

# Variação espaçotemporal de nutrientes inorgânicos dissolvidos e clorofila a em um estuário amazônico tropical no norte do Brasil

*Spatio-temporal variation of dissolved inorganic nutrients and chlorophyll a in a tropical Amazon estuary in northern Brazil*

Rosinette Machado Santos<sup>1\*</sup> , Pedro Henrique Campos Sousa<sup>1</sup> ,  
Andrew Wallace Palheta Varela<sup>2</sup> , Fábio Campos Pamplona<sup>1</sup> , Maria de Lourdes Souza Santos<sup>1</sup> 

## RESUMO

## ABSTRACT

O presente estudo foi desenvolvido no estuário do furo do Muriá ou Maripanema, localizado no setor Costa Atlântica do Salgado, norte do Brasil, com o objetivo de conhecer a dinâmica dos nutrientes dissolvidos na interface água-ar e os mecanismos de interação desses nutrientes com os parâmetros abióticos e bióticos (clorofila a). Esse sistema sofre a influência da sazonalidade, que envolve aspectos dos regimes de marés. Para tal, foi avaliada a variabilidade espacial e temporal dos nutrientes inorgânicos dissolvidos em conjunto com os parâmetros físico-químicos por meio de diagramas de mistura, razões estequiométricas e análise de componentes principais. O N-amoniaco foi a forma mais representativa de nitrogênio inorgânico dissolvido em ambas as estações com valores máximos de 199  $\mu\text{M}$ , subsidiando a produtividade primária, com valor máximo de clorofila a de 122  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . O elevado nível de N-amoniaco esteve associado também ao lançamento de efluentes domésticos, à aquicultura e à degradação da matéria orgânica que ocorrem nas áreas de manguezais ao longo do furo do Muriá. O fosfato, entre os nutrientes dissolvidos, foi o que mais sofreu ação neutralizadora, com baixas concentrações, de forma a não oferecer sinais de eutrofização. As concentrações de sílica sofreram influência das variações de marés e fluxos das águas. No geral, os resultados obtidos permitiram observar uma entrada excessiva de nutrientes ao longo do furo do Muriá, com oscilações em suas concentrações influenciadas pela sazonalidade, pelas marés e pelas atividades antrópicas, indicando um ambiente altamente dinâmico que influencia diretamente a produtividade primária da região.

**Palavras-chave:** nitrogênio; fósforo; silicato; estuários.

The present study was carried out in the Muriá or Maripanema borehole estuary located in the Atlantic Coast sector of Salgado, Northern Brazil, with the objective of understanding the dynamics of the dissolved nutrients at the water-air interface and the mechanisms of their interaction with the abiotic and biotic parameters (chlorophyll a). This system is influenced by seasonality, which involves aspects of tidal regimes. For this, the spatial and temporal variability of dissolved inorganic nutrients was evaluated together with physical-chemical parameters through mixture diagrams, stoichiometric ratios, and Principal Component Analysis. Ammoniacal N was the most representative form of dissolved inorganic nitrogen in both seasons with maximum values around (199  $\mu\text{M}$ ) subsidizing primary productivