, T., Chiessi, C. & Barbosa, C. 2019. Understanding the mechanisms behind high glacial productivity in the southern Brazilian margin. *Climate of the Past Discussions*, 15(3): 943–955.
- Portilho-Ramos, R. da C., Ferreira, F., Calado, L., Frontalini, F. & Toledo, M. B. 2015. Variability of the upwelling system in the southeastern Brazilian margin for the last 110,000years. *Global and Planetary Change*, 135: 179–189.
- Ravelo, A. C. & Hillaire-Marcel, C. 2007. The use of oxygen and carbon isotopes of foraminifera in paleoceanography. In: Hillaire-Marcel, C. & Anne de Vernal (Ed.). *Proxies in late Cenozoic Paleoceanography*. Amsterdam: Elsevier, p. 735–764.
- Renaud, S. & Schmidt, D. N. 2003. Habitat tracking as a response of the planktic foraminifer *Globorotalia truncatulinoides* to environmental fluctuations during the last

140 kyr. *Marine Micropaleontology*, 49(1/2): 97–122.

Rillo, M. C., Miller, C. G., Kucera, M. & Ezard, T. H. G. 2020. Intraspecific size variation in planktonic foraminifera cannot be consistently predicted by the environment. *Ecology and Evolution*, 10(20): 11579–11590.

Robinson, S. G., Maslin, M. A. & McCave, I. N. 1995. Magnetic susceptibility variations in Upper Pleistocene deep-sea sediments of the NE Atlantic: Implications for ice rafting and paleocirculation at the Last Glacial Maximum. *Paleoceanography*, 10(2): 221–250.

Rodrigues, A.R, Pivel, M.A.G, Schmitt, P., Almeida, F. K. & Bonetti, C. 2018. Infaunal and epifaunal benthic foraminifera species as proxies of organic matter paleofluxes in the Pelotas Basin, south-western Atlantic Ocean. *Marine Micropaleontology*, 144: 38–49.

Rodrigues, R. R. & Lorenzetti, J. A. 2001. A numerical study of the effects of bottom topography and coastline geometry on the Southeast Brazilian coastal upwelling. *Continental Shelf Research*, 21(4): 371–394.

Sarnthein, M., Jansen, E., Weinelt, M., Arnold, M., Duplessy, J. C., Erlenkeuser, H., Flatøy, A., Johannessen, G., Johannessen, T., Jung, S., Koc, N., Labeyrie, L., Maslin, M., Pflaumann, U. & Schulz, H. 1995. Variations in Atlantic surface ocean paleoceanography, 50°-80°N: A time-slice record of the last 30,000 years. *Paleoceanography*, 10(6): 1063–1094.

Schiebel, R., Waniek, J., Bork, M., & Hemleben, C. 2001. Planktic foraminiferal production stimulated by chlorophyll redistribution and entrainment of nutrients. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 48(3): 721–740.

Schiebel, R. 2002. Planktic foraminiferal sedimentation and the marine calcite budget. *Global Biogeochemical Cycles*, 16(4): 3-1-3–21.

Schiebel, R. & Hemleben. 2017. *Planktic foraminifers in the modern ocean*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Schlitzer, R. 2021. *Ocean Data View*. (Programa).

Schmidt, D.N., Caromel, A.G.M., Seki, O., Rae, J.W.B., & Renaud, S. 2016. Morphological response of planktic foraminifers to habitat modifications associated with the emergence of the Isthmus of Panama. *Marine Micropaleontology*, 128: 28–38.

Schmidt, D.N., Thierstein, H.R., & Bollmann, J. 2004a. The evolutionary history of size variation of planktic foraminiferal assemblages in the Cenozoic. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 212(1/2): 159–180.

Schmidt, D.N., Renaud, S., Bollmann, J., Schiebel, R., & Thierstein, H.R., 2004b. Size distribution of Holocene planktic foraminifer assemblages: biogeography, ecology and adaptation. *Marine Micropaleontology*, 50(3/4): 319–338.

Schouten, M.W., Ruijter, W.P.M., & Van Leeuwen, P.J. 2002. Upstream control of Agulhas Ring shedding. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 107(8): 3109.

Siccha, M. & Kucera, M. 2017. Data Descriptor: ForCenS, a curated database of planktonic foraminifera census counts in marine surface sediment samples. *Scientific*

Data, 4: 1–12.

Silveira, I.C.A., Schmidt, A.C.K., Campos, E.J.D., Godoi, S.S. de, & Ikeda, Y. 2000. A corrente do Brasil ao largo da costa leste brasileira. *Brazilian Journal of Oceanography*, 48(2): 171–183.

Souto, D.D., Lessa, D.V., Albuquerque, A.L.S., Sifeddine, A., Turcq, B.J., & Barbosa, C.F. 2011. Marine sediments from southeastern Brazilian continental shelf: A 1200 year record of upwelling productivity. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 299(1/2): 49–55.

Suárez-Ibarra, J.Y., Frozza, C.F., Petró, S.M., Palhano, P.L. & Pivel, M.A.G. (submetido) Calcium carbonate dissolution triggered by high productivity during the last glacial-interglacial interval at the deep western South Atlantic. *Paleoceanography and Paleoclimatology*.

Suárez-Ibarra, J.Y., Frozza, C.F., Petró, S.M., & Pivel, M.A.G. 2021. Fragment or broken? Improving the planktonic foraminifera fragmentation assessment. *PALAIOS*, 36(5): 165–172.

Taylor, B.J., Rae, J.W.B., Gray, W.R., Darling, K.F., Burke, A., Gersonde, R., Abelman, A., Maier, E., Esper, O., & Ziveri, P. 2018. Distribution and ecology of planktic foraminifera in the North Pacific: Implications for paleo-reconstructions. *Quaternary Science Reviews*, 191(1): 256–274.

Todd, C.L., Schmidt, D.N., Robinson, M.M. & De Schepper, S. 2020. Planktic Foraminiferal Test Size and Weight Response to the Late Pliocene Environment. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 35(1): 1–15.

Toledo, F.A.L., Cachão, M., Costa, K.B. & Pivel, M.A.G. 2007. Planktonic foraminifera, calcareous nannoplankton and ascidian variations during the last 25 kyr in the Southwestern Atlantic: A paleoproductivity signature? *Marine Micropaleontology*, 64(1/2): 67–79.

Wade, B.S. & Olsson, R.K. 2009. Investigation of pre-extinction dwarfing in Cenozoic planktonic foraminifera. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 284(1/2): 39–46.

Wade, B.S., Poole, C.R. & Boyd, J.L. 2016. Giantism in oligocene planktonic foraminifera *paragloborotalia opima*: Morphometric constraints from the equatorial pacific ocean. *Newsletters on Stratigraphy*, 49(3): 421–444.

Wefer, G., Berger, W.H., Bijma, J. & Fischer, G. 1999. Clues to Ocean History: a Brief Overview of Proxies. In: Fischer, G. & Wefer, G. (Ed.). *Use of Proxies in Paleoceanography*. : Springer, Berlin, Heidelberg, p. 1–68.

Weinkauff, M.F.G., Moller, T., Koch, M.C. & Kučera, M. 2013. Calcification intensity in planktonic Foraminifera reflects ambient conditions irrespective of environmental stress. *Biogeosciences*, 10(10): 6639–6655.

Zarkogiannis, S. D., Antonarakou, A., Tripathi, A., Kontakiotis, G., Mortyn, P. G., Drinia, H. & Greaves, M. 2019. Influence of surface ocean density on planktonic foraminifera calcification. *Scientific Reports*, 9(1): 533.

9. Artigo Submetido

Planktonic foraminifera test size fluctuations in response to paleoceanographic changes in the western South Atlantic: an ecological or taphonomical imprint?

Dear Mrs Vieira,

We have received the above referenced manuscript you submitted to Marine Micropaleontology.

To track the status of your manuscript, please log in as an author at <https://www.editorialmanager.com/mamic/>, and navigate to the "Submissions Being Processed" folder.

Thank you for submitting your work to this journal.

Kind regards,
Marine Micropaleontology

Planktonic foraminifera test size fluctuations in response to paleoceanographic changes in the western South Atlantic: an ecological or taphonomical imprint?

Ingrid Vieira^{a*}, Jaime Y. Suárez-Ibarra^b, Cristiane F. Frozza^a, Maria A.G. Pivel^{a,c}

^aPrograma de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves, 9500, Cx. P. 15001, 91501-970, Porto Alegre, RS, Brazil.

*corresponding author

^bÚstav geologie a paleontologie, Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova, Albertov 6, Praha, Czech Republic

^cInstituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves, 9500, Cx. P. 15001, 91501-970, Porto Alegre, RS, Brazil.

Abstract: Several studies have documented the intense oceanographic changes that took place in the western South Atlantic during the late Quaternary, especially in terms of primary productivity. Such changes affected both: planktonic foraminifera test chemistry and their assemblage composition. In this study, we aim to investigate how the environmental changes also affected planktonic foraminifera test sizes. For this purpose, we analyzed size changes (inferred by cross-sectional area measurements) of the six most abundant taxa from a core retrieved at the southern Brazilian continental slope covering the 43 – 5 ka time interval. To test correlation between taxa and environmental factors, we applied a Principal Component Analysis (PCA) to synthesize whole populations changes through time. Subsequently, we used the first Principal Component (PC1), from

the PCA, to test for the correlation with environmental variables related to sea surface temperature, productivity, dissolution, and the biotic factors. Spearman correlation analysis showed that sizes were not correlated with sea-surface temperature, but rather to dissolution and productivity proxies. Higher productivity during glacial times increased the export of organic matter to the seafloor, leading to an increased release of carbon dioxide and carbonate corrosiveness, thus compromising the preservation of foraminifera carbonate tests. Increased dissolution may reduce test sizes by the loss of the less calcified last chambers. Therefore, the observed size changes may reflect *post-mortem* conditions, instead of the living environment. Future research involving dissolution and size analysis of planktonic foraminifera tests may contribute to disentangle the contributions of both: taphonomical and ecological and imprint.

Keywords: cross-sectional area, paleotemperature, paleoproductivity, dissolution, Pelotas Basin,

1. Introduction

Since they emerged, planktonic foraminifera have changed over geological time, both in terms of morphology and specific richness (Schmidt et al., 2004a; BouDagher-Fadel, 2015; Rillo et al., 2019). These changes have been associated, in large-scale, with variations in global ocean conditions (e.g. Kucera and Malmgren, 1998; Abramovich and Keller, 2003; Hart et al., 2003; Schmidt et al., 2004a; Kaiho et al., 2006) but also with local changes (e.g. Weinkauf et al., 2013; Schmidt et al., 2016; Zarkogiannis et al., 2020). Clearly, the history of adaptation and morphological response to changing environmental conditions is not exclusive of planktonic foraminifera. However, their high sensitivity to ambient conditions makes planktonic foraminifera excellent environmental tracers, enabling researchers to understand oceans and climate variability throughout time.

Changes in the morphological characteristics of planktonic foraminifera tests (e.g. size, porosity, chamber expansion/compression, wall thickness) are shown to be controlled by environmental factors to which they can adapt (e.g. Schmidt et al., 2004b; Kaiho et al., 2006; Birch et al., 2012; Davis et al., 2013; Marshall et al., 2015; Wade et al., 2016; Burke et al., 2018; Duque-Castaño et al., 2019; Todd et al., 2020), although there is a demonstrated ecophenotypic plasticity (Darling and Wade, 2008; Weiner et al., 2015; Aurahs et al., 2011; Davis et al., 2020). Additionally, some changes in morphological traits can be used to identify or understand pre-extinction moments (WADE; OLSSON, 2009; WEINKAUF, Manuel F.G. *et al.*, 2019).

In addition to controlling the planktonic foraminifera assemblages composition (Kucera, 2007), the sea surface temperature (SST) seems to be the main controlling factor over test sizes (e.g. Schmidt et al., 2004a). As demonstrated by Schmidt et al. (2003) there is a positive linear relationship between SST and foraminifera tests' size. Additionally, primary productivity also plays an important role (ZARKOGIANNIS, S.; KONTAKIOTIS; ANTONARAKOU, 2020), affecting the size and morphology of planktonic foraminifera tests. As a result, although there is an overall increase in test size from the poles towards the tropics, the linear trend is disrupted in areas with turbulent and stressful conditions for foraminifera, such as in ocean fronts or upwelling zones (ORTIZ; MIX; COLLIER, 1995; RENAUD; SCHMIDT, 2003; SCHMIDT *et al.*, 2004). In these cases, species well-adapted to these systems, such as *Globigerina bulloides* and *Globigerinita glutinata* will be more successful in terms of abundance which does not necessarily translate into larger sizes (NAIDU; MALMGREN, 1995; SCHIEBEL *et al.*, 2001; SCHMIDT *et al.*, 2004).

The subtropical western South Atlantic is a transitional zone. As such, it experiences large environmental gradients, which vary at different timescales. Late Quaternary changes in terms of SST and paleoproductivity have been well

documented by several recent studies (Gu et al., 2017; Pereira et al., 2018; Portilho-Ramos et al., 2019; Frozza et al., 2020; Suarez-Ibarra et al., submitted). This makes this region an ideal setting to analyze the impact of changing environmental conditions on planktonic foraminifera tests size.

In this paper, we look forward to understanding the environmental parameters that controlled the variation in planktonic foraminifera tests size in the subtropical western South Atlantic during the late Quaternary. For this purpose, we obtained cross-sectional area measurements on selected species of planktonic foraminifera tests from core SAT-048A, corresponding to 43 – 5 ka, recovered from the Pelotas Basin slope, western South Atlantic. Through the analysis of tests sizes for each taxon individually, we aim to provide a detailed picture of the governing environmental factors underneath size changes.

2. Regional setting

2.1 Modern oceanographic conditions

In the offshore portion of the Pelotas Basin, southernmost Brazilian continental margin, there is the influence of the southward flowing Brazil Current (BC), which, compared to other western boundary currents, is relatively weak (PETERSON; STRAMMA, 1991). The BC flows in the southwest portion of the continental margin along the shelf break and transports warm ($>20^{\circ}\text{C}$), saline (>36), and nutrient-poor Tropical Water (TW) in the upper 200 meters (Silveira et al., 2000; Rodrigues and Lorenzetti, 2001) (Fig. 1). At the pycnocline layer, the BC transports progressively cooler ($6-20^{\circ}\text{C}$) and fresher (34.6-36) South Atlantic Central Water (SACW). At around 38°S , the BC meets a northward-flowing branch of the Antarctic Circumpolar Current, the Malvinas Current (MC), which brings Subantarctic Water, with opposite

characteristics compared to the TW, being cooler (4-16°C), fresher (<34.2), and nutrient-rich (PIOLA, A R; MATANO, 2009). The meeting of these two currents with contrastingly different properties produces a zone of intense energy with eddies and meanders known as the Brazil-Malvinas Confluence (BMC), which displays seasonal and interannual migration (GORDON, 1989; PALMA; MATANO, 2009). After the BC and MC meet, their waters flow eastward transported by the South Atlantic Current (SAC) (GORDON, 1989; PALMA; MATANO, 2009; PIOLA, A R; MATANO, 2009).

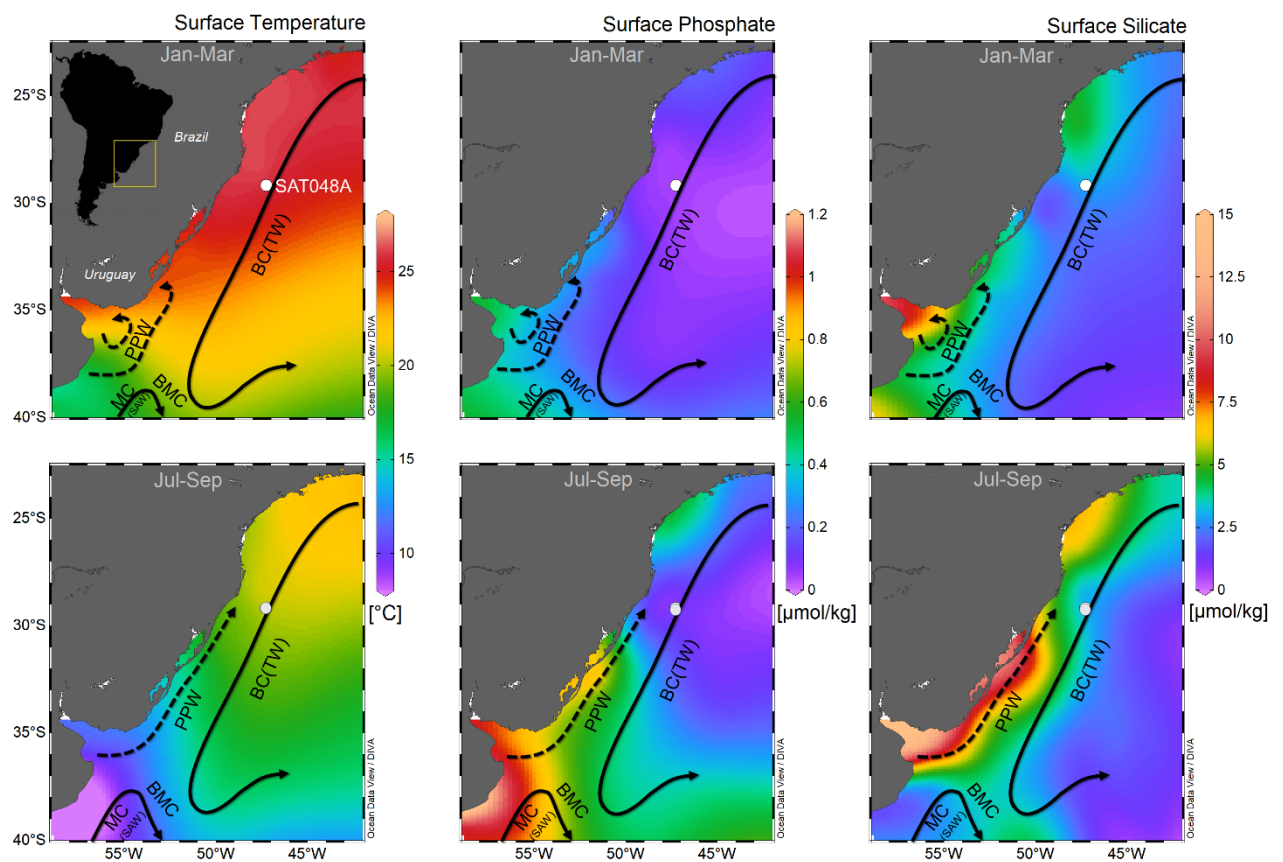


Fig. 1. Modern oceanographic conditions at the southwestern South Atlantic illustrated by seasonal variations of (A) sea surface temperature (°C), (B) surface phosphate, ($\mu\text{mol/kg}$) and (C) surface silicate ($\mu\text{mol/kg}$) for austral summer (Jan-Mar, first row) and austral winter (Jul-Sep, second row). Temperature and nutrient data are from the World Ocean Atlas 2018 (BOYER *et al.*, 2018). A simplified schematic representation of currents is based on Peterson & Stramma (1991) and Möller *et al.*

(2008). BC = Brazil Current, TW = Tropical Water, MC = Malvinas Current, SAW = Subantarctic Water, BMC = Brazil - Malvinas Confluence, PPW = Plata Plume Water. The white dot indicates the location of core SAT-048A analyzed in this study. Plotted with Ocean Data View (SCHLITZER, 2021)

Under oligotrophic (low productivity) conditions where the BC dominates, species such as *Globigerinoides ruber* prevail (SOUSA *et al.*, 2014). This scenario is different, specifically when the input of cold and nutrient-enriched waters occurs in the euphotic zone, especially during the summer months, where there is greater intensity of NE winds that favor the upwelling mechanism, causing the SACW waters to upwell (Peterson and Stramma, 1991; Palma and Matano, 2009; Brandini *et al.*, 2014). Under these conditions, species such as *G. bulloides* and *G. glutinata* become more abundant.

The study region may also be influenced by the intrusion of continental water outflow from the Rio de la Plata plume which can extend up to $\sim 27^{\circ}\text{S}$ during the winter months (PIOLA, Alberto R. *et al.*, 2005). The plume may contribute to the modification of parameters such as sea surface temperature (SST), nutrient availability (Fig. 1), and sea surface salinity in the southern portion of the Brazilian continental margin. The extent of the northward intrusion of these cooler and fresher waters is mostly dependent on the wind pattern rather than river discharge (PIMENTA *et al.*, 2005; PIOLA, Alberto R. *et al.*, 2005). During austral winter, SW winds bring the plume northward while during austral summer the dominant NE winds restrict the Plume closer to the river mouth, at around 32°S (MÖLLER *et al.*, 2008).

Late Quaternary conditions

Pereira et al. (2018), provided SST estimates for the southern portion of the Brazilian continental margin for the last 40 kyr, based on the analysis of planktonic foraminifera assemblages from core GeoB2107-3 (27°10'S, 46°27'W, 1,048 m water depth). The authors identified oscillations that can be summarized at least in four intervals. The first, during to the last glacial, between 40 – 23 ka with temperatures around 19.1 – 20.5°C. The second, from 23 – 19 ka, where there is an increase in temperature that corresponds to the highest temperatures of the Last Glacial Maximum (LGM), around 20.1 – 22.8°C. The third, between 19 – 11 ka, would be a moment of relative stability, where SST remained practically the same, around 20.11 – 22.2°, finally increasing at the beginning of the Holocene, which is marked by higher temperatures around 21.9 – 26.1°C.

Based on the analysis of core SAT-048A (the same used in our study), Suárez-Ibarra et al. (submitted) estimated that the annual mean SST at 100m water depth (SST_{100m}) remained around 16°C up to 37 ka. Between 37 – 15 ka the temperature would have varied between 16 and 18°C. Suárez-Ibarra et al. (submitted), based on the literature, interpreted these cooler temperatures under 20°C as intrusions of the SACW. With the beginning of the LGM, there is also a warming trend and values reach up to 23°C. From the LGM onwards, a warming trend was established, reaching the warmest value (22.5°C) at 7 ka.

Regarding primary productivity, during the last 40 kyr, the southern Brazilian continental margin has undergone considerable fluctuations (Portilho-Ramos et al., 2019; Frozza et al., 2020). However, in the long run, it remained more productive during the glacial period (PORTILHO-RAMOS, R. Da et al., 2019) and entered a sharp productivity decline in the early Holocene, probably related to changes in the southern Atlantic meridional overturning circulation AMOC and the BC (Toledo et al., 2007; Nagai et al., 2010; Pereira et al., 2018). Pereira et al. (2018) associate long-

term and short-term changes in productivity (as well as in temperature and salinity) during the LGM, to the lowering of sea level that resulted in changes in the BC dynamics.

Based on the analysis of core SAT-048A by Suárez-Ibarra et al., 2021 (submitted), the variations in the trophic regime during the last 43 kyr are, in addition, related to local conditions such as the intensity of NE winds, upwelling mechanisms, and possibly the influence of continental drainage. Based on the changing patterns of productivity in the glacial and post-glacial, the authors defined four distinct intervals: interval IV between 43 – 35 ka, III between 35 – 24 ka, II between 24 – 13 ka, and I between 13 – 5 ka.

3. Material and Methods

3.1 Core general information

Our study is based on the analysis of forty-nine sediment samples from core SAT-048A (29°11'S; 47°15'W; 1542 mbsl). The core SAT-048A was retrieved by *FUGRO Brasil – Serviços Submarinos e Levantamentos Ltda* for the *Agência Nacional do Petróleo* (Brazilian National Agency of Petroleum, Natural Gas and Biofuels), at the Pelotas Basin slope, western South Atlantic. Samples were sieve-washed over a 63 µm mesh and oven-dried at a maximum temperature of 60°C. The taxonomical classification was previously published by Frozza et al. (2020) and Suárez-Ibarra et al. (submitted). Before being classified, planktonic foraminifera specimens went through a second sieving through a 150 µm mesh. Taxonomic criteria followed Bé (1967), Bé et al. (1977), Bolli and Saunders (1989), Hemleben et al. (1989), Kemle-von Mücke and Hemleben (1999), Schiebel and Hemleben (2017) and Morard et al. (2019). Relative abundances are already published in the Pangaea database by Suárez-Ibarra et al. (2020).

The age model is a revised version of Frozza et al. (2020)'s, carried out by Savian et al., (submitted, supplementary material), based on ten ^{14}C AMS dates plus the Laschamp geomagnetic excursion. Given the age uncertainties, all references to ages throughout the results and discussion are approximate estimates.

3.2 *Image acquisition and size measurements*

Size variation analyses were performed on subsamples of at least 300 specimens of planktonic foraminifera, the same samples as in Frozza et al. (2020). Therefore, the number of measured specimens varies from species to species and from sample to sample. The measurement variable chosen was the cross-sectional area (μm^2) for the following planktonic foraminifera: *Globigerinoides ruber albus*, *Globigerinoides ruber ruber*, *Neogloboquadrina incompta*, *Globoconella inflata*, *Globigerina bulloides*, and *Globigerinita glutinata*. This choice is justified by the high relative abundance of these species in the core under study (mean summed relative abundances of these six taxa is 81%, with a minimum of 63% and a maximum of 92%) and by the representativeness of four biogeographic zones (KUCERA, 2007): transitional, subtropical, tropical, and subpolar. Furthermore, the species chosen are good tracers of the local oceanic configuration.

Before the image acquisition step, tests were umbilical side up positioned, and care was taken to leave them with the lowest possible inclination to avoid potential distortions in the data extraction. In addition, care was taken to exclude broken tests from the count which would compromise the results. Only in some cases, where the damage was restricted to a partially broken wall chamber, and this did not compromise the overall outline, a filling was performed to avoid a reduction in the number of individuals measured.

The images were manually acquired using the Zen 2.6 lite software (blue edition) and a Zeiss stereomicroscope, model Discovery V8 Stereo with an Axiocam 105 color digital camera attached. With the use of this software, it was possible to obtain images with a graphic reference scale and adjust the focus, light, and contrast settings.

To measure tests, the ImageJ software (ABRÀMOFF; MAGALHÃES; RAM, 2004) was used, freely available at <https://imagej.nih.gov/ij/>. Before obtaining the measurements in ImageJ, the images were segmented, first converting them to grayscale (8 bits) and then to binary images. In this way, it was possible to extract data from the measurements performed. In total, 15771 tests were measured.

3.3 Data treatment for size analysis

Previous studies focusing on size variations have either used the largest portion of the assemblages (e.g. Schmidt et al., 2004a, mean value of largest 5%; Todd et al., 2020; Rillo et al., 2020, 95th percentile) or mean values (e.g. Malmgren and Healy-Williams, 1978; Schmidt et al., 2003; Nimmy et al., 2021). Since planktonic foraminifera tests are sieved, smaller individuals are not analyzed, making the larger portion a more realistic value. Additionally, outlier points can influence mean and maximum values. Although the picked test assemblages are “half-cut” due to the sieving, median values can still capture the analyzed foraminifers without the influence of outliers. In any case, given the method diversity, we decided to apply the following data treatment.

Area measures were log-transformed, and then, to analyze size variation through time, a Principal Component Analysis (PCA) for 1st and 3rd quartiles, Mean, Median, and 95th percentiles (P_{95}) was performed for each species, based on the correlation matrix. The PCA, a multivariate data technique used in exploratory data analysis, is

usually performed to extract, and create new orthogonal variables, called principal components (PC), that show similarities within the matrix dataset (ABDI; WILLIAMS, 2010). In our study, we used PCA as a way to synthesize the variation of the whole population structure using the five size descriptors. The synthetic number of the first PC (PC1), produced with the PCA, was used to correlate size vs. environmental parameters.

3.4 Abiotic and biotic environmental parameters

Relative abundances of planktonic foraminifera from Suárez-Ibarra et al. (2020) were used to estimate past SST using the Modern Analog Technique (MAT, Hutson, 1980) with the statistical software PAST (version 3.2; Hammer et al., 2001). The calibration was performed using the South Atlantic data from the ForCenS database (SICCHA; KUCERA, 2017) and the mean annual SST for the upper layer between 0 and 75 m (SST₀₋₇₅), extracted from the World Ocean Atlas 2013 (LOCARNINI *et al.*, 2013), using the Ocean Data View software (SCHLITZER, 2021).

Diversity and species richness were also calculated using the software PAST. Here we use the Shannon diversity index (H), which corresponds to a diversity index that considers the number of individuals (abundance) as well as the number of taxa (richness).

3.5 Correlation analysis

Spearman correlations were performed on PC1 (henceforward called size_{PC1}) of each species vs. the following environmental parameters: i) SST_{0-75m}, ii) sea surface productivity, inferred by *G. glutinata*'s relative abundance (a species related to high productivity, Pereira et al., 2018), iii) the export productivity to the seafloor inferred by the stable carbon isotope composition of benthic foraminifera of the genus *Uvigerina* ($\delta^{13}\text{C}_{Uvi}$, Frozza et al., 2020; Suárez-Ibarra et al., submitted) and iv) dissolution

proxies (CaCO₃ content and planktonic foraminifera per gram of dry sediment (PF/g)) previously published by Suárez-Ibarra et al. (2021). We also tested the correlation between size_{PC1} and biotic indicators, including their own relative abundances, Shannon diversity index (H), and species richness. Finally, the correlation between the species' size_{PC1} was also calculated.

4. Results

4.1 Size

The different size descriptors (*i.e.* mean, median, 95th percentile, 1st, and 3rd quartiles) do not necessarily follow the same trends, as exemplified by *G. inflata* data in Figure 2 (figures for all taxa descriptors are available as supplemental material). Comparing *G. ruber albus* and *G. inflata* size descriptors between 42 and 38 ka, we observed that *G. ruber albus* descriptors displayed almost the same pattern while for *G. inflata* mean and P₉₅ values showed opposite trends. This reinforces the need for a standardized methodology that confidently captures population-structure size changes through time. Our analysis, based on synthetic size_{PC1} obtained through the PCA, produce dimensionless values, that we consider a more reliable descriptor for size changes and therefore, we henceforth describe size changes based on them.

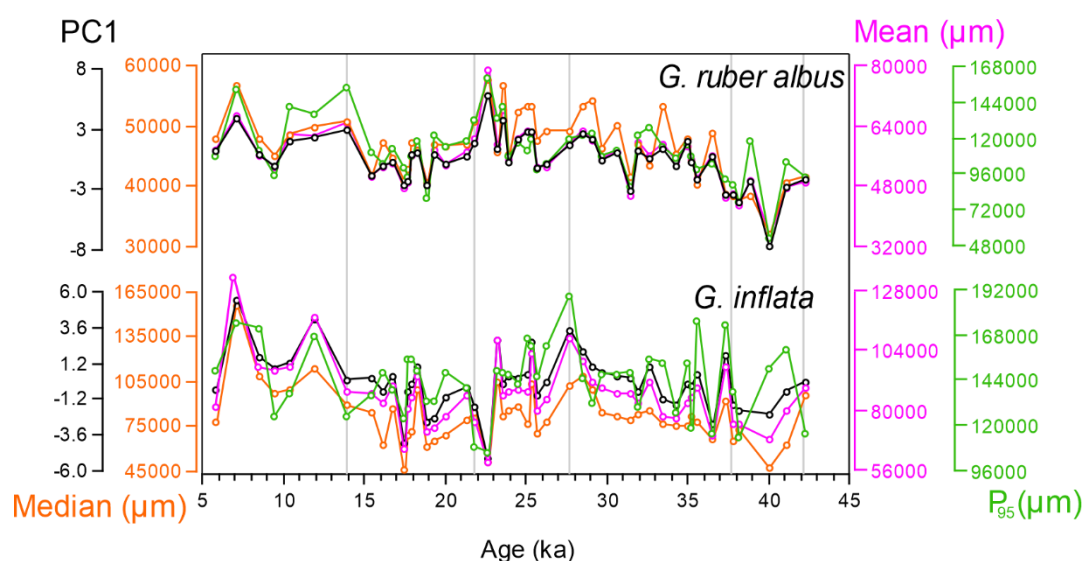


Fig. 2. Mean, median, P₉₅, and size_{PC1} values for *G. ruber albus* and *G. inflata* plotted in different scales to better visualize the variations through time.

Globigerinoides ruber albus displays a relatively homogeneous size distribution throughout the record, without large ranges of variation (Fig. 3A). Its minimum size was recorded at 40 ka and the maximum at 23 ka. Starting from its minimum, size shows a positive trend toward the present. From 28 – 23 ka *G. ruber albus* presents relatively larger sizes punctuated by some mean-sized samples. Following this interval, between 22 – 15 ka sizes drop, and the ranges of variation are less significant. Sizes only increase again after 14 ka. Between 14 – 10 ka the size of *G. ruber albus* remained relatively stable, showing a slightly larger size than in the previous low-size (22 – 15 ka) interval.

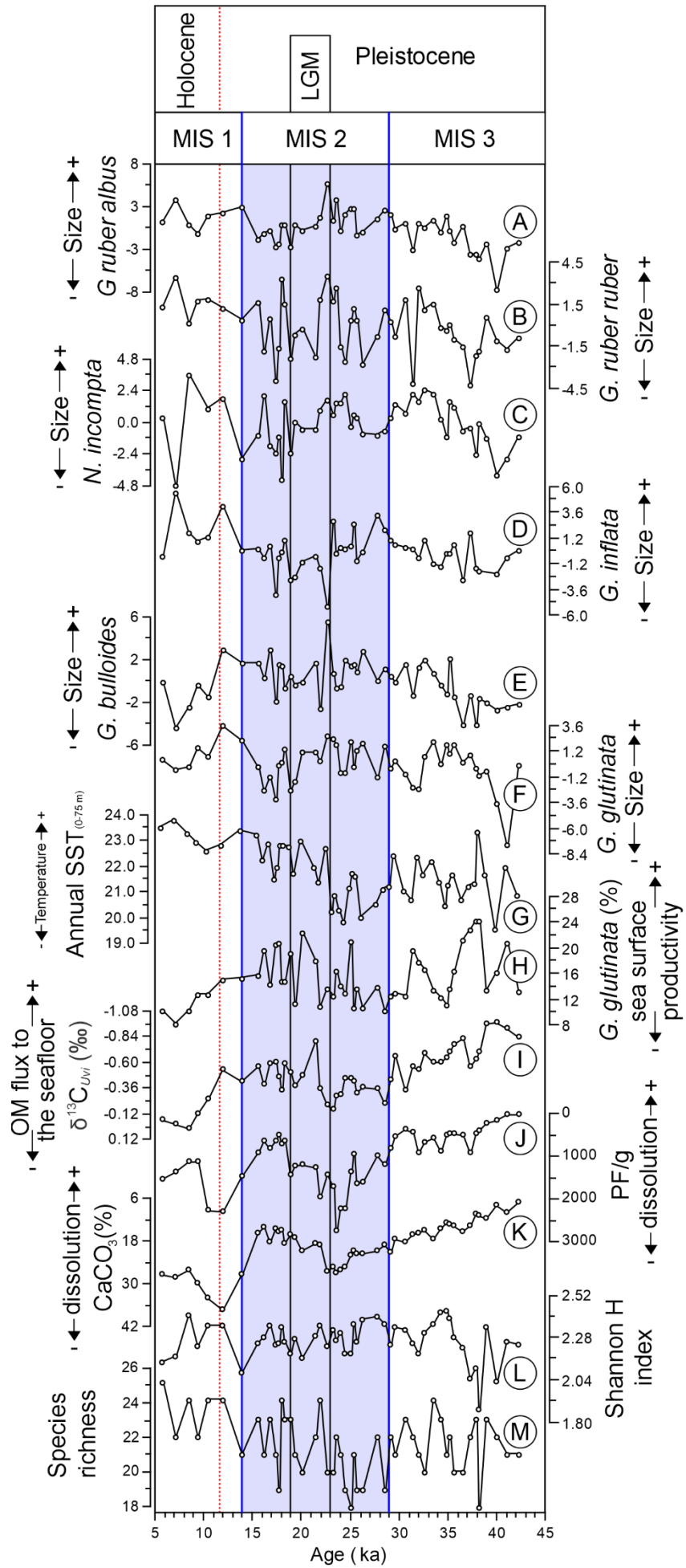


Fig. 3. Comparison of taxon sizes (A) *G. ruber albus*, (B) *G. ruber ruber*, (C) *N. incompta*, (D) *G. inflata*, (E) *G. bulloides* and (F) *G. glutinata* with (G) SST_{0-75m} variation curve (°C); (H) relative abundance of *G. glutinata* (%) and (I) carbon isotope composition of *Uvigerina* spp. ($\delta^{13}\text{C}_{Uvi}$, in ‰, relative to the V-PDB standard) as productivity indicators obtained from Frozza et al. (2020); (J) planktonic foraminifera per gram of sediment (PF/g) and (K) CaCO₃ content as dissolution proxies obtained from Suárez-Ibarra et al. (2021); (L) diversity curve represented by the Shannon index and (M) species richness as biotic proxies over the last 43 kyr. All data were obtained from core SAT-048A. Marine Isotope Stages (MIS) are indicated by vertical lines (MIS 2 in shaded blue). The black vertical lines within MIS 2 indicate the Last Glacial Maximum (LGM) and the red dotted vertical line indicates the Holocene onset.

Among the analyzed taxa, *G. ruber ruber* was the one that showed the greatest variability of size variation over time (Fig. 3B). The size curve reveals negative and positive peaks for consecutive samples within the glacial period. Between 15 and 5 ka, the sizes seem relatively stable, with no sudden fluctuations. The most notable minimum sizes were identified at 37, 32, and 17 ka, and the maximum values were reached at 23, 18, and 7 ka.

For *N. incompta*, the most conspicuous minimum sizes were found at 40, 18, and 7 ka and the maximum near 9 ka (Fig. 3C). Its size variation over time can be divided into three phases: The first one, between 40 – 32 ka marked by a wide range of values and progressive size increase. Between 32 – 18 ka sizes drop and remain relatively stable, except for a small interval with larger sizes between 25 – 21 ka. The last phase shows the largest size ranges and no clear trend.

The minimum sizes of *G. inflata* occur at ~23 and 17 ka and maximum sizes at 28, 23, 13, and 7 ka (Fig. 3D). Starting from relatively small sizes between 45 – 38 ka *G. inflata* shows an increasing size trend between 38 – 23 ka. Around 23 ka there is a sharp drop in sizes (first minimum) followed by a recovery and a second (less dramatic) minimum at 18 ka. From there on, sizes increase reaching the highest values observed over the whole time interval.

From 45 – 36 ka, *G. bulloides* displays the smallest glacial sizes with two minima at 38 and 36 ka (Fig. 3E). These minima are only larger than one Holocene sample at 7 ka which represents the minimum observed size throughout the interval. The glacial minima are followed by a size increase between 36 – 33 ka and relatively large and constant sizes up to 12 ka. The relative stability is disrupted around 23 ka when there is a maximum followed by a size drop. From 12 ka onwards the sizes decrease and at 9 ka they reach a minimum value at 7 ka.

The minimum size of *G. glutinata* occurs at 41 ka and the maximum at 12 ka (Fig. 3F). Between 41 – 36 ka, *G. glutinata* sizes show a significant increase followed by relative stability, between 36 – 16 ka, where the sizes did not show a clear trend over time, just varying amplitudes. After relatively low values between 19 – 18 ka, the situation changes and there is a size increase up to 11 ka, followed by a further decrease.

During MIS 3, all six taxa appear to experience a progressive size increase trend that begins to decline at the end of MIS 3 or, soon after, at the beginning of MIS 2. Except for *G. inflata*, the remaining species mainly present minima during MIS 3. Half of the species (*G. ruber albus*, *G. ruber ruber*, and *G. bulloides*) show their maximum sizes during MIS 2. At the beginning of the LGM, all species showed peak sizes that were

followed by a fall. After that, they show a progressive tendency to increase in size during MIS 1. At the beginning of the Holocene, they show a further size reduction.

At 7 ka, both *N. incompta* and *G. bulloides* display size minima that coincide with a maximum size for *G. inflata* and larger sizes for *G. ruber ruber*. Furthermore, the maximum sizes of *G. bulloides* just after the beginning of the LGM, at 23 ka, coincide with one of the minimum sizes observed for *G. inflata*.

4.2 Paleotemperature estimates

The SST curve in Figure 3G obtained using the Modern Analog Technique for the 0 - 75m depth range (SST_{0-75m}) shows a minimum of $\sim 19.5^{\circ}\text{C}$ around 40 ka and a maximum of $\sim 24^{\circ}\text{C}$ at 7 ka. Between 43 – 29 ka (MIS 3) the curve indicates a strongly variable but overall warming trend. At the MIS 3/MIS 2 transition (29 ka), this pattern changes, and temperatures decrease up to a second minimum ($\sim 19.5^{\circ}\text{C}$) prior to the onset of the LGM. From then on, there is an overall warming trend with more variable values throughout the deglaciation and more stable values during MIS 1.

4.3 Biotic parameters

The H index (Fig. 3L) shows a minimum of 1.9 at 38 ka and a maximum of ~ 2.4 at 35 and ~ 8 ka. Diversity displays a wide range of variation during MIS 3, ranging from 1.9 to 2.4. From this minimum, diversity shows a positive trend up to 35 ka, and after that, it decreases but remains above 2.1. Between 29 – 26 ka the diversity remains high (from 2.2 – 2.4). At 25 ka H values slowly start to decrease up to 14 ka. From 14 ka onwards the diversity increases again and remains around 2.3 after the start of the Holocene reaching a maximum at ~ 7 ka. Species richness (Fig. 3M) displays a large variation range over time, especially during MIS 3 and 2. The minimum value was 18, reached at 38 and 25 ka, and the maximum value was 25, close to 5 ka.

The relative abundance of *G. ruber* was described by Frozza et al. (2020), however, that work does not differentiate *G. ruber albus* and *G. ruber ruber*. The curve of *G. ruber albus* is more homogeneous and stable between 40 – 23 kyr (Fig. 4A and B). From 23 ka, near the beginning of the LGM, an increasing trend in abundance begins and remains high for the remainder of the interval. The relative abundance curve of *G. ruber ruber* (Fig. 4C and D) displays a greater range of variation compared to that of *G. ruber albus* between 40 – 16 ka. Furthermore, in this interval, there is a relative increasing trend. Around 16 ka, the relative abundance rises considerably and from there it remains higher than in the previous interval, however, with a slightly decreasing trend throughout the Holocene.

The relative abundance of *N. incompta* (Fig. 4E and F) and *G. bulloides* (Fig. 4I and J) was described by Frozza et al. (2020) and *G. inflata* (Fig. 4G and H) and *G. glutinata* (Fig. 4K and L) by Suárez-Ibarra et al. (submitted).

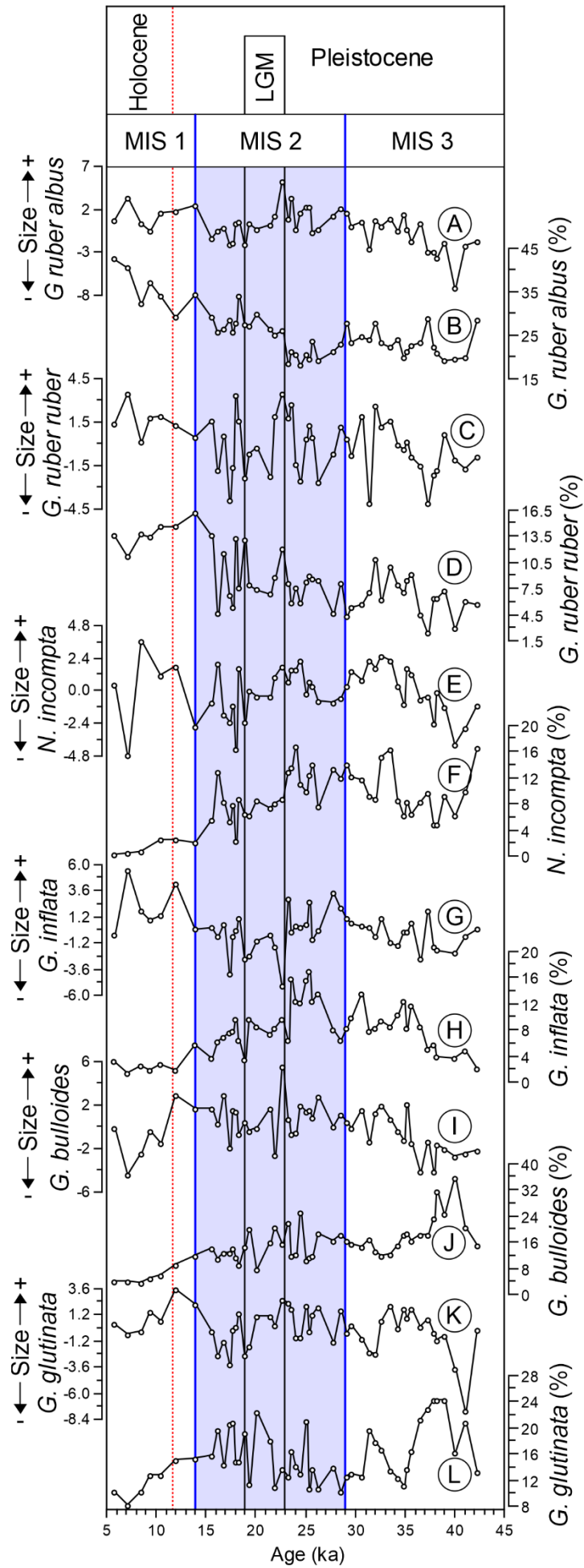


Fig. 4. Comparison of $size_{PC1}$ and relative abundances (%) for each taxon: (A, B) *G. ruber albus*, (C, D) *G. ruber ruber*, (E, F) *N. incompta*, (G, H) *G. inflata*, (I, J) *G. bulloides*, and (K, L) *G. glutinata*. All data obtained from the analysis of core SAT-048A. Marine Isotope Stages (MIS) are indicated by vertical lines (MIS 2 in shaded blue). The black vertical lines within MIS 2 indicate the Last Glacial Maximum (LGM) and the red dotted vertical line indicates the Holocene onset.

4.4 Spearman correlations

Spearman correlation results are shown in Figure 5, and Tables 1 and 2 (supplementary material). Significant values ($p < 0.05$), between 0 – 0.33 (absolute values) were considered as a weak (or low) correlation, between 0.34 – 0.66 as moderate and >0.66 as high. All significant correlations were positive except those between $size_{PC1}$ and *G. glutinata*'s relative abundance.

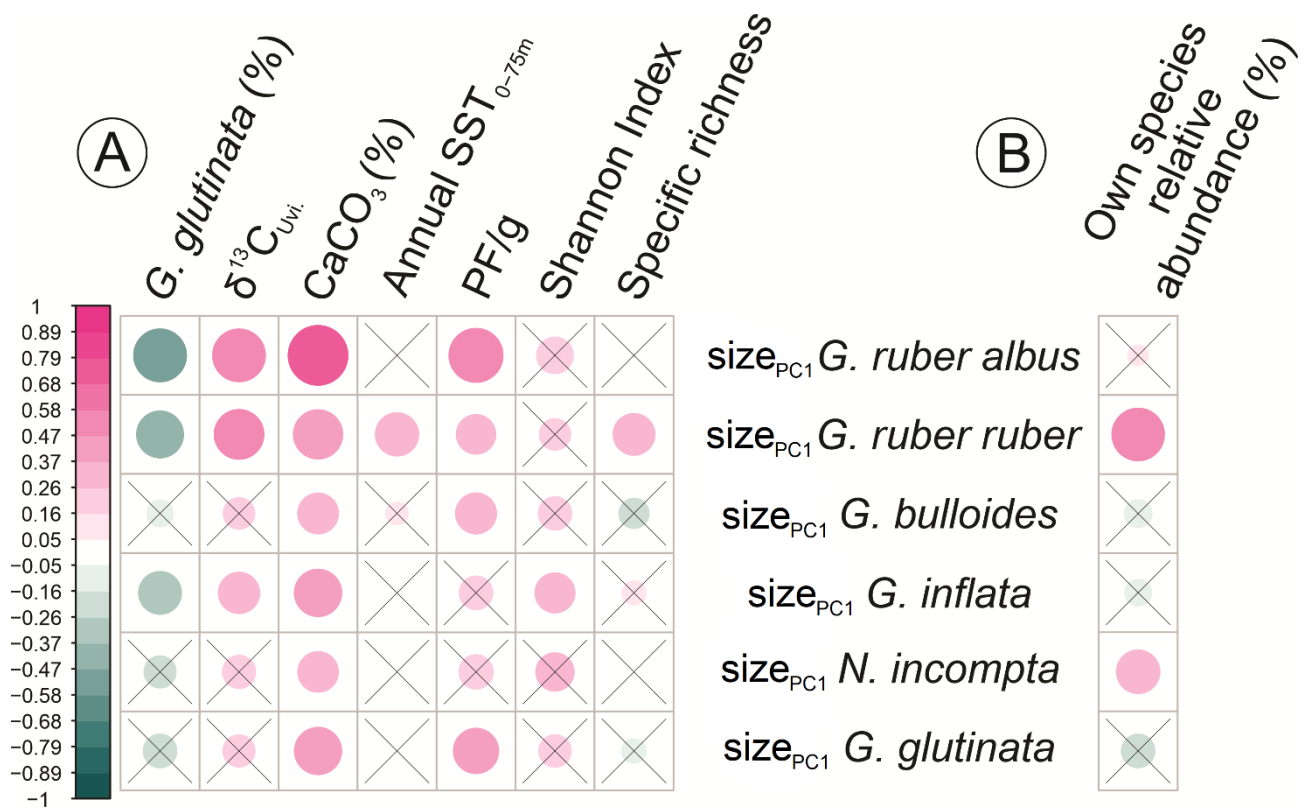


Fig. 5. (A) Spearman correlations between species' size_{PC1} and environmental and biotic parameters: *G. glutinata* relative abundance (%), annual mean SST_{0-75m}, CaCO₃ content (%), carbon isotope record in benthic foraminifera *Uvigerina* spp ($\delta^{13}\text{C}_{Uvi}$, in ‰ relative to the V-PDB standard), planktonic foraminifera per gram of sediment (PF/g), Shannon Diversity Index and specific richness. In (B) Spearman correlations between size_{PC1} and each species' relative abundance (%). The colors correspond to the correlation sign (white for neutral, pink for positive, and aqua green for negative) and intensity, as well as the circles' size. Non-significant correlations (> 0.05) are plotted as squares marked with an X.

For *G. ruber albus*, size_{PC1} was significantly correlated to dissolution (CaCO₃, and PF/g) and productivity proxies (*G. glutinata* and $\delta^{13}\text{C}_{Uvi}$, Fig. 5A). Among these, the correlations varied from moderate to high. CaCO₃ (%) showed the highest correlation with *G. ruber albus* ($r = 0.690$) and *G. glutinata* was the lowest ($r = 0.506$). *G. ruber albus* species abundance, SST_{0-75m}, species richness, and Shannon index did not show significant correlations.

Significant correlations for *G. ruber ruber* ranged from low to moderate. The highest significant correlation with size_{PC1} was with productivity ($\delta^{13}\text{C}_{Uvi}$, $r = 0.477$) and the weakest with dissolution (PF/g, $r = 0.298$). The environmental parameters that did not show significant correlations with *G. ruber ruber* were its species abundance and the Shannon index.

Globigerina bulloides' size_{PC1} yielded only weak significant correlations, being these with dissolution proxies (CaCO₃, $r = 0.319$ and PF/g, $r = 0.322$). None of the other environmental and biotic parameters displayed a significant correlation.

For *G. inflata*, significant correlations ranged from low (positive for Shannon index, $\delta^{13}\text{C}_{Uvi}$) to moderate (negative for *G. glutinata* relative abundance, and positive for

CaCO₃). *Globoconella inflata* yielded the highest correlation with one dissolution proxy (CaCO₃, $r = 0.432$) and the lowest one with the Shannon index ($r = 0.307$). Besides these, *G. inflata* did not show significant correlations with other parameters.

Significant correlations for *N. incompta* ranged from low to moderate, being these with biotic parameters and productivity (Shannon index, $\delta^{13}\text{C}_{\text{Uvi}}$, and its species abundance). The highest correlation ($r = 0.363$) was with its species abundance and the lowest ($r = 0.292$) with the Shannon index. Other environmental parameters did not show a correlation with *N. incompta*'s size_{PC1}.

Significant correlations for *G. glutinata* were only moderate, being these with the dissolution parameters. CaCO₃ (%) showed the highest correlation ($r = 0.430$) and PF/g the lowest ($r = 0.394$). Except for these parameters, none of the others showed a significant correlation with *G. glutinata*'s size_{PC1}.

Spearman's correlation performed between species' size_{PC1} showed that significant correlations ranged from low to moderate (Fig. 5B). *G. ruber albus* showed a significant correlation with all species and the highest correlation ($r = 0.633$) was with *G. ruber ruber* and the lowest ($r = 0.299$) with *N. incompta*.

In addition to *G. ruber albus*, *G. ruber ruber* showed a significant correlation only with *G. glutinata* ($r = 0.367$) and *N. incompta* ($r = 0.387$). For *G. bulloides*, in addition to *G. ruber albus*, only *G. glutinata* presented a significant correlation ($r = 0.336$). *G. inflata* showed a significant correlation ($r = 0.373$) only with *G. ruber albus*.

5. Discussion

Before discussing the results and comparing them with previous studies, differences between methodologies should be stressed. First of all, previous studies dealing with size changes have usually used random angles of foraminifera (SCHMIDT *et al.*,

2004; TODD *et al.*, 2020). In this study, all tests were positioned on the umbilical side. Therefore, there is a standard view and measurements are comparable. However, as each shell has a different morphology, it might be necessary to choose different views for each species.

Second, several measurements could be used to represent sizes (*i.e.* area, diameter, perimeter), and this choice could lead to differing results. However, Brombacher *et al.* (2017, 2018) documented that cross-sectional area can be as robust as three-dimensional measurements.

Third, statistical measures (usually mean, median, 95th percentiles, as mentioned in the methods) can yield different correlations with environmental parameters. An example can be seen in Fig. 6, where each species' relative abundance is correlated to its cross-sectional area described both in terms of its 95th percentile (Fig. 6A) and in terms of its mean size (Fig. 6B). When considering the 95th percentile, a positive relation is seen for *G. inflata*, while an opposite relation is witnessed when considering mean sizes. This reinforces the relevance of choosing a size descriptor that confidently captures planktonic foraminifera size changes, as we expect to have done by using the PC1 approach.

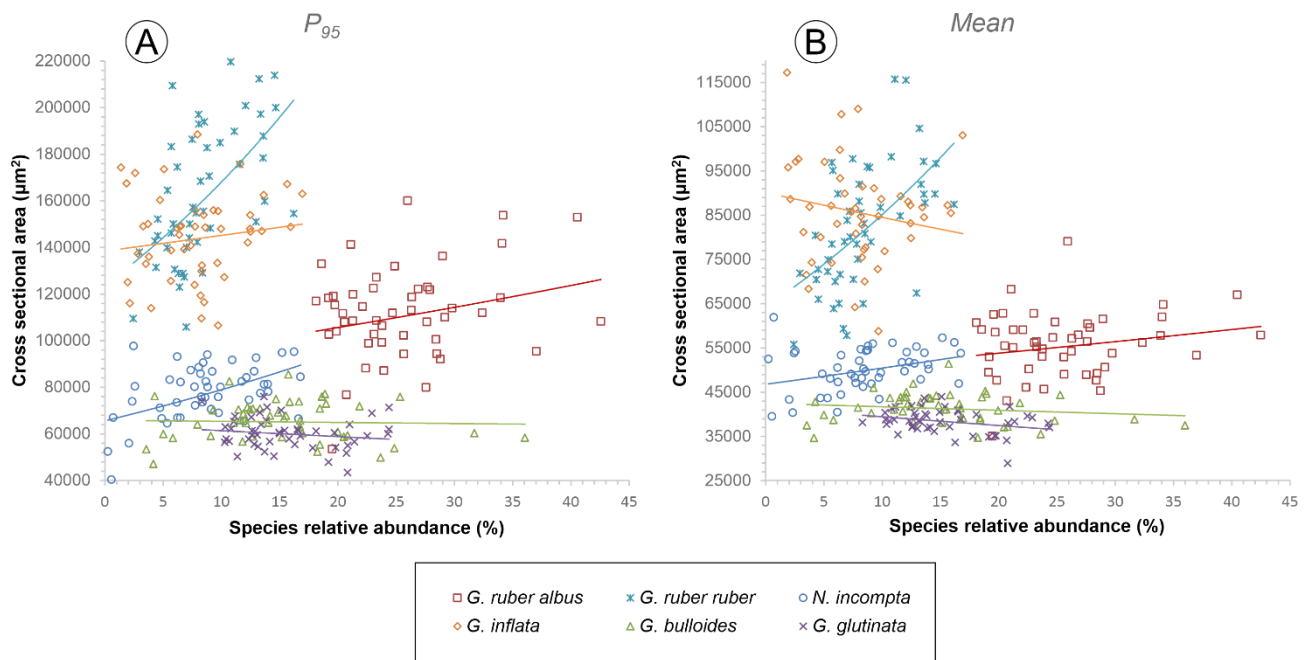


Fig. 6. Relations between species relative abundances (%) and cross-sectional area (μm^2) considering two different size descriptors: in (A) the 95th percentile (P_{95}), and in (B) the Mean size. Each taxon is represented by a different color and symbol. Note the opposite correlation between cross-sectional area and species abundances for *G. inflata* using as size descriptors the 95th percentile (positive correlation) and the mean size (negative correlation).

Finally, despite the robustness of our synthetic descriptor based on the PC1 of five different size descriptors considering cross-sectional area measurements taken for all specimens positioned in the same view, we acknowledge that one limitation of our data is given by the variable sample size, since measurements were performed on the same samples analyzed for taxonomical census counts.

5.1 The SST effect

Comparing size_{PC1} changes with $\text{SST}_{0-75\text{m}}$ estimates (Fig. 3), the lowest temperature (19.5 °C, around 40 ka) coincides with smaller sizes for all species but *G. ruber ruber*. For *G. ruber albus*, *N. incompta*, and *G. glutinata* this moment coincides with their minimum sizes. The progressive (but variable) increase in $\text{SST}_{0-75\text{m}}$ between 40

– 29 ka seems to coincide, with an also progressive increase in species' sizes (again, except for *G. ruber ruber*, which starts this trend 3 kyr later). The response of *G. ruber albus* sizes to SST variations can be explained by the species' preference for subtropical waters, despite its high adaptation to different environmental conditions (Bijma et al., 1990; Kemle-von-Mücke and Hemleben, 1999; Schiebel and Hemleben, 2017). Therefore, these conditions would not correspond to the optimal thermal range for *G. ruber albus*, which ended up displaying smaller sizes. About *N. incompta*, abundant in subpolar waters (SCHIEBEL *et al.*, 2001), its size is expected to be larger (or unaffected) at lower temperatures, however, as size does not respond only to one environmental variable, other parameters such as productivity need to be taken into account to establish their optimal conditions. In addition, Kuroyanagi and Kawahata (2004) observed, in the Japan Sea, that *N. incompta* presented the highest abundances in shallower, warmer waters with high concentrations of chlorophyll-a. Furthermore, *G. glutinata* is more abundant in subtropical to temperate waters and is mainly controlled by productivity and, for this reason, temperature alone would not be enough to explain its size variations (Bijma et al., 1992; Naidu and Malmgren, 1995; Lessa et al., 2014).

During MIS 2, *G. ruber ruber*, *N. incompta*, and *G. inflata* showed a variable but generally decreasing size trend, while *G. bulloides*' size remained relatively stable. At ~23 ka, SST_{0-75m} estimates indicate the beginning of a warming trend (up to 22.5°C), which coincides with the maximum size for *G. ruber albus*, *G. ruber ruber*, *G. bulloides*, and the minimum size for *G. inflata*. For *G. ruber ruber*, considered as a typical summer species and accepting to higher temperatures (BÉ, Allan W H; HAMLIN, 1967; KEMLE-VON MÜCKE; HEMLEBEN, 1999), the increase in size with the increase in SST_{0-75m} can be associated with the preferences of this subspecies to tropical waters (Kemle-von-Mücke and Hemleben, 1999; Schiebel and Hemleben,

2017). The increasing temperature concurrent with *G. inflata*'s minimum size agrees with its preference for transitional and subtropical waters (Boltovskoy et al., 1996; Kucera, 2007). Still, our SST_{0-75m} estimates may not be enough to explain this variation, since this species is found at greater depths of calcification (Bé, 1977; Groeneveld and Chiessi, 2011; Schiebel and Hemleben, 2017).

An increasing size trend along MIS 1 is observed for *G. inflata*, which displays its largest size coinciding with the highest SST_{0-75m} value. An opposite trend is exhibited by *G. bulloides* and *G. glutinata*, which respond to the SST_{0-75m} increase with a progressive decrease in size during MIS 1. As observed for *G. inflata* and *G. glutinata*, temperature itself would not be enough to explain *G. bulloides*' size variation, since this species is strongly controlled by food availability, therefore, being associated with high productivity conditions (Naidu and Malmgren, 1995; Conan and Brummer, 2000; Schiebel et al., 2001; Darling et al., 2017; Taylor et al., 2018).

Considering the aforementioned trends and the previously documented relation between size and temperature (e.g. Deuser et al., 1981; Schmidt et al., 2004a; Lombard et al., 2009; Davis et al., 2013), we expected size changes to be significantly correlated with SST_{0-75m} variations. However, apparent visual correlations (e.g. Nimmy et al., 2021) can mislead to assume relations where numerical/quantitative correlation tests could not give significant results. In our correlations between SST_{0-75m} and species size_{PC1} (Figure 5), only *G. ruber ruber* showed a significant correlation (0.360). Still, Rillo et al. (2020) found no significant relationship between *G. ruber* and SST. This may be a consequence of treating *G. ruber* as a single species and so the non-correlation (here shown) of *G. ruber albus* may mask the individual *G. ruber ruber* signal.

Moreover, many studies have dealt with size variations by considering entire associations rather than individual species (e.g. Peeters et al., 1999; Schmidt et al., 2003, 2004a; Di Donato et al., 2014; Hsiang et al., 2016; Todd et al., 2020). For example, Schmidt et al. (2003, 2004a) recognized the nearly linear trend in test size increasing with temperature, except where ocean fronts and upwelling lead to more stressful and productive conditions. Given the reduction in species' size typically representative of each biogeographic province from tropical to polar, the analysis of size changes for entire assemblages through time may reflect nothing but changes in species proportions related to latitudinal changes in the extent of biogeographic provinces. Also, we need to consider the scales used by each study. Schmidt et al. (2004a) analyzed core-top assemblages from all bioprovinces, thus observing size changes related to the whole range of modern SST. In contrast, our study focuses on size variations through time at a single site. Therefore, even under a large range of climatic conditions such as those from the late Quaternary, the SST range would be comparatively modest.

The combination of modest changes in SST estimates with an expected error of the method of around 1°C (MALMGREN, B. A. *et al.*, 2001) may indeed mask any relation between size and SST. In addition, our SST estimates may have been biased by planktonic foraminifera selective dissolution. As documented by Petró et al. (2021) and Suárez-Ibarra et al. (2021) samples from the late Quaternary Pelotas basin have suffered pulses of supra-lysoclinal dissolution which have been linked to enhanced productivity by Suárez-Ibarra et al. (submitted) during the glacial periods, mainly between 14 and 40 ka, as a result of the increased contribution of the Rio de la Plata plume towards the north, the increased input of silicic acid transported by SACW and stronger winds intensifying the upwelling pulses (GU *et al.*, 2017;

PEREIRA *et al.*, 2018; PORTILHO-RAMOS, R. Da *et al.*, 2019). Therefore, we cannot totally reject the influence of SST_{0-75m} on our taxa sizes.

5.2 The productivity effect

We used the *G. glutinata* relative abundance record from core SAT-048A, provided by Suárez-Ibarra *et al.* (2020), to compare species size_{PC1} variation with paleoproductivity (Fig. 3). In general, when *G. glutinata*'s relative abundance is low (suggesting low productivity), tests sizes are larger for all analyzed taxa, except for *G. bulloides*. This pattern can be easily noticed at the end of the LGM (~19 ka). Indeed, Spearman correlation analysis shows that *G. glutinata* is negatively correlated with size_{PC1} of all analyzed species, however, this correlation is only significant for *G. ruber albus*, *G. ruber ruber*, and *G. inflata*. Furthermore, the highest correlation was with *G. ruber albus*.

We also compared size_{PC1} with the benthic carbon isotope record ($\delta^{13}\text{C}_{Uvi}$) which is related to export productivity to the seafloor, where lower values are interpreted as higher productivity and higher export of organic matter rich in ^{12}C to the seafloor (Wefer *et al.*, 1999; Ravelo and Hillaire-Marcel, 2007) (Fig. 3). Although benthic $\delta^{13}\text{C}$ records have been used to reconstruct deep water mass geometry (*e.g.* Curry & Oppo, 2005), in our region, the $\delta^{13}\text{C}$ signal is strongly linked to past sea-surface productivity changes (Toledo *et al.*, 2007; Dias *et al.*, 2018; Rodrigues *et al.*, 2018). Spearman correlations between $\delta^{13}\text{C}_{Uvi}$ and size_{PC1} were positive and ≥ 0.3 for all species except *G. bulloides* and *G. glutinata*, which did not show significant correlations (Fig. 5a). As with the correlation between size_{PC1} and *G. glutinata* (%), *G. ruber ruber* and *G. ruber albus* showed the highest correlations.

Unlike SST, size_{PC1} of all the analyzed taxa except *G. bulloides* and *G. glutinata* showed a significant correlation with productivity indicators (Fig. 5a). At times of

higher productivity, symbiont-bearing species (*G. ruber albus* and *G. ruber ruber*) show a decrease in size. This decrease may be associated with the need for light to carry out metabolic activities (Bijma et al., 1990; Kemle-von-Mücke and Hemleben, 1999). Therefore, the attenuation of light by the increase in the amount of suspended matter ends up inhibiting the photosynthesizing activity which, in turn, causes a decrease in the host's respiration rate, resulting in smaller tests (BIJMA et al., 1992). This means that despite the greater availability of nutrients (inferred by Pereira et al., 2018 and Portilho-Ramos et al., 2019; Frozza et al., 2020), during the glacial period caused by the intensification of upwelling mechanisms during austral summer and by the continuous presence of the Rio de la Plata plume waters during winter, *G. ruber albus* and *G. ruber ruber*, did not respond with larger sizes due to the inhibition of symbiont photosynthesis. Therefore, under more productive conditions, symbiont bearing species such as *G. ruber* show a tendency of decreasing size tests.

During upwelling events, opportunistic species adapt better, reaching their highest relative abundances (Chiessi et al., 2007; Souto et al., 2011; Lessa et al., 2014). High relative abundances have been interpreted as optimum ecological (WEINKAUF, M. F.G. et al., 2013) where large sizes would be expected (Schmidt et al., 2004b; Moller et al., 2013). However, opportunistic species develop quickly but do not necessarily reach larger sizes. That would explain why *G. bulloides* and *G. glutinata*, both symbiont-barren species whose abundance is controlled by the availability of food do not show a correlation between their size and productivity (Fig. 5b).

Under upwelling conditions, considering that a greater input of nutrients results in an increase in local primary productivity and that during these episodes a decrease in SST is also observed, the relative abundance of the dominant species *G. ruber* also decreases due to lower temperatures. However, in our case, the decrease in SST is not drastic and, therefore, in terms of species richness, there is no significant change

between oligotrophic and eutrophic conditions. Instead, there is a shift in the dominant species. Thus, these changes do not substantially affect diversity either, and for this reason, we can partly explain the lack of correlation between biotic parameters and size_{PC1} (Fig. 5a). The relationship between productivity, temperature, and size, as already demonstrated by Rillo et al. (2020), is not sufficient to explain the variation in size between different species.

As a high productivity effect, the bottom dissolution should be considered. In our analysis, the size of the taxa showed the highest correlations with the dissolution indicators (CaCO₃ content and PF/g, Fig. 5a), except for *N. incompta*, the most dissolution resistant species, according to Petró et al. (2018)'s planktonic foraminifera solubility ranking for the western South Atlantic. It was observed that CaCO₃ (%) displayed moderate to strong significant correlations with size_{PC1} (except *N. incompta*), while PF/g showed low to moderate correlations (except *G. inflata* and *N. incompta*). When significant, these correlations always revealed smaller sizes with higher productivity and increased dissolution. This raises the question of what exactly controlled size changes: i) is it a paleoecological (in this case productivity) signal related to sea surface environmental conditions that controls the maximum size that tests can develop; or ii) are sizes significantly influenced by taphonomical damage caused by dissolution on the seabed. This question is difficult to answer, especially considering the evidence provided by Suárez-Ibarra et al. (submitted) of significant dissolution at this specific location of the western South Atlantic triggered by increased productivity. Such coupling between sea surface productivity (*G. glutinata* %), organic matter exportation to the seafloor ($\delta^{13}\text{C}_{Uvi}$), and dissolution (CaCO₃ content and PF/g) at the seafloor can be seen in Fig. 3H-K.

The fact that *N. incompta* corresponds to the most dissolution resistant species for the western South Atlantic (PETRÓ; PIVEL; COIMBRA, 2018), along with no

significant correlation between its size_{PC1} and dissolution proxies, supports the idea that dissolution modified other taxa sizes. However, also according to the classification by Petró et al. (2018), none of the analyzed taxa is particularly susceptible to dissolution: *G. bulloides* and *G. ruber albus* have low solubility, while *G. inflata*, *G. ruber ruber*, and *G. glutinata* have moderate solubility. Thus, with taxa with low to moderate solubility, we could expect an ecological signal rather than a taphonomic signal related to the preservation of the tests in our data. However, despite Petró et al.'s, (2018) classification of *G. ruber* as a dissolution-resistant taxon based on experimental analysis of samples from the western South Atlantic, there is a high discrepancy among rankings regarding this species' susceptibility to dissolution (Berger, 1970; Adelseck, 1977; Thunell and Honjo, 1981; Boltovskoy and Totah, 1992). In addition, the absence of a significant correlation between *N. incompta* size_{PC1} and dissolution would suggest greater resistance to the latter one, calling attention to the possible no linear relation between the categories of Petró et al. (2018) dissolution ranking. Anyhow, during the "screening" of the tests, it was possible to observe, especially in *G. ruber ruber*, some marks left by the loss of the last chamber, which is thinner and more fragile, leaving only scars of its presence (Fig. 7). The loss of the final chamber in *G. ruber* can be facilitated by large secondary openings that reduce its contact surface between chambers, decreasing its resistance. In the remaining analyzed taxa, those scars were apparently rare. For this question, we recommend future studies seeking to clarify and quantify how and how much dissolution may have affected the observed sizes through detailed analysis of the test surface and scars left on them by the eventual chamber loss.

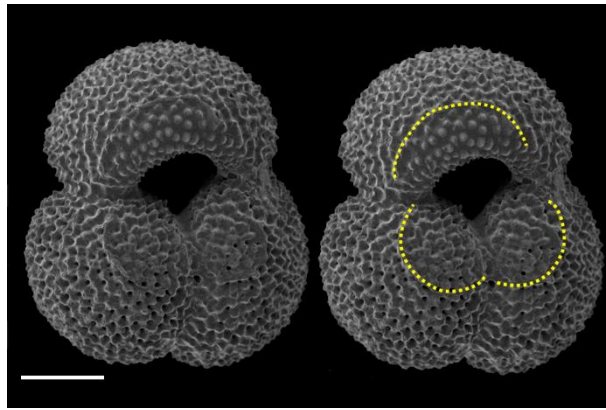


Fig. 7. MEV image of a *G. ruber* test taken from core SAT-048 displaying scars where the last chamber may have been attached to. Scale-bar: 100 μ m.

6. Conclusions

This work contributes to a better understanding of the environmental factors that control planktonic foraminifera test sizes by studying a record from the Pelotas Basin, a transitional zone that experiences large environmental gradients that have strongly varied through the late Quaternary.

Considering that each taxon has its own environmental preferences and responds differently to various environmental stimuli, each of the six taxa analyzed presented a distinct size variation curve over the last 43 kyr. These size variations were not correlated with SST although it is possible that if size analyzes had been performed for entire assemblages, they would have shown a correlation with SST. Still, this relationship may arise only when considering a wider temperature range.

In our study, size changes were linked to productivity conditions and dissolution, both processes being directly related. This means that sizes cannot be confidently used to infer surface productivity alone as they may have been potentially affected by local dissolution, even in the case of resistant species. The role of dissolution as a

dominant factor controlling planktonic foraminifer size changes must be considered since the analyzed core comes from a highly productive region and, therefore, experienced intervals of higher dissolution rates (mainly during glacial periods) as demonstrated by Suárez-Ibarra (submitted).

Additionally, given the high dissolution rates, we cannot completely rule out the relation between SST and tests sizes, since the SST estimated by the MAT may have been affected by selective dissolution of species within assemblages. To confirm the lack of significant correlation between size and temperature, another SST proxy not affected by calcium carbonate dissolution, such as alkenones, could be used.

We also saw that, in the case of opportunistic species such as *G. bulloides* and *G. glutinata*, the ecological optimum, inferred by higher relative abundances, does not translate into larger sizes. Additionally, in our study, biotic parameters were not correlated with sizes, since between more productive and less productive conditions, there are no major changes in the diversity of assemblages, only changing the dominant species, for instance from *G. bulloides* under eutrophic conditions to *G. ruber* under oligotrophic conditions.

Acknowledgements

The authors thank the Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel (CAPES) for supporting the IODP Program and for financial support through Grant 88887.091727/2014-01. We thank Prof. Fernando Erthal (DPE-IGEO-UFRGS) and Prof. Manuel F.G. Weinkauff (Univerzita Karlova) for important insights during the early preparation of the analysis. IV thanks the CAPES for her master's degree scholarship. CFF thanks the CNPq for her PhD scholarship. JYSI thanks the STARS program for his PhD scholarship.

7. References

- Abdi, H., Williams, L.J., 2010. Principal component analysis. *Wiley Interdiscip. Rev. Comput. Stat.* 2, 433–459. <https://doi.org/10.1002/wics.101>
- Abràmoff, M.D., Magalhães, P.J., Ram, S.J., 2004. Image processing with ImageJ Part II. *Biophotonics Int.* 11, 36–43.
- Abramovich, S., Keller, G., 2003. Planktonic foraminiferal response to the latest Maastrichtian abrupt warm event: A case study from South Atlantic DSDP Site 525A. *Mar. Micropaleontol.* 48, 225–249. [https://doi.org/10.1016/S0377-8398\(03\)00021-5](https://doi.org/10.1016/S0377-8398(03)00021-5)
- Adelseck, C.G., 1977. Dissolution of deep-sea carbonate: preliminary calibration of preservational and morphologic aspects. *Deep Sea Res.* 24, 1167–1170. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0146-6291\(77\)90520-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0146-6291(77)90520-3)
- Aurahs, R., Treis, Y., Darling, K., Kucera, M., 2011. A revised taxonomic and phylogenetic concept for the planktonic foraminifer species *Globigerinoides ruber* based on molecular and morphometric evidence. *Mar. Micropaleontol.* 79, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2010.12.001>
- Bé, A.W., 1967. Foraminifera families: Globigerinidae and Globorotaliidae. *Conseil Permanent International pour l'exploration de la mer. Zooplankt. Sheet* 108, 1–9.
- Bé, A.W.H., Hamlin, W.H., 1967. Ecology of Recent planktonic foraminifera. *Micropaleontology* 13, 87–106.
- Bé, A.W.H., Hemleben, C., Anderson, O.R., Spindler, M., Hacunda, J., Tuntivate-Choy, S., 1977. Laboratory and Field Observations of Living Planktonic Foraminifera. *Micropaleontology* 23, 155. <https://doi.org/10.2307/1485330>
- Berger, W.H., 1970. Planktonic Foraminifera: Selective solution and the lysocline. *Mar. Geol.* 8, 111–138. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0025-3227\(70\)90001-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0025-3227(70)90001-0)
- Bijma, J., Faber, W.W., Hemleben, C., 1990. Temperature and salinity limits for growth and

survival of some planktonic foraminifers in laboratory cultures. *J. Foraminifer. Res.* 20, 95–116. <https://doi.org/10.2113/gsjfr.20.2.95>

Bijma, J., Hemleben, C., Oberhaensli, H., Spindler, M., 1992. The effects of increased water fertility on tropical spinose planktonic foraminifers in laboratory cultures. *J. Foraminifer. Res.* 22, 242–256. <https://doi.org/10.2113/gsjfr.22.3.242>

Birch, H.S., Coxall, H.K., Pearson, P.N., 2012. Evolutionary ecology of Early Paleocene planktonic foraminifera: size, depth habitat and symbiosis. *Paleobiology* 38, 374–390. <https://doi.org/10.1666/11027.1>

Bolli, H.M., Saunders, J.B., 1989. Oligocene to Holocene low latitude planktic foraminifera, in: Bolli, Hans M., Saunders, John B., Perch-Nielsen, K. (Eds.), *Plankton Stratigraphy*. Cambridge University Press, pp. 155–179.

Boltovskoy, E., Boltovskoy, D., Correa, N., Brandini, F., 1996. Planktic foraminifera from the southwestern Atlantic (30°-60°S): Species-specific patterns in the upper 50 m. *Mar. Micropaleontol.* 28, 53–72. [https://doi.org/10.1016/0377-8398\(95\)00076-3](https://doi.org/10.1016/0377-8398(95)00076-3)

Boltovskoy, E., Totah, V.I., 1992. Preservation index and preservation potential of some foraminiferal species: *J. Foraminifer. Res.* 22, 267–273.

Boyer, T.P., Garcia, H.E., Locarnini, R.A., Zweng, M.M., Mishonov, A. V, Reagan, J.R., Weathers, K.A., Baranova, O.K., Seidov, D., Smolyar, I. V, 2018. *World Ocean Atlas 2018*. NOAA Natl. Centers Environ. Inf. URL <https://accession.nodc.noaa.gov/NCEI-WOA18>

Brombacher, A., Elder, L.E., Hull, P.M., Wilson, P.A., Ezard, T.H.G., 2018. Calibration of test diameter and area as proxies for body size in the planktonic foraminifer *globobulimina* *puncticulata*. *J. Foraminifer. Res.* 48, 241–245. <https://doi.org/10.2113/gsjfr.48.3.241>

Brombacher, A., Wilson, P.A., Ezard, T.H.G., 2017. Calibration of the repeatability of foraminiferal test size and shape measures with recommendations for future use. *Mar. Micropaleontol.* 133, 21–27. <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2017.05.003>

Burke, J.E., Renema, W., Henehan, M.J., Elder, L.E., Davis, C. V., Maas, A.E., Foster, G.L.,

- Schiebel, R., Hull, P.M., 2018. Factors influencing test porosity in planktonic foraminifera. *Biogeosciences* 15, 6607–6619. <https://doi.org/10.5194/bg-15-6607-2018>
- Chiessi, C.M., Ulrich, S., Mulitza, S., Pätzold, J., Wefer, G., 2007. Signature of the Brazil-Malvinas Confluence (Argentine Basin) in the isotopic composition of planktonic foraminifera from surface sediments. *Mar. Micropaleontol.* 64, 52–66. <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2007.02.002>
- Conan, S.H., Brummer, G.J.A., 2000. Fluxes of planktic foraminifera in response to monsoonal upwelling on the Somalia Basin margin. *Deep. Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.* 47, 2207–2227. [https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(00\)00022-9](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(00)00022-9)
- Darling, K.F., Wade, C.M., 2008. The genetic diversity of planktic foraminifera and the global distribution of ribosomal RNA genotypes. *Mar. Micropaleontol.* 67, 216–238. <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2008.01.009>
- Darling, K.F., Wade, C.M., Siccha, M., Trommer, G., Schulz, H., Abdolalipour, S., Kurasawa, A., 2017. Genetic diversity and ecology of the planktonic foraminifers *Globigerina bulloides*, *Turborotalita quinqueloba* and *Neogloboquadrina pachyderma* off the Oman margin during the late SW Monsoon. *Mar. Micropaleontol.* 137, 64–77. <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2017.10.006>
- Davis, C. V., Badger, M.P.S., Bown, P.R., Schmidt, D.N., 2013. The response of calcifying plankton to climate change in the Pliocene. *Biogeosciences* 10, 6131–6139. <https://doi.org/10.5194/bg-10-6131-2013>
- Davis, C. V., Livsey, C.M., Palmer, H.M., Hull, P.M., Thomas, E., Hill, T.M., Benitez-Nelson, C.R., 2020. Extensive morphological variability in asexually produced planktic foraminifera. *Sci. Adv.* 6, 1–7. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abb8930>
- Deuser, W.G., Ross, E.H., Hemleben, C., Spindler, M., 1981. Seasonal changes in species composition, numbers, mass, size, and isotopic composition of planktonic foraminifera settling into the deep sargasso sea. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 33, 103–127.

