

Tabela 14: Matriz de escores com a contribuição de cada nanofóssil calcário para o KF-B.

Espécies	Escores	
	Fator 1	Fator 2
<i>G. oceanica</i>	-0,0704	<b>2,1230</b>
<b><i>Gephyrocapsa sp.</i></b>	-0,0402	<b>2,4318</b>
<i>E. huxleyi</i>	0,1735	1,2293
<i>Helicosphaera sp.</i>	0,3164	-0,4423
<i>C. leptoporus</i>	0,3281	-0,4672
<i>C. murrayi</i>	0,2887	-0,4220
<i>Pontosphaera sp.</i>	0,3237	-0,4262
<i>R. clavigera</i>	0,1591	-0,4796
<i>Scyphosphaera sp.</i>	0,3353	-0,4345
<i>Syracosphaera sp.</i>	0,1571	-0,0844
<i>Umbellosphaera sp.</i>	0,2225	0,9354
<i>U. siboagae</i>	0,1316	-1,3606
<i>Reticulofenestra sp.</i>	0,3309	-0,3665
<i>C. cristatus</i>	0,3282	-0,4255
<i>Thoracosphaera sp.</i>	0,3309	-0,4538
<i>D. tubifera</i>	0,3263	-0,4946
<b><i>F. profunda</i></b>	<b>-3,9742</b>	-0,3836
<i>Espiculas</i>	0,3319	-0,4384

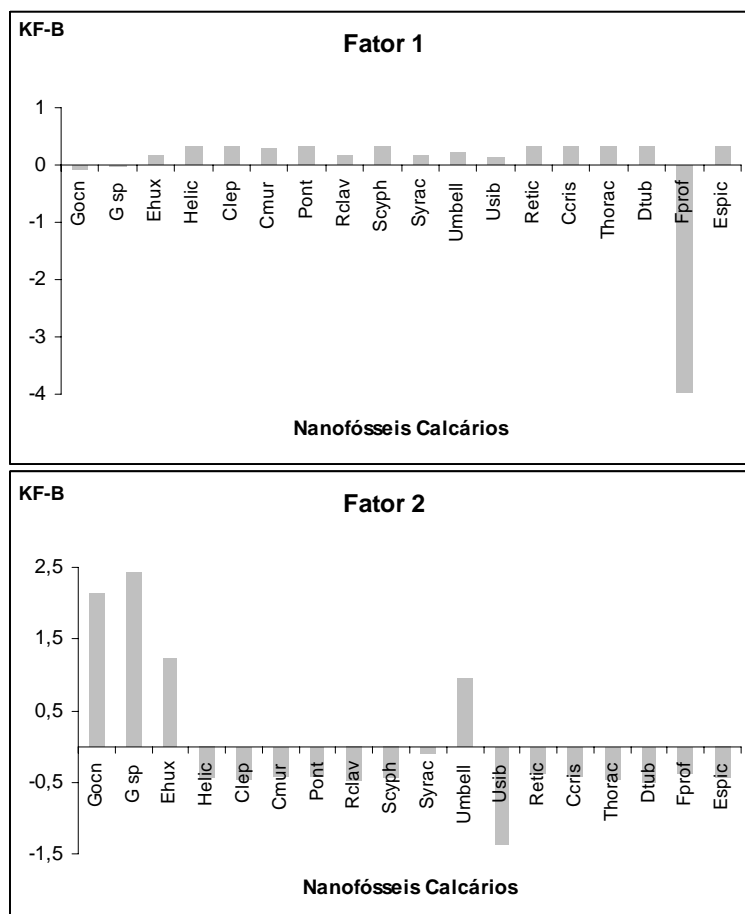


Figura 80: Histograma demonstrando a contribuição das espécies de nanofósseis calcários para cada fator do KF-B.

A figura 81 demonstra o controle do fator 1 durante o EIM 2, como observado no testemunho KF-A, assim como o fator 2 contribuindo no EIM 1. A maior estratificação das águas superficiais (fator 1) no intervalo glacial e a maior significância do fator 2 (fertilidade das águas superficiais) ao longo do EIM 1, concordam com as inferências discutidas para o KF-A.

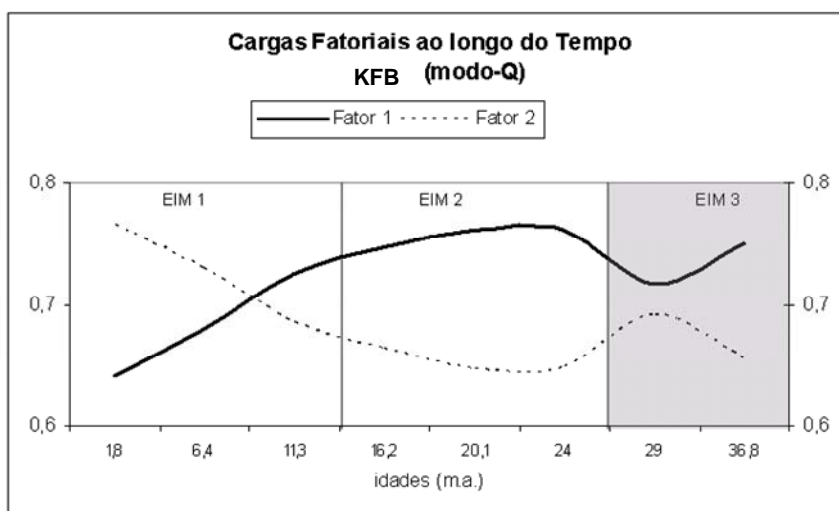


Figura 81: Comparação dos fatores 1 e 2 (modo-Q) em função de suas cargas fatoriais ao longo do testemunho KF-B, com destaque para os estágios isotópicos 1, 2 (e 3).

Essas mesmas observações estão demonstradas na figura 82, que ilustra a projeção das correlações dos dois fatores, associada às espécies que mais contribuem para cada fator. As amostras sedimentares mais influenciadas por cada um dos fatores também pode ser constada neste gráfico.

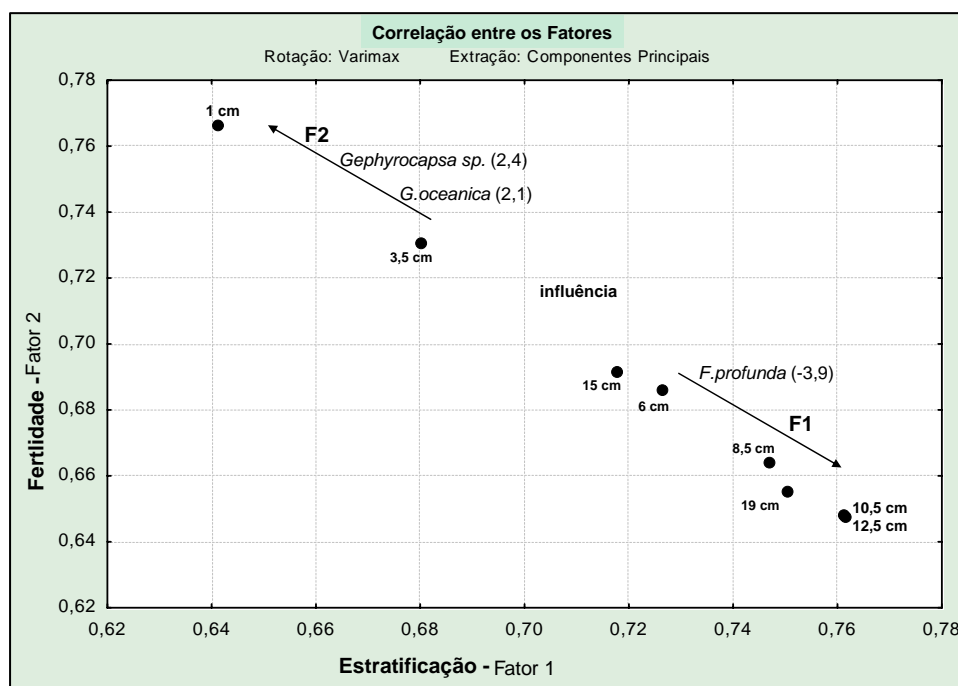


Figura 82: Projeção da correlação entre os fatores 1 e 2 do testemunho KF-B (pontos indicam as amostras em função das cargas fatoriais; as espécies estão associadas aos escores).

A similaridade indicada pela análise fatorial dos dois testemunhos demonstra que a porção do oceano Atlântico privilegiada por este estudo foi estável, uma vez que o fator foi dominante em ambos os testemunhos. Ainda assim, a estabilidade nas proximidades do KF-B parece ter sido mais efetiva e bastante significativa na composição das assembléias de nanofósseis calcários.

A interpretação dos dados da análise fatorial demonstrou que os processos que determinaram as variações na assembléia nanofossilífera são de mesma natureza. No entanto, destacam-se em momentos distintos, contrapondo um ao outro, cronologicamente e ecologicamente: fator 1 predomina no EIM 2 e o fator 2 é salientado no EIM 1; a maior estratificação no

EIM 2 (fator 1) que ao longo do EIM 1, sugere condições oligotróficas em superfície; enquanto o EIM 1 está associado à maior fertilidade nas camadas mais superficiais (fator 2).

Ambos os resultados da análise fatorial modo-Q, concordam com as demais técnicas estatísticas aplicadas e a análise composicional. Estes resultados corroboram as condições de oligotrofia das águas superficiais, devido à estratificação da coluna d'água nesta porção Atlântico.

No EIM 1, o maior destaque de espécies *r*-estrategistas da zona fótica superior deve ter sido um reflexo da menor profundidade da nutriclina/termoclina, se comparada às condições impostas pelo período glacial naquela região. Os resultados também demonstram que no EIM 2, principalmente durante o UMG, a termoclina e nutriclina podem ter sido ainda mais profundas do que durante o atual período interglacial.

### **6.5. Índice de Temperatura (IT) e Índice de Nutriente (IN)**

As fórmulas para o cálculo dos índices de temperatura (IT) e de nutrientes (IN), descritas na seção anterior (Análise de Componentes Principais), foram aplicadas aos dados de nanofósseis calcários do presente estudo. Os resultados obtidos são apresentados na figura 83 (IT) e figura 84 (IN).

O IT exibiu baixos valores para ambos os testemunhos (Fig. 83). Estes valores conferiram altas temperaturas à região de estudo durante os últimos 25-30 mil anos. Comparando o KF-A com o KF-B, verifica-se que os menores valores do KF-B indicam temperaturas mais elevadas nessa região do que na localidade do KF-A. Como o KF-B encontra-se nas imediações da região equatorial, a  $\sim 7^{\circ}\text{S}$ , esta proximidade deve ser a responsável pelos maiores valores do IT encontrados neste testemunho.

Os intervalos em que se observam valores de IT acima da média (linha vertical tracejada), entre 15,8-11 mil anos e 8 mil anos no KF-A e o pico de 16,2 mil anos no KF-B, indicam uma tendência de decréscimo de temperatura, ainda que elevada. Como os testemunhos estudados provêm de uma região

tropical, este decréscimo pode estar relacionado a períodos de maior precipitação atmosférica. Os intervalos indicados pelo IT coincidem com períodos de maior aporte continental, nesta região, reportados em diversos estudos (Arz *et al.*, 1999a; 1999b; Behling *et al.*, 2000; Zabel *et al.*, 2004; Jennerjahn *et al.*, 2004), principalmente aqueles intervalos associados aos eventos H1 e YD. Behling *et al.* (*op.cit.*) aponta o intervalo entre 15,5 – 11,8 mil anos como o período mais úmido registrado na região nordeste.

Durante o UMG, o clima do planeta foi mais seco devido às baixas temperaturas e maior intensidade dos ventos. Com base em dados continentais Ledru *et al.* (1998) sugeriram que, devido à falta de registro sedimentar entre 24-17 mil anos, o interior do continente sul americano teria sido muito árido. A menor sazonalidade da ZCIT, teria dificultado a penetração da umidade na Bacia Amazônica (Kim & Schneider, 2003).

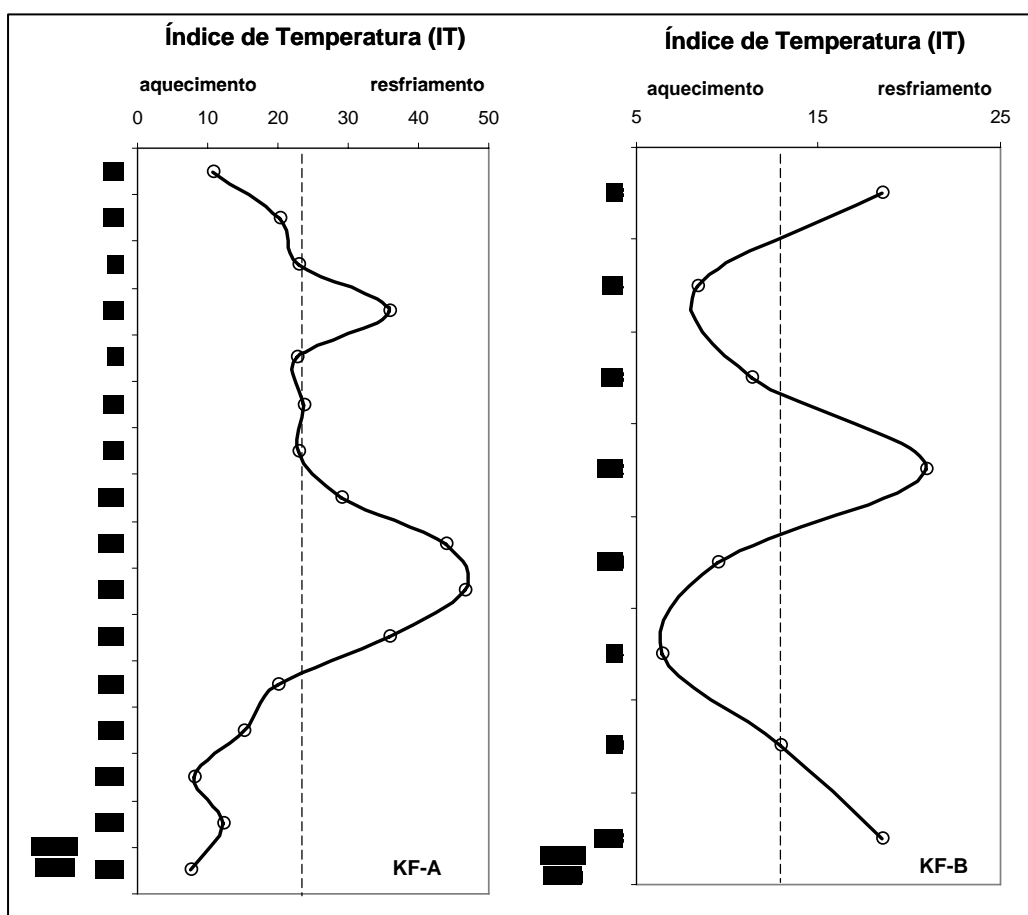


Figura 83: Índice de temperatura (IT) dos dois testemunhos estudados. A linha vertical tracejada corresponde aos valores médios do IT.

O mais importante a perceber é que a variação de temperatura registrada pelo IT em ambos os testemunhos foi pequena e, portanto, é coerente com as estimativas de variação de paleotemperatura, de aproximadamente 1°C, propostas pelo CLIMAP (1981) e Toledo (2000) para esta mesma porção do Atlântico Sul. Como já havia sido sugerida pela análise quantitativa de nanofósseis calcários, a variação de temperatura ao longo do período estudado não parece ter sido significativa para influenciar a distribuição e composição das assembléias nanofossilíferas.

A figura 84 exhibe o IN calculado para ambos os testemunhos. Os baixos valores do IN apresentados pelo KF-A e KF-B sugerem condições oligotróficas durante os últimos 25-30 mil anos, concordando com as características oceanográficas da área de estudo.

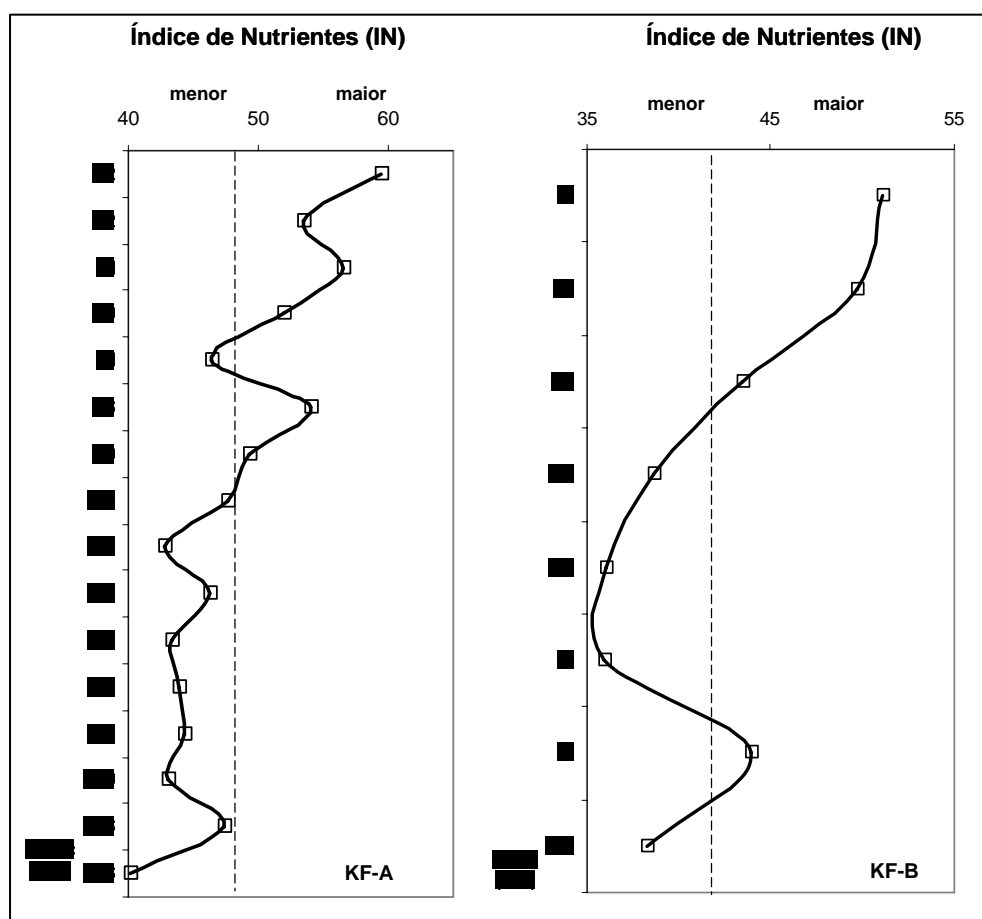


Figura 84: Índice de nutrientes (IN) dos dois testemunhos estudados. A linha vertical tracejada corresponde aos valores médios do IN.

No entanto, o IN estimou maior disponibilidade de nutrientes para a camada superficial a partir do EIM1, tanto no KF-B como no KF-A. Neste último testemunho foi constatada maior variação na disponibilidade de nutrientes a partir da transição entre os estágios isotópicos, o que indica maior fertilidade das águas superficiais.

No testemunho KF-A, o IN indica menor disponibilidade de nutrientes para a camada superficial ao longo do intervalo glacial, entre 26,6 mil anos e 12,6 mil anos (Fig. 84). A partir de 12 mil anos, pode-se observar uma tendência de aumento na oferta de nutrientes e, em torno de 9 mil anos, parece ter diminuído novamente. Fato este antes evidenciado pela análise composicional dos nanofósseis calcários, análise de agrupamentos e pela análise fatorial. Nas amostras recentes o IN atingiu seus maiores valores.

No KF-B uma maior disponibilidade de nutrientes (valores acima da média) ocorreu, somente, nos intervalos interglaciais (EIM 1 e 3). Os menores valores do IN foram verificados no EIM 2, acompanhando o mesmo padrão do KF-A.

A menor disponibilidade de nutrientes durante o período glacial, nesta porção do oceano Atlântico, deve estar associada à estratificação da coluna d'água. A indicação do aprofundamento da termoclina, devido ao empilhamento de águas aquecidas nesta porção do oceano, teria dificultado os processos de mistura responsáveis por deslocar nutrientes para a zona fótica superior. Durante o período glacial, observou-se os maiores valores de abundância relativa de *F.profunda*, uma espécie indicadora de nutriclina profunda.