[https://doi.org/10.1016/0031-0182\(81\)90034-1](https://doi.org/10.1016/0031-0182(81)90034-1)

Di Donato, V., Daunis-i-Estadella, J., Martín-Fernández, J.A., Esposito, P., 2014. Size Fraction Effects on Planktonic Foraminifera Assemblages : A Compositional Contribution to the Golden Sieve Rush. *Math. Geosci.* 47, 455–470. <https://doi.org/10.1007/s11004-014-9529-y>

Dias, B.B., Barbosa, C.F., Faria, G.R., Seoane, J.C.S., Albuquerque, A.L.S., 2018. The effects of multidecadal-scale phytodetritus disturbances on the benthic foraminiferal community of a Western Boundary Upwelling System, Brazil. *Mar. Micropaleontol.* 139, 102–112. <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2017.12.003>

Duque-Castaño, M.L., Leonhardt, A., Pivel, M.A.G., 2019. Morphometric analysis in the shells of the planktonic foraminifera *Orbulina universa*: a source for paleoceanographic information? *Brazilian J. Oceanogr.* 67, 134–142. <https://doi.org/10.1590/s1679-87592019025206701>

Frezza, C.F., Pivel, M.A.G., Suárez-Ibarra, J.Y., Ritter, M.N., Coimbra, J.C., 2020. Bioerosion on Late Quaternary Planktonic Foraminifera Related to Paleoproductivity in the Western South Atlantic. *Paleoceanogr. Paleoclimatology* 35, 1–16. <https://doi.org/10.1029/2020PA003865>

Gordon, A.L., 1989. Brazil-Malvinas Confluence-1984. *Deep Sea Res. Part A, Oceanogr. Res. Pap.* 36. [https://doi.org/10.1016/0198-0149\(89\)90042-3](https://doi.org/10.1016/0198-0149(89)90042-3)

Groeneveld, J., Chiessi, C.M., 2011. Mg/Ca of *Globorotalia inflata* as a recorder of permanent thermocline temperatures in the South Atlantic. *Paleoceanography* 26, 1–12. <https://doi.org/10.1029/2010PA001940>

Gu, F., Zonneveld, K.A.F., Chiessi, C.M., Arz, H.W., Pätzold, J., Behling, H., 2017. Long-term vegetation, climate and ocean dynamics inferred from a 73,500 years old marine sediment core (GeoB2107-3) off southern Brazil. *Quat. Sci. Rev.* 172, 55–71. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.06.028>

- Hammer, Ø., Harper, D.A.T., Ryan, P.D., 2001. Past: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontol. Electron.* 4, 1–9.
- Hart, M.B., Hylton, M.D., Oxford, M.J., Price, G.D., Hudson, W., Smart, C.W., 2003. The search for the origin of the planktic Foraminifera. *J. Geol. Soc. London.* 160, 341–343. <https://doi.org/10.1144/0016-764903-003>
- Hemleben, C., Spindler, M., Anderson, O.R., 1989. *Modern Planktonic Foraminifera*. Springer New York, New York, NY. <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3544-6>
- Hsiang, A.Y., Elder, L.E., Hull, P.M., 2016. Towards a morphological metric of assemblage dynamics in the fossil record: a test case using planktonic foraminifera. *Philos. Trans. R. Soc. B* 371, 1–24. <https://doi.org/https://doi.org/10.1098/rstb.2015.0227>
- Hutson, W.H., 1980. The Agulhas Current During the Late Pleistocene: Analysis of Modern Faunal Analogs. *Science (80-)*. 207, 64–66.
- Kaiho, K., Takeda, K., Petrizzo, M.R., Zachos, J.C., 2006. Anomalous shifts in tropical Pacific planktonic and benthic foraminiferal test size during the Paleocene-Eocene thermal maximum. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 237, 456–464. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2005.12.017>
- Kemle-von Mücke, S., Hemleben, C., 1999. Foraminifera, in: Boltovskoy, D. (Ed.), *South Atlantic Zooplankton*. Backhuys Publishers, pp. 43–73.
- Kucera, M., 2007. Planktonic Foraminifera as Tracers of Past Oceanic Environments, in: Hillaire-Marcel, C.A. de V. (Ed.), *Proxies in Late Cenozoic Paleoceanography*. Elsevier, Amsterdam, pp. 213–254.
- Kucera, M., Malmgren, B.A., 1998. Terminal Cretaceous warming event in the mid-latitude South Atlantic Ocean: Evidence from poleward migration of *Contusotruncana contusa* (planktonic foraminifera) morphotypes. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 138, 1–15. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(97\)00124-7](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(97)00124-7)
- Kuroyanagi, A., Kawahata, H., 2004. Vertical distribution of living planktonic foraminifera in

- the seas around Japan. *Mar. Micropaleontol.* 53, 173–196.
<https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2004.06.001>
- Lessa, D. de O.V., Portilho-Ramos, R., Barbosa, C.F., Silva, A.R. da, Belem, A., Turcq, B., Albuquerque, A.L., 2014. Planktonic foraminifera in the sediment of a western boundary upwelling system off Cabo Frio, Brazil. *Mar. Micropaleontol.* 106, 55–68.
<https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2013.12.003>
- Locarnini, R.A., Mishonov, A.V., Antonov, J.I., Boyer, T.P., Garcia, H.E., Baranova, O.K., Zweng, M.M., Paver, C.R., Reagan, J.R., Johnson, D.R., Hamilton, M., Seidov, D., 2013. Volume 1: Temperature, in: Levitus, S., Mishonov, A. (Eds.), *World Ocean Atlas 2013*. NOAA Atlas NESDIS 73, p. 40.
- Lombard, F., Labeyrie, L., Michel, E., Spero, H.J., Lea, D.W., 2009. Modelling the temperature dependent growth rates of planktic foraminifera. *Mar. Micropaleontol.* 70, 1–7.
<https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2008.09.004>
- Malmgren, B., Healy-Williams, N., 1978. Variation in test diameter of *Orbulina universa* in the paleoclimatology of the late Quaternary of the Gulf of Mexico. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 25, 235–240.
- Malmgren, B.A., Kucera, M., Nyberg, J., Waelbroeck, C., 2001. Comparison of statistical and artificial neural network techniques for estimating past sea surface temperatures from planktonic foraminifer census data. *Paleoceanography* 16, 520–530.
<https://doi.org/doi.org/10.1029/2000PA000562>
- Marshall, B.J., Thunell, R.C., Spero, H.J., Henehan, M.J., Lorenzoni, L., Astor, Y., 2015. Morphometric and stable isotopic differentiation of *Orbulina universa* morphotypes from the Cariaco Basin, Venezuela. *Mar. Micropaleontol.* 120, 46–64.
<https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2015.08.001>
- Möller, O.O., Piola, A.R., Freitas, A.C., Campos, E.J.D., 2008. The effects of river discharge and seasonal winds on the shelf off southeastern South America. *Cont. Shelf Res.* 28, 1607–

1624. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2008.03.012>

Moller, T., Schulz, H., Kucera, M., 2013. The effect of sea surface properties on shell morphology and size of the planktonic foraminifer *Neogloboquadrina pachyderma* in the North Atlantic. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 391, 34–48. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2011.08.014>

Morard, R., Füllberg, A., Brummer, G.J.A., Greco, M., Jonkers, L., Wizemann, A., Weiner, A.K.M., Darling, K., Siccha, M., Ledevin, R., Kitazato, H., De Garidel-Thoron, T., De Vargas, C., Kucera, M., 2019. Genetic and morphological divergence in the warm-water planktonic foraminifera genus *Globigerinoides*. *PLoS One* 14, 1–30. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0225246>

Nagai, R.H., Sousa, S.H. de M. e, Lourenço, R.A., Bícigo, M.C., Mahiques, M.M. de, 2010. Paleoproductivity Changes During the Late Quaternary in the Southeastern. *Brazilian J. Oceanogr.* 58, 31–41.

Naidu, P.D., Malmgren, B.A., 1995. Monsoon upwelling effects on test size of some planktonic foraminiferal species from the Oman Margin, Arabian Sea. *Paleoceanography* 10, 117–122. <https://doi.org/10.1029/94PA02682>

Nimmy, P.M., Rao, N.R., Neelavannan, K., Hussain, S.M., Mahapatra, S.R., 2021. The coupling of *Orbulina universa* diameter with the warming and cooling events in the Arabian Sea over the past 40,000 years. *Curr. Sci.* 120, 694–698. <https://doi.org/10.18520/cs/v120/i4/694-698>

Ortiz, J.D., Mix, A.C., Collier, R.W., 1995. Environmental control of living symbiotic and asymbiotic foraminifera of the California Current. *Paleoceanography* 10, 987–1009. <https://doi.org/10.1029/95PA02088>

Palma, E.D., Matano, R.P., 2009. Disentangling the upwelling mechanisms of the South Brazil Bight. *Cont. Shelf Res.* 29, 1525–1534. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2009.04.002>

Peeters, F., Ivanova, E., Conan, S., Brummer, G., Ganssen, G., Troelstra, S., Hinte, J. Van,

1999. A size analysis of planktic foraminifera from the Arabian Sea. *Mar. Micropaleontol.* 36, 31–63. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0377-8398\(98\)00026-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0377-8398(98)00026-7)

Pereira Brandini, F., Nogueira, M., Simião, M., Carlos Ugaz Codina, J., Almeida Noernberg, M., 2014. Deep chlorophyll maximum and plankton community response to oceanic bottom intrusions on the continental shelf in the South Brazilian Bight. *Cont. Shelf Res.* 89, 61–75. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2013.08.002>

Pereira, L.S., Arz, H.W., Pätzold, J., Portilho-Ramos, R.C., 2018. Productivity Evolution in the South Brazilian Bight During the Last 40,000 Years. *Paleoceanogr. Paleoclimatology* 33, 1339–1356. <https://doi.org/10.1029/2018PA003406>

Peterson, R.G., Stramma, L., 1991. Upper-level circulation in the South Atlantic Ocean. *Prog. Oceanogr.* 26, 1–73. [https://doi.org/10.1016/0079-6611\(91\)90006-8](https://doi.org/10.1016/0079-6611(91)90006-8)

Petró, S.M., Pivel, M.A.G., Coimbra, J.C., 2021. Evidence of supra-lysoclinal dissolution of pelagic calcium carbonate in the late Quaternary in the western South Atlantic. *Mar. Micropaleontol.* 166, 102013. <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2021.102013>

Petró, S.M., Pivel, M.A.G., Coimbra, J.C., 2018. Foraminiferal Solubility Rankings: a Contribution To the Search For Consensus. *J. Foraminifer. Res.* 48, 301–313. <https://doi.org/10.2113/gsjfr.48.4.301>

Pimenta, F.M., Campos, E.J.D., Miller, J.L., Piola, A.R., 2005. A numerical study of the Plata River plume along the southeastern South American continental shelf. *Brazilian J. Oceanogr.* 53, 129–146. <https://doi.org/10.1590/s1679-87592005000200004>

Piola, A.R., Matano, R.P., 2009. Brazil and Falklands (Malvinas) Currents, in: Steele, John H.; Thorpe, Steve A.; Turekian, K.K. (Ed.), *Ocean Currents*. Elsevier Ltd, London, p. 627.

Piola, A.R., Matano, R.P., Palma, E.D., Möller, O.O., Campos, E.J.D., 2005. The influence of the Plata River discharge on the western South Atlantic shelf. *Geophys. Res. Lett.* 32, 1–4. <https://doi.org/10.1029/2004GL021638>

Portilho-Ramos, R. da, Pinho, T., Chiessi, C., Barbosa, C., 2019. Understanding the

mechanisms behind high glacial productivity in the southern Brazilian margin. *Clim. Past Discuss.* 15, 943–955. <https://doi.org/10.5194/cp-2018-98>

Ravelo, A.C., Hillaire-Marcel, C., 2007. The use of oxygen and carbon isotopes of foraminifera in paleoceanography, in: Hillaire–Marcel, C.A. de V. (Ed.), *Proxies in Late Cenozoic Paleoceanography*. Elsevier, Amsterdam, pp. 735–764.

Renaud, S., Schmidt, D.N., 2003. Habitat tracking as a response of the planktic foraminifer *Globorotalia truncatulinoides* to environmental fluctuations during the last 140 kyr. *Mar. Micropaleontol.* 49, 97–122. [https://doi.org/10.1016/S0377-8398\(03\)00031-8](https://doi.org/10.1016/S0377-8398(03)00031-8)

Rillo, M.C., Miller, C.G., Kucera, M., Ezard, T.H.G., 2020. Intraspecific size variation in planktonic foraminifera cannot be consistently predicted by the environment. *Ecol. Evol.* 10, 11579–11590. <https://doi.org/10.1002/ece3.6792>

Rillo, M.C., Sugawara, M.T.C., Cabella, B., Jonkers, L., Baranowski, U.K., Kučera, M., Ezard, T.H.G., 2019. On the mismatch in the strength of competition among fossil and modern species of planktonic Foraminifera. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 28, 1866–1878. <https://doi.org/10.1111/geb.13000>

Rodrigues, A.R., Pivel, M.A.G., Schmitt, P., de Almeida, F.K., Bonetti, C., 2018. Infaunal and epifaunal benthic foraminifera species as proxies of organic matter paleofluxes in the Pelotas Basin, south-western Atlantic Ocean. *Mar. Micropaleontol.* 144, 38–49. <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2018.05.007>

Rodrigues, R.R., Lorenzetti, J.A., 2001. A numerical study of the effects of bottom topography and coastline geometry on the Southeast Brazilian coastal upwelling. *Cont. Shelf Res.* 21, 371–394. [https://doi.org/10.1016/S0278-4343\(00\)00094-7](https://doi.org/10.1016/S0278-4343(00)00094-7)

Schiebel, R., Hemleben, C., 2017. Planktic foraminifers in the modern ocean, *Planktic Foraminifers in the Modern Ocean*. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-50297-6>

Schiebel, R., Waniek, J., Bork, M., Hemleben, C., 2001. Planktic foraminiferal production stimulated by chlorophyll redistribution and entrainment of nutrients. *Deep. Res. Part I*

Oceanogr. Res. Pap. 48, 721–740. [https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(00\)00065-0](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(00)00065-0)

Schlitzer, R., 2021. Ocean Data View.

Schmidt, D.N., Caromel, A.G.M., Seki, O., Rae, J.W.B., Renaud, S., 2016. Morphological response of planktic foraminifers to habitat modifications associated with the emergence of the Isthmus of Panama. *Mar. Micropaleontol.* 128, 28–38. <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2016.08.003>

Schmidt, D.N., Renaud, S., Bollmann, J., 2003. Response of planktic foraminiferal size to late Quaternary climate change. *Paleoceanography* 18, n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2002PA000831>

Schmidt, D.N., Thierstein, H.R., Bollmann, J., 2004a. The evolutionary history of size variation of planktic foraminiferal assemblages in the Cenozoic. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 212, 159–180. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2004.06.002>

Schmidt, D.N., Renaud, S., Bollmann, J., Schiebel, R., Thierstein, H.R., 2004b. Size distribution of Holocene planktic foraminifer assemblages: biogeography, ecology and adaptation. *Mar. Micropaleontol.* 50, 319–338. [https://doi.org/10.1016/S0377-8398\(03\)00098-7](https://doi.org/10.1016/S0377-8398(03)00098-7)

Siccha, M., Kucera, M., 2017. Data Descriptor: ForCenS, a curated database of planktonic foraminifera census counts in marine surface sediment samples. *Sci. Data* 4, 1–12. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.109>

Silveira, I.C.A. da, Schmidt, A.C.K., Campos, E.J.D., Godoi, S.S. de, Ikeda, Y., 2000. A corrente do Brasil ao largo da costa leste brasileira. *Brazilian J. Oceanogr.* 48, 171–183. <https://doi.org/10.1590/s1679-87592000000200008>

Sousa, S.H.M., de Godoi, S.S., Amaral, P.G.C., Vicente, T.M., Martins, M.V.A., Sorano, M.R.G.S., Gaeta, S.A., Passos, R.F., Mahiques, M.M., 2014. Distribution of living planktonic foraminifera in relation to oceanic processes on the southeastern continental Brazilian margin (23°S-25°S and 40°W-44°W). *Cont. Shelf Res.* 89, 76–87.

<https://doi.org/10.1016/j.csr.2013.11.027>

Souto, D.D., de Oliveira Lessa, D.V., Albuquerque, A.L.S., Sifeddine, A., Turcq, B.J., Barbosa, C.F., 2011. Marine sediments from southeastern Brazilian continental shelf: A 1200year record of upwelling productivity. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 299, 49–55. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2010.10.032>

Suárez-Ibarra, J.Y., Frozza, C.F., Petró, S.M., Pivel, M.A.G., 2021. Fragment or broken? Improving the planktonic foraminifera fragmentation assessment. *Palaios* 36, 165–172. <https://doi.org/10.2110/palo.2020.062>

Suárez-Ibarra, J.Y., Frozza, C.F., Petró, S.M., Palhano, P.L., Pivel, M.A.G., (submitted). Calcium carbonate dissolution triggered by high productivity during the last glacial-interglacial interval at the deep western South Atlantic. *Paleoceanogr. Paleoclimatology* 1–27.

Taylor, B.J., Rae, J.W.B., Gray, W.R., Darling, K.F., Burke, A., Gersonde, R., Abelmann, A., Maier, E., Esper, O., Ziveri, P., 2018. Distribution and ecology of planktic foraminifera in the North Pacific: Implications for paleo-reconstructions. *Quat. Sci. Rev.* 191, 256–274. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2018.05.006>

Thunell, R.C., Honjo, S., 1981. Calcite dissolution and the modification of planktonic foraminiferal assemblages. *Mar. Micropaleontol.* 6, 169–182. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0377-8398\(81\)90004-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0377-8398(81)90004-9)

Todd, C.L., Schmidt, D.N., Robinson, M.M., De Schepper, S., 2020. Planktic Foraminiferal Test Size and Weight Response to the Late Pliocene Environment. *Paleoceanogr. Paleoclimatology* 35, 1–15. <https://doi.org/10.1029/2019PA003738>

Toledo, F.A.L., Cachão, M., Costa, K.B., Pivel, M.A.G., 2007. Planktonic foraminifera, calcareous nannoplankton and ascidian variations during the last 25 kyr in the Southwestern Atlantic: A paleoproductivity signature? *Mar. Micropaleontol.* 64, 67–79. <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2007.03.001>

Wade, B.S., Olsson, R.K., 2009. Investigation of pre-extinction dwarfing in Cenozoic

planktonic foraminifera. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 284, 39–46. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2009.08.026>

Wade, B.S., Poole, C.R., Boyd, J.L., 2016. Giantism in oligocene planktonic foraminifera *paragloborotalia opima*: Morphometric constraints from the equatorial pacific ocean. *Newsletters Stratigr.* 49, 421–444. <https://doi.org/10.1127/nos/2016/0270>

Wefer, G., Berger, W.H., Bijma, J., Fischer, G., 1999. Clues to Ocean History: a Brief Overview of Proxies, in: Fischer, G., Wefer, G. (Eds.), *Use of Proxies in Paleoceanography*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 1–68. https://doi.org/doi.org/10.1007/978-3-642-58646-0_1

Weiner, A.K.M., Weinkauf, M.F.G., Kurasawa, A., Darling, K.F., Kucera, M., 2015. Genetic and morphometric evidence for parallel evolution of the *Globigerinella calida* morphotype. *Mar. Micropaleontol.* 114, 19–35. <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2014.10.003>

Weinkauf, M.F.G., Bonitz, F.G.W., Martini, R., Kučera, M., 2019. An extinction event in planktonic Foraminifera preceded by stabilizing selection. *PLoS One* 14, 1–21. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0223490>

Weinkauf, M.F.G., Moller, T., Koch, M.C., Kučera, M., 2013. Calcification intensity in planktonic Foraminifera reflects ambient conditions irrespective of environmental stress. *Biogeosciences* 10, 6639–6655. <https://doi.org/10.5194/bg-10-6639-2013>

Zarkogiannis, S., Kontakiotis, G., Antonarakou, A., 2020. Recent planktonic foraminifera population and size response to Eastern Mediterranean hydrography. *Rev. Micropaleontol.* 69, 100450. <https://doi.org/10.1016/j.revmic.2020.100450>

Data reference

[dataset] Suárez-Ibarra, Jaime Yesid; Petró, Sandro Monticelli; Frozza, Cristiane Fraga; Freire, Tiago Menezes; Pivel, Maria Alejandra G (2020): Planktonic Foraminifera assemblages from sediment core SAT-048A. PANGAEA, <https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.924469>

Supplementary material

Supporting Information for

Planktonic foraminifera test size fluctuations in response to paleoceanographic changes in the western South Atlantic: an ecological or taphonomical imprint?

Ingrid Vieira^{a*}, Jaime Y. Suárez-Ibarra^b, Cristiane F. Frozza^a, Maria A.G. Pivel^{a,c}

^aPrograma de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves, 9500, Cx. P. 15001, 91501-970, Porto Alegre, RS, Brazil.

*corresponding author

^bÚstav geologie a paleontologie, Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova, Albertov 6, Praha, Czech Republic

^cInstituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves, 9500, Cx. P. 15001, 91501-970, Porto Alegre, RS, Brazil.

Contents of this file

Tables S1 to S2

Figure S1

Appendix S1

Introduction

The present Supporting Information file presents data and explanation of age model construction (Tables S1 and S2, Figure S1), as well as the appendix of planktonic Foraminifera species (Appendix S1).

Age model

The AMS ¹⁴C results of core SAT-048A (Frozza et al., 2020) are shown in Table S1. The Marine Reservoir Correction Database (Delta R= -85 +/-40) is based on ages from Nadal de Masi (1999), Angulo et al. (2005), and Alves et al. (2015). Rbacon

package (Blaauw & Christen, 2011; version 2.4.2), for open source R software (R Core Team, 2020), used the calibration curve Marine20 (Heaton et al., 2020).

Table S1. SAT-048A (Frozza et al., 2020) AMS ^{14}C ages.

Sample depth (cm)	LAC-UFF sample code	Species	Age ^{14}C (ka BP)	Error (ka)
23	170059	<i>G. menardii</i>	5.226	0.028
23	170209	<i>G. ruber</i>	5.471	0.032
54	180167	<i>G. ruber</i>	10.594	0.117
65	190321	<i>G. ruber</i>	13.548	0.038
85	180168	<i>G. ruber</i>	16.599	0.212
113	180169	<i>G. ruber</i>	15.531	0.185
149	190704	<i>G. ruber</i>	19.536	0.104
183.5	190323	<i>G. ruber</i>	31.174	0.271
217	180170	<i>G. ruber</i>	22.997	0.451
295	190540	<i>G. ruber</i>	38.997	0.260

Laschamp (Table S2) correlation point is from Savian et al. (submitted). Table S2 shows data used for the age model (Fig. S1) building.

Table S2. SAT-048A data points for age model building on rbacon package.

LabID	Age	Error	Depth_cm	cc	delta.R	delta.STD
LACUFF170059	5226	28	23	2	-85	40
LACUFF170209	5471	32	23	2	-85	40
LACUFF180167	10594	117	54	2	-85	40
LACUFF190321	13548	38	65.5	2	-85	40

LACUFF180168	16599	212	85	2	-85	40
LACUFF180169	15531	185	113	2	-85	40
LACUFF190704	19536	104	149	2	-85	40
LACUFF190323	31174	271	183.5	2	-85	40
LACUFF180170	22997	451	217	2	-85	40
LACUFF190540	38997	260	295	2	-85	40
Laschamp	41000	0	352	0	0	0

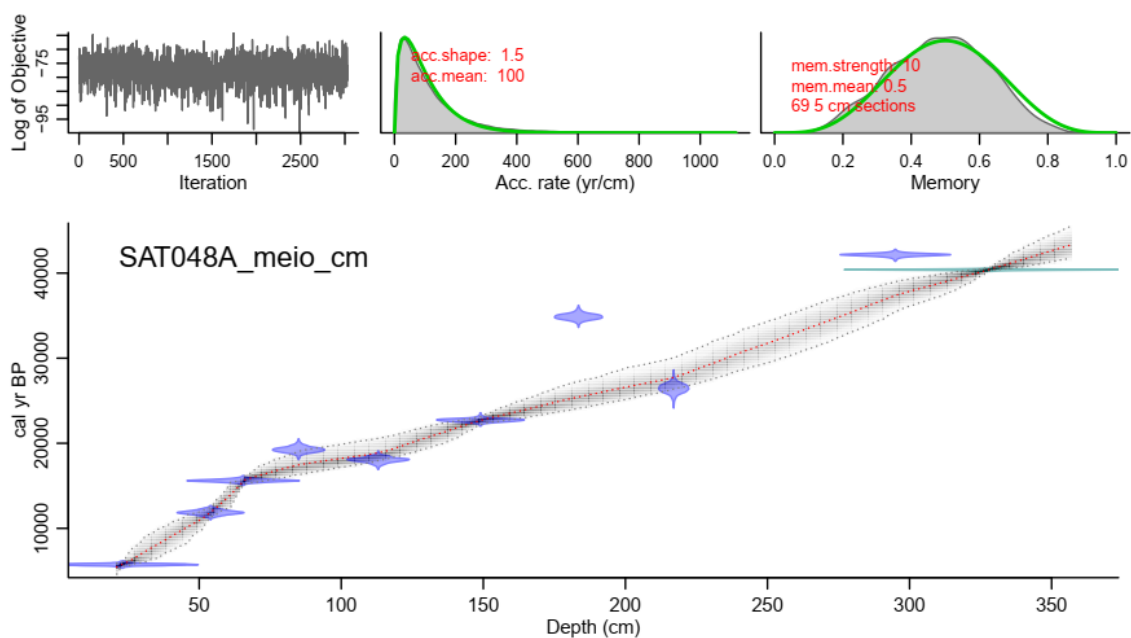
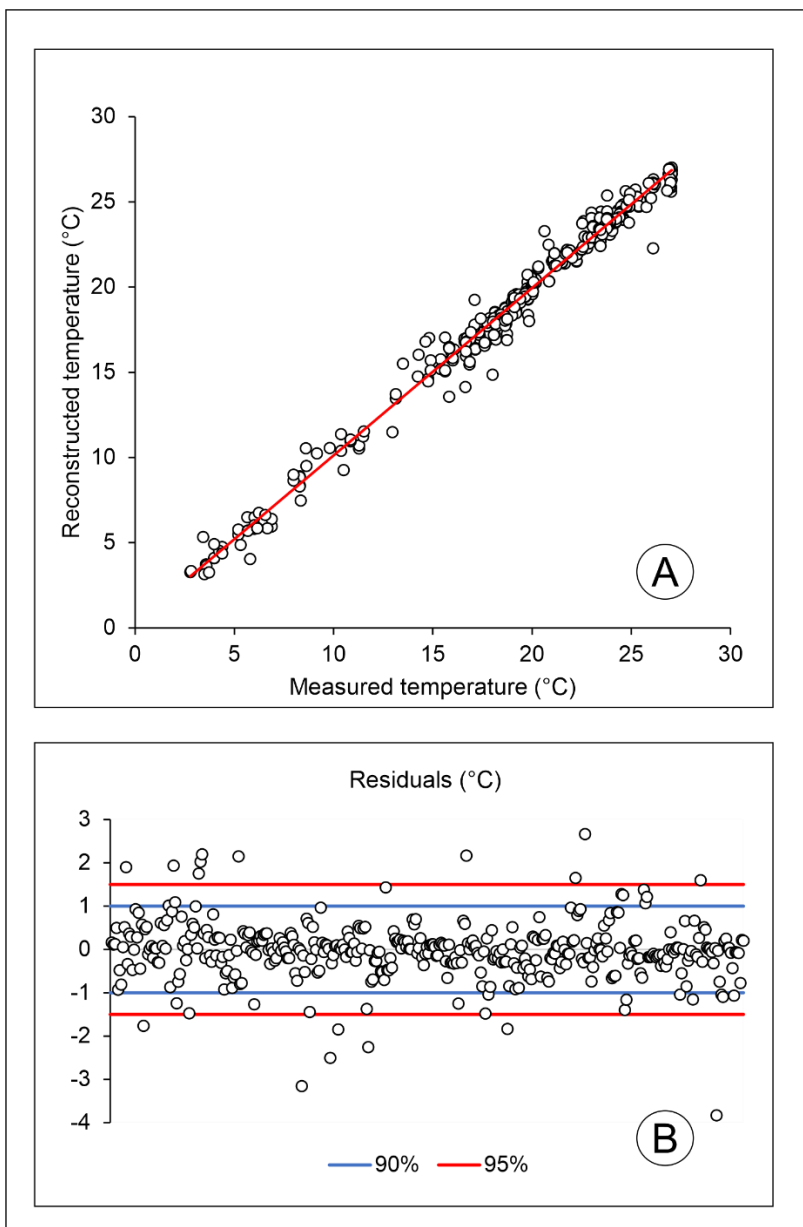
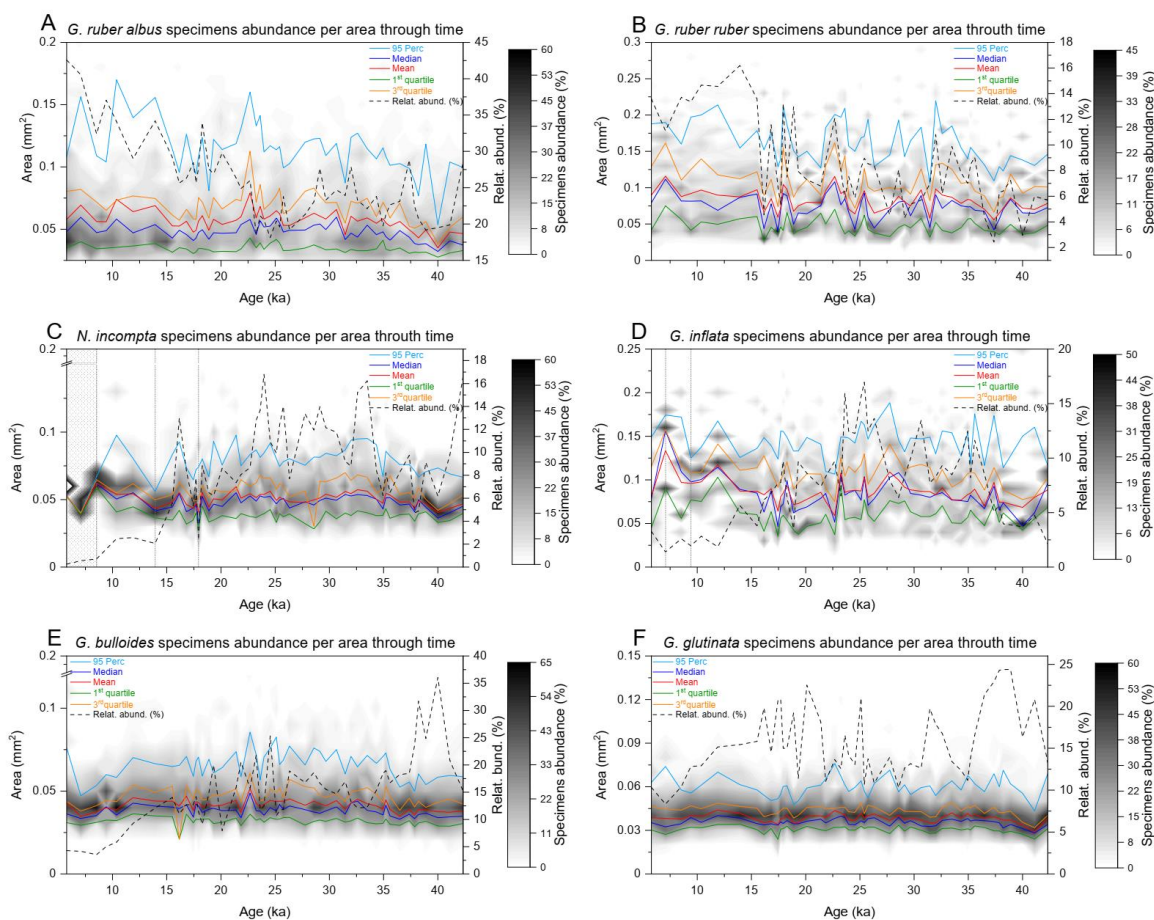