Por outro lado, as espécies que habitam a zona fótica superior, predominantemente oportunistas (*r*-estrategistas), são um reflexo da fertilidade da camada superficial do oceano. Como visto anteriormente, estas espécies tiveram maior representatividade no registro fóssil ao longo do EIM 1. Em razão do estabelecimento de condições climáticas interglaciais, a redução da intensidade eólica e da circulação superficial do Atlântico Sul teria diminuído o acúmulo das águas no lado oeste, concomitante à redução da ressurgência africana. De tal modo, os gradientes termais E-W diminuiram (Kim & Schneider, 2003) reduzindo a profundidade da termoclina na porção noroeste do Atlântico Sul.

Quando a estratificação da coluna d'água é mais efetiva, a termoclina e a nutriclina atingem maiores profundidades e, assim, diminuí a fertilidade das águas superficiais. A maior estratificação da coluna d'água na porção noroeste do Atlântico Sul durante o glacial foi também suportada por outros autores (Toledo, 2000; Kinkel *et al.*, 2000; Weldeab *et al.*, 2006).

Para melhor ilustrar estas observações, a figura 85 exhibe o comportamento do índice de nutrientes em contraste com a abundância relativa de duas espécies dominantes nas assembléias fósseis deste estudo: *F. profunda* (zona fótica inferior) e *Gephyrocapsa sp.* (zona fótica superior). As curvas de IN versus *F. profunda* (Figura 85a e 85b) apresentaram comportamento inverso. Alterações na tendência destas curvas ocorreram após a transição para o EIM 1. Por outro lado, a curva de abundância relativa de *Gephyrocapsa sp.* (Figura 85c e 85d) teve boa concordância com a variação do IN no dois testemunhos.

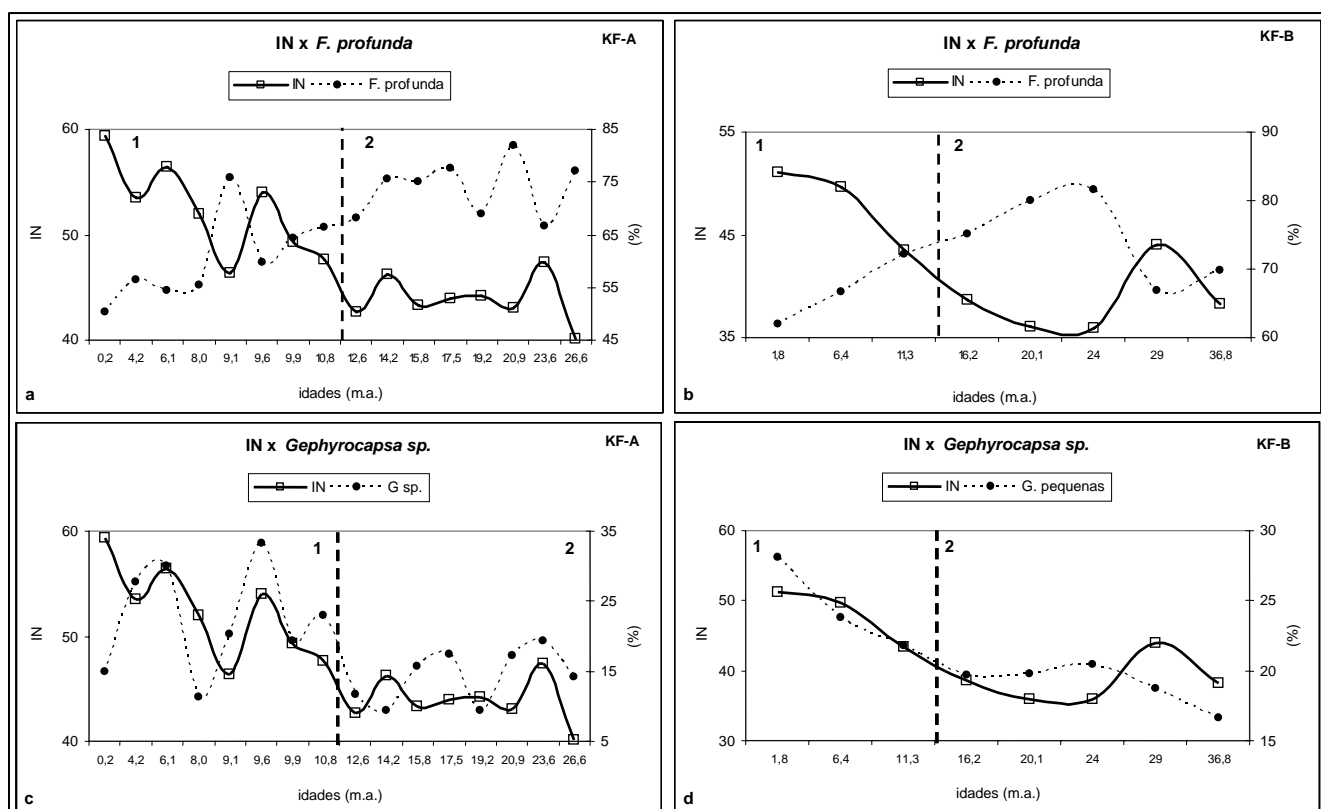


Figura 85: Curvas de índice de nutriente (IN) versus *F. profunda* (a,b) e *Gephyrocapsa sp.* (c,d) para os dois testemunhos estudados e a indicação do limite entre os estágios isotópicos marinhos (1 e 2).

Outras espécies de nanofósseis calcários mostraram comportamentos correlacionáveis com o IN estimado. Destas, destacam-se *R. clavigera* e

*Syracosphaera sp.*, com relação inversa à disponibilidade de nutrientes na superfície (IN), como indicado por *F. profunda*. A abundância total aproximada de nanofósseis calcários e as espécies *E. huxleyi* e, principalmente, *Umbellosphaera sp.* mostraram-se diretamente relacionadas às oscilações apresentadas pelo IN, da mesma forma que *Gephyrocapsa sp.*.

#### 6.6. **Equação de Paleoprodutividade**

Uma estimativa de paleoprodutividade (PP) foi calculada para ambos os testemunhos com base na equação proposta por Beaufort *et al.* (1997) e testada, com êxito por Henriksson (2000). Por se tratar de um indicador confiável em amostras sedimentares do Atlântico tropical, esta equação foi considerada um balizamento para estimativa do IN, uma vez que o IN foi, pela primeira vez, formulado para nanofósseis calcários do Quaternário. Os resultados comparativos estão exibidos na figura 86.

Os valores estimados de PP não ultrapassaram os 150g de carbono por metro quadrado por ano ( $\text{gC/m}^2/\text{ano}$ ) e os menores valores foram aproximadamente  $95 \text{ gC/m}^2/\text{ano}$  (Fig. 86). As estimativas de PP para o oceano Índico, nos últimos 910 mil anos, variaram entre  $70\text{-}390 \text{ gC/m}^2/\text{ano}$  (Beaufort *et al.*, *op.cit.*) e no Atlântico equatorial de  $70\text{-}230 \text{ gC/m}^2/\text{ano}$ , ao longo dos últimos 200 mil anos (Henriksson, *op.cit.*). Os valores reportados no presente estudo são razoavelmente baixos, mesmo quando atingem seu ápice, além disso, a variação máxima de  $\sim 55 \text{ gC/m}^2/\text{ano}$  indica que as variações de produtividade não foram tão expressivas.

A similaridade das curvas de PP e do IN em ambos os testemunhos demonstra uma ótima correlação entre estes indicadores, que têm como base apenas a variação percentual de algumas espécies da assembléia de nanofósseis calcários. O IN se mostrou um indicador confiável, na medida em que concordou com os demais indicadores de produtividade superficial, respondendo com a mesma tendência às variações observadas nos últimos 25 mil anos.

No entanto, é preciso ter cautela ao interpretar estes indicadores como reflexo direto da paleoprodutividade, pois, como referido Kinkel *et al.* (2000),



um suave aumento na disponibilidade de nutrientes pode ser suficiente para alterar valores de abundância relativa de algumas espécies, mas não, necessariamente, para induzir um aumento real na produtividade total.

A utilização da equação de paleoprodutividade associada à aplicação dos índices de nutrientes e temperatura foi consistente. Recomendam-se estes três procedimentos como complementos em estudos paleoceanográficos com nanofósseis calcários, uma vez que dependem, exclusivamente, dos dados obtidos da análise quantitativa. No entanto, sugere-se que estes indicadores sejam testados em outras localidades e comparados a outros dados para que a sua eficiência seja confirmada.

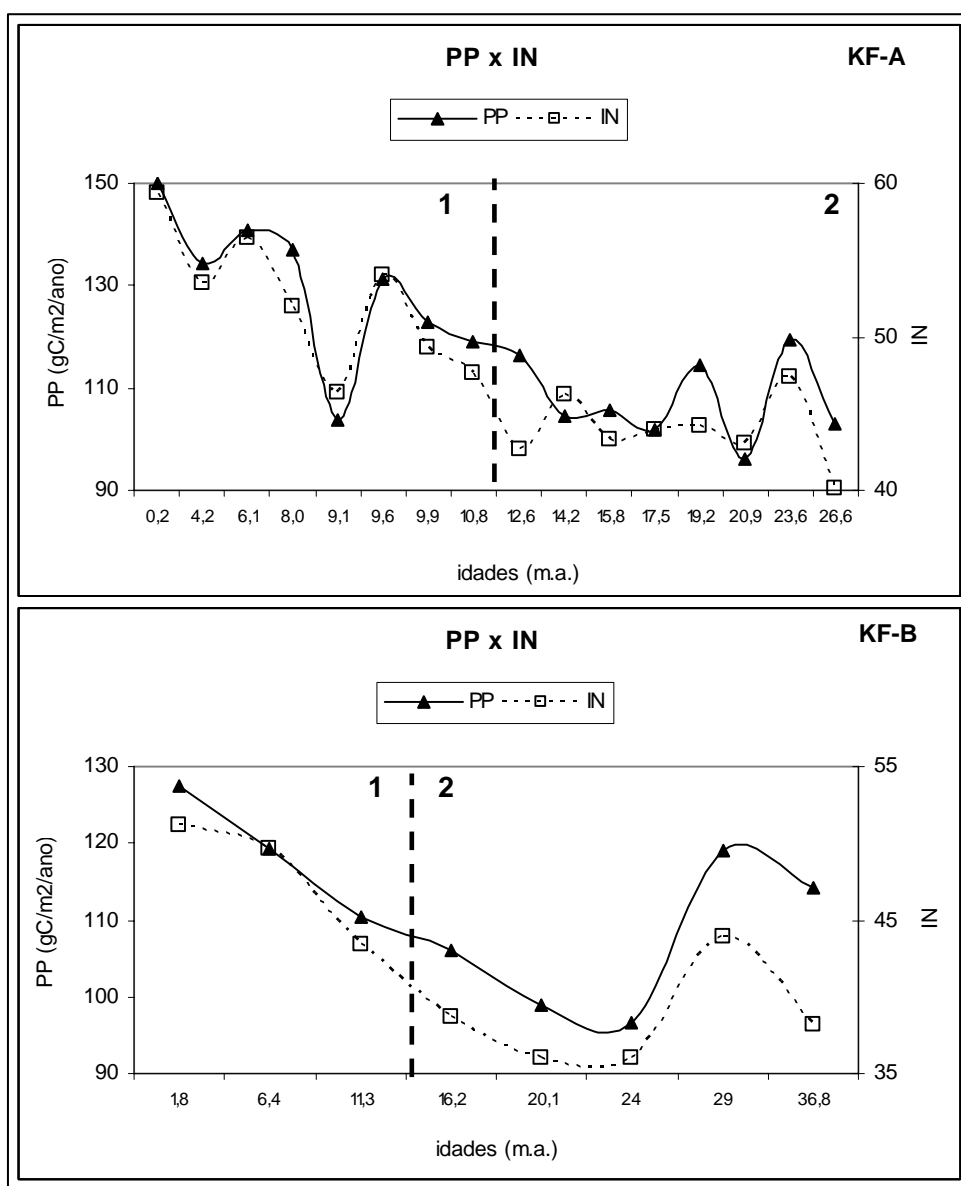


Figura 86: Curvas de paleoprodutividade (PP) calculada a partir da equação de Beaufort *et al.* (1997) para os dois testemunhos estudados, contrastando com o índice de nutriente (IN) estimado na seção anterior e a indicação do limite entre os estágios isotópicos marinhos (1 e 2).

## 6.7. Considerações Finais

A análise quantitativa de nanofósseis calcários mostrou que as assembléias foram dominadas pela espécie *Florisphaera profunda*, seguida por espécies do gênero *Gephyrocapsa* e *Emiliana huxleyi*. Ademais, as espécies de água quente *Rhabdosphaera clavigera*, *Umbellosphaera sp.* e *Umbilicosphaera sibogae* também foram representativas.

Com os dados da análise composicional foi possível monitorar as variações da espécie *F. profunda* ao longo do tempo. Foi constatada tendência acentuada de queda percentual entre o EIM 2 e EIM 1 nos dois testemunhos utilizados (KF-A e KF-B). Como esta espécie é utilizada para monitorar as variações da profundidade da termoclina/nutriclina, ela foi considerada uma espécie fundamental em estudos paleoceanográficos com nanofósseis calcários em regiões tropicais. O declínio registrado de *F. profunda* entre o EIM 2 e EIM 1, sugere que no EIM 2 a termoclina/nutriclina teria sido ainda mais profunda que no Holoceno.

No período transicional entre o último período glacial e o interglacial observou-se as maiores variações no registro de nanofósseis calcários, sugerindo que este também foi um período de transição para a nanoflora daquela região. Muitas espécies apresentaram comportamento distinto entre os dois estágios isotópicos.

Embora variações de abundância específica tenham ocorrido nos últimos 25.000 anos, o predomínio inequívoco de *F. profunda* determinou a caracterização da região de estudo como um ambiente de águas quentes, baixa turbidez, intensa luminosidade e reduzida disponibilidade de nutrientes na superfície, similares ao ambiente atual.

Os métodos empregados neste estudo constituíram um conjunto de indicadores paleoceanográficos acessível e de baixo custo. Exceto pelos dados isotópicos, os demais dependem, exclusivamente, da identificação e contagem das espécies de nanofósseis calcários. As informações obtidas, de acordo com as oscilações dos nanofósseis calcários, colaboraram para a melhor interpretação da variação paleoceanográfica ao longo dos últimos 25.000 anos. O resumo dos principais resultados está exibido na figura 87 (KF-A) e 88 (KF-B).





Através da análise de agrupamentos modo-Q, foi possível identificar amostras características do EIM 1, do EIM 2 e do período transicional. A análise de agrupamentos modo-R reuniu espécies com distribuição temporal similar, e puderam, mais tarde, ser relacionadas a variação de produtividade.

A análise fatorial modo-Q gerou dois fatores. O fator 1, dominado pela espécie *Florisphaera profunda*, denominado de fator da estratificação da coluna d'água, e o fator 2, dominado pelas espécies *Gephyrocapsa oceanica* e *Gephyrocapsa sp.*, denominado de fator da fertilidade da camada superficial.

A aplicação do IT e do IN a dados quantitativos de nanofósseis calcários do Quaternário no Atlântico Sul mostrou afinidade com os demais resultados. A variação registrada pelo IT foi pontual, concordando com a maior estabilidade térmica da região. As suaves reduções de temperatura coincidiram com períodos de maior umidade na região de estudo. O KF-A teve uma variação maior que o KF-B, o que está de acordo com a posição geográfica dos testemunhos.

O IN também apresentou baixos valores, que sugerem condições oligotróficas durante todo o período de estudo. No entanto, a oscilação registrada por este índice foi maior que no IT em ambos os testemunhos. Isto suporta o argumento que a variação da profundidade da nutriclina/termoclina teve maior influência na composição das assembléias fósseis do que a variação de temperatura. A aplicação do IN apresentou boa correlação com a PP, com a distribuição temporal das espécies de nanofósseis calcários e com os dados isotópicos.

De acordo com estes resultados, a nutriclina/termoclina estava mais profunda durante o EIM 2, dado o empilhamento de águas aquecidas na porção oeste do oceano. O maior empilhamento está relacionado à maior magnitude dos ventos e da circulação superficial do Atlântico Sul neste período, o que, por outro lado, confere maior turbulência às águas. De acordo com Kim e Schneider (2003), ventos e circulação superficial mais vigorosos teriam intensificado os gradientes E-W de temperatura no Atlântico Sul, igualmente demonstrado pela intensificação da ressurgência na costa da África.

Em virtude das condições climáticas mais amenas do Holoceno, os gradientes termais E-W enfraqueceram, reduzindo a profundidade da

termoclina. Com as águas intermediárias, enriquecidas em nutrientes, mais próximas à zona fótica superior, qualquer evento de instabilidade na superfície do oceano pode favorecer a redução de densidade, disponibilizando nutrientes em profundidades habitadas pela maior parte das espécies de cocolitoforídeos. A variação de estabilidade da camada superficial do oceano na área de estudo já foi referida por outros autores como um dos fatores mais importantes para a produtividade das águas oligotróficas.

Como discutido ao longo deste estudo, existem alguns conjuntos de fatores plausíveis para explicar as variações na paleoceanografia nos últimos 25.000 anos na região oeste do Oceano Atlântico Sul, já que durante este período o planeta experimentou diferentes condições climáticas. Dentre os agentes físicos, a variação do deslocamento da ZCIT, devido às mudanças de intensidade dos ventos alísios deve ter influenciado as condições ambientais desta região. Além da ação dos ventos atuando na ativação de processos de mistura na camada superficial do oceano, vale lembrar que, as instabilidades relacionadas à precipitação atmosférica e à variação de TSM, discutidas ao longo do texto, também estão associadas à dinâmica da ZCIT.

Como ressaltado no início deste trabalho, os estudos paleoceanográficos e paleoclimáticos no Oceano Atlântico Sul, sobretudo na margem continental brasileira, são escassos se comparados a outras regiões do planeta. Entretanto, o Atlântico Sul tem um importante papel na regulação do clima global devido à transferência de calor e sal, através da região equatorial, em direção ao hemisfério norte.

No Atlântico Norte, essas massas d'água superficiais, aquecidas e salinas, são responsáveis - quando resfriadas na região polar - pela maior densidade da água na zona de formação de águas profundas. Portanto, alterações no Atlântico Sul Tropical, que modifiquem este padrão de transferência de calor e massa, devem modificar também o funcionamento da circulação oceânica global.

O panorama climático do Brasil e oceanográfico ao longo da margem continental brasileira, desde o Último Máximo Glacial até as condições atuais, não é muito bem compreendido. Os poucos estudos publicados e as diferentes ferramentas priorizadas por eles, muitas vezes causam divergências na interpretação dos dados.

É evidente que esta porção do Atlântico Sul necessita de uma maior quantidade de informações paleoceanográficas e paleoclimatológicas para a melhor interpretação da origem das variações sofridas no passado. Os estudos desta natureza com nanofósseis calcários na margem montinental brasileira são ainda mais raros, sendo a maior parte deles relacionados à bioestratigrafia na indústria do petróleo. A aplicação deste grupo de microfósseis, no presente estudo, se mostrou um bom indicador para estudos paleoceanográficos na margem continental nordeste do Brasil.

Além das questões mencionadas até aqui, outro fato que mereceu atenção, foi a concordância de muitos intervalos destacados neste trabalho, ao longo de período deglacial, com eventos climáticos de menor frequência reconhecidos no hemisfério norte, como o Younger Dryas e o Heinrich 1. O registro de tais eventos em regiões tropicais, e mesmo no hemisfério sul, é ainda um tópico em discussão na paleoceanografia. Ainda assim, o registro de instabilidades coincidentes cronologicamente, sugere que esta questão deva ser explorada com mais detalhe.

A diferença de resolução estratigráfica entre os testemunhos analisados não permitiu uma interpretação mais aprofundada dessa questão. Deste modo, que para confirmar, ou não, o registro destes eventos, sugere-se a continuidade dos estudos utilizando um maior número de testemunhos, distribuídos, regularmente, ao longo da margem continental do Brasil. Para que os períodos de interesse apresentem registros mais detalhados é recomendado que o intervalo entre as amostras seja ainda menor do que o utilizado neste estudo.