Fig. S1. Age-depth plot for core SAT-048A (bottom panel). The red stippled line indicates the mean age-depth model, 95% confidence ranges indicated by dark-grey stippled curves and calibrated dates in blue. Upper panels from left to right display (1) the Markov chain Monte Carlo (MCMC) iterations, the prior (green curves) and posterior (grey histograms) distributions for (2) the sedimentation rate and (3) memory.

Sea Surface Temperatures



Appendix S1



Specimens abundance of all analyzed species per area through time: *G. ruber albus* (a), *G. ruber ruber* (b), *N. incompta* (c), *G. inflata* (d) and *G. bulloides* (e). Shades correspond to the percentage of specimens (%) per $0.01 \mu\text{m}^2$ of area over time. Each species has its percentage limits for better visualization (right shaded bars). Color lines correspond to specimens' cross-sectional area size descriptors (95th Perc, light blue; Median, blue; Mean, red; 1st quartile, green; and 3rd quartile, orange) and dashed black lines to the relative abundance of species (%; right y-axis). Vertical dotted lines and bar in (c) and (d) correspond to interval/samples with less than ten specimens where analysis could be biased. The frequency diagrams were generated with the Contour plot tool of the commercial software Origin 2021 by OriginLab Corporation.

Results obtained by Spearman correlation between sizes and environmental parameters.

		Annual SST _{0-75 m}	<i>G.</i> <i>glutinata</i> %	$\delta^{13}\text{C}_{Uvi}$ ‰	CaCO_3 %	PF/g	Species richness	Shannon Index	Relative abundance
<i>G. ruber</i>	<i>r</i>	0.056	-0.506	0.537	0.690	0.563	0.038	0.257	0.079
<i>albus</i>	<i>p</i>	0.705	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.794	0.075	0.590
<i>G. ruber</i>	<i>r</i>	0.360	-0.449	0.477	0.468	0.298	0.334	0.188	0.533
<i>ruber</i>	<i>p</i>	0.011	0.001	0.001	0.001	0.037	0.019	0.196	0.815
<i>N.</i>	<i>r</i>	-0.104	-0.258	0.309	0.225	0.186	0.199	0.292	0.363
<i>incompta</i>	<i>p</i>	0.481	0.077	0.033	0.124	0.206	0.175	0.044	0.011
<i>G. inflata</i>	<i>r</i>	0.012	-0.352	0.327	0.432	0.215	0.109	0.307	-0.135
	<i>p</i>	0.935	0.014	0.023	0.002	0.142	0.459	0.034	0.362
<i>G.</i>	<i>r</i>	0.095	-0.083	0.188	0.319	0.322	-0.172	0.212	-0.145
<i>bulloides</i>	<i>p</i>	0.515	0.571	0.195	0.026	0.024	0.238	0.144	0.320
<i>G.</i>	<i>r</i>	0.020		0.191	0.430	0.394	-0.078	0.229	-0.214
<i>glutinata</i>	<i>p</i>	0.891		0.189	0.002	0.005	0.594	0.114	0.140

Spearman correlation between the sizes of taxa.

	<i>G.</i> <i>ruber</i> <i>albus</i>	<i>G.</i> <i>ruber</i> <i>ruber</i>	<i>G.</i> <i>bulloides</i>	<i>G.</i> <i>inflata</i>	<i>N. incompta</i>	<i>G.</i> <i>glutinata</i>
<i>G. ruber</i> <i>albus</i>		0.001	0.015	0.012	0.042	0.001
<i>G. ruber</i> <i>ruber</i>	0.633		0.159	0.097	0.014	0.010
<i>G.</i> <i>bulloides</i>	0.346	0.204		0.274	0.308	0.018
<i>G. inflata</i>	0.360	0.242	0.161		0.330	0.145
<i>N.</i> <i>incompta</i>	0.294	0.351	0.150	0.144		0.412
<i>G.</i> <i>glutinata</i>	0.448	0.367	0.336	0.214	0.121	

References

- Alves, E., Macario, K., Souza, R., Pimenta, A., Douka, K., Oliveira, F., Chanca, I., Ângulo, E., 2015. Radiocarbon reservoir corrections on the Brazilian coast from pre-bomb marine shells. *Quaternary Geochronology*, 29, 30–35. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2015.05.006>
- Angulo, R.J., de Souza, M.C., Reimer, P.J., Sasaoka, S.K., 2005. Reservoir effect of the southern and southeastern Brazilian coast. *Radiocarbon*, 47, 67–73. <https://doi.org/10.1017/S0033822200052206>
- Blaauw, M., Christen, J.A., 2011. Flexible Paleoclimate Age-Depth Models using autoregressive gamma process. *Bayesian Analysis* 6 (3), 457–474. <https://doi.org/10.1214/11-BA618>
- Frezza, C.F., Pivel, M.A.G., Suárez-Ibarra, J.Y., Ritter, M.N., Coimbra, J.C., 2020. Bioerosion on late Quaternary planktonic Foraminifera related to paleoproductivity in the western South Atlantic. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 35, e2020PA003865. <https://doi.org/10.1029/2020PA003865>
- Heaton, T., Köhler, P., Butzin, M., Bard, E., Reimer, R., Austin, W., ... Skinner, L., 2020. Marine20—The Marine Radiocarbon Age Calibration Curve (0–55,000 cal BP). *Radiocarbon* 62 (4), 779-820. doi:10.1017/RDC.2020.68
- Lisiecki, L.E., Stern, J.V., 2016. Regional and global benthic $\delta^{18}\text{O}$ stacks for the last glacial cycle. *Paleoceanography* 31 (10), 1368–1394. <https://doi.org/10.1002/2016PA003002>
- Nadal De Masi, M. A., 1999. Prehistoric hunter-gatherer mobility on the southern Brazilian coast: Santa Catarina Island. Ph.D. Thesis, Stanford University, Palo Alto, CA (unpublished).
- R Core Team, 2020. R: a language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. <http://www.R-project.org/>

Savian, J.F., Pivel, M.A.G., Frigo, E., Rocha, J.A., Lopes, C.T., Suárez-Ibarra, J.Y., Coimbra, J.C., Petró, S.M., Leonhardt, A., Callefo, F., Hartmann, G.A., Braga, A.H., Trindade, R.I.F., Rodelli, D., Jovane, L., Environmental magnetic record of sediments from the western South Atlantic since Marine Isotope Stage 3. Paper submitted to *Global & Planetary Change*.

ANEXO I

Título da Dissertação/Tese:

“Variações de tamanho em foraminíferos planctônicos do Quaternário tardio na Bacia de Pelotas”

Área de Concentração: Paleontologia

Autor: **Ingrid Vieira Silva** □

Orientador: Profa. Dra. Maria Alejandra Gómez Pivel

Examinador: Profa. Dra. **Fabiane Sayuri Iwai**

Data: 26/07/2021

Conceito: A

PARECER:

A dissertação encontra-se muito bem escrita e estruturada. A seção introdutória permite que o leitor seja bem contextualizado em relação ao objetivo, ferramentas e local do estudo. O item Materiais e métodos encontra-se bem detalhado de forma a permitir a replicabilidade e comparabilidade do estudo, o que é muito importante na ciência. Destaco o detalhamento da metodologia do processamento das imagens, que é de grande importância, visto que é uma análise relativamente pouco utilizada na micropaleontologia e pode orientar pessoas interessadas em realizar o mesmo tipo de estudo. A utilização da PC1 em lugar de eleger um único parâmetro estatístico para analisar os dados morfométricos é bastante interessante, não apenas como forma de sintetizar os dados, mas também evitando um possível enviesamento pela escolha de um parâmetro único e sem perder o potencial dos dados disponíveis. A aluna foi capaz de extrair informação de forma adequada a partir dos resultados obtidos, inclusive identificando e salientando a limitação metodológica do estudo realizado. A aluna desenvolveu sua discussão e conclusão além da hipótese inicial observada em estudos anteriores disponíveis na literatura, que indicam uma correlação do tamanho de testas de foraminíferos com temperatura. Resultados “negativos” não invalidam o desenvolvimento de um estudo e são de extrema importância para obtenção de novas conclusões e diretrizes para futuros estudos. Encontro-me satisfeita com o desempenho da aluna e parabeno a aluna e orientadora.

Assinatura:



Data: 26/06/2021

Ciente do Orientador:

Ciente do Aluno:

ANEXO I

Título da Dissertação/Tese:

“Variações de tamanho em foraminíferos planctônicos do Quaternário tardio na Bacia de Pelotas”

Área de Concentração: Paleontologia

Autor: **Ingrid Vieira Silva**

Orientador: Profa. Dra. Maria Alejandra Gómez Pivel

Examinador: Profa. Dra. **Carla Van der Haagen Custódio Bonetti**

Data: 26/07/2021

Conceito: A

PARECER:

A dissertação está bem estruturada e escrita de forma clara. Na introdução são apresentados os principais conceitos que subsidiam a pesquisa e uma síntese muito boa das características oceanográficas da área de estudo, tanto em relação aos processos atuais como às mudanças ocorridas ao longo dos últimos 40 kyr. A proposta central da dissertação é avaliar a contribuição de variáveis ambientais, como a temperatura e a produtividade primária, no controle do tamanho das testas de seis taxa de foraminíferos planctônicos depositados ao longo do Quaternário tardio. Trata-se de um tema de pesquisa atual e de grande interesse para subsidiar o uso de proxies paleoceanográficos no Atlântico Sul.

A metodologia adotada mostrou-se adequada aos objetivos propostos e baseia-se em técnicas de tratamento de imagens e compressão matemática de dados biométricos que se encontram em sintonia com as referências mais recentes sobre estudos morfométricos de foraminíferos. Em relação a este item, determinadas etapas ou opções metodológicas poderiam ter sido mais detalhadas, de modo a facilitar a reprodução metodológica desse estudo em outras áreas e desenvolver assim análises comparativas. Neste sentido, seria interessante, por exemplo, informar as variâncias explicadas pelos primeiros componentes principais usados como índices métricos ($size_{PC1}$) e qual foi o coeficiente de associação usado para construir a matriz de dissimilaridade na MAT. A dissertação apresenta um conjunto robusto de resultados, que são adequadamente descritos e explorados graficamente. Alguns (poucos) comentários específicos sobre as figuras e tabelas, juntamente com sugestões de informações complementares, estão sendo encaminhados em anexo a este formulário de avaliação.

A discussão dos resultados dialogou muito bem com as referências bibliográficas disponíveis e demonstrou uma postura crítica muito desejável nos estudos científicos. As interpretações foram sempre acompanhadas de argumentos expondo as incertezas

envolvidas em estudos de reconstrução paleoambiental. Entre as contribuições da pesquisa apresentadas nas conclusões, vale ressaltar a importância das questões sobre como a metodologia de análise métrica das testas (integrando todas as populações ou analisando-as individualmente), a amplitude térmica da série de dados e a dissolução das testas podem influenciar nas relações estabelecidas entre os descritores métricos e a SST. Acredito que seria interessante, como continuação da pesquisa, utilizar os dados já obtidos para, por exemplo: (1) integrar as seis espécies em uma única PCA e reanalisar a correlação do PC1 com a SST - será que o resultado de correlação seria diferente? e (2) analisar a relação entre os coeficientes de dissimilaridade obtidos pela MAT e os proxies de dissolução – será que a dissimilaridade aumenta nos períodos de intensificação dos processos tafonômicos? Estas respostas poderiam ser abordadas num próximo artigo, com foco na apresentação de uma proposta metodológica.

Em suma, a mestranda concluiu com êxito a pesquisa que se propôs e meu parecer é favorável à sua aprovação no mestrado. Finalizo, assim, parabenizando a Ingrid Vieira Silva pela qualidade da dissertação apresentada e estendendo os cumprimentos à orientadora, Profa. Maria Alejandra Gómez Pivel, e a toda equipe que colaborou com esse trabalho.

Assinatura:



Data: 26/07/2021

Ciente do Orientador:

Ciente do Aluno:

ANEXO I

Título da Dissertação/Tese:

“Variações de tamanho em foraminíferos planctônicos do Quaternário tardio na Bacia de Pelotas”

Área de Concentração: Paleontologia

Autor: Ingrid Vieira Silva

Orientador: Profa. Dra. Maria Alejandra Gómez Pivel

Examinador: Prof. Dr. **Karlos Guilherme Diemer Kochhann**

Data: 02/08/2021

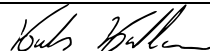
Conceito: A

PARECER:

A dissertação de mestrado da aluna Ingrid Vieira Silva apresenta resultados sobre variações de tamanho de testas de foraminíferos planctônicos ao longo dos últimos 43 ka na Bacia de Pelotas, setor oeste do Oceano Atlântico sul. Dados morfométricos são comparados com outros traçadores de condições ambientais e de dissolução de carbonato de cálcio. A dissertação é de fácil leitura e apresenta as principais discussões de forma clara e objetiva. Abaixo, resalto um ponto que poderia ser trabalhado de forma mais profunda:

Considero que a análise de componentes principais pode ser utilizada para interpretar os dados morfométricos, mas a justificativa de que utilizar apenas os descritores das medidas (como média, mediana, entre outros) poderia levar a interpretações diferentes dos dados não parece convincente. A Figura 6 do manuscrito mostra que as tendências se mantêm as mesmas para todas as espécies (quando se utiliza a mediana e o percentil 95), exceto para *G. inflata*, que apresenta uma ampla distribuição dos dados (sem uma tendência clara). Para que a relação da PC1 com os descritores de tamanho das testas fique mais clara, sugiro apresentar e discutir brevemente (nos resultados) os *score* e *loadings* da PC1. Isso pode auxiliar a justificar o uso da análise de componentes principais.

De forma geral, a mestranda mostra maturidade acadêmica nas discussões apresentadas. Após a leitura da dissertação, considero que a mesma atinge de forma satisfatória os requisitos do nível de mestrado. Comentários menores foram marcados no documento e enviados diretamente para a professora orientadora.

Assinatura: 

Data: 02/08/2021

Ciente do Orientador:

Ciente do Aluno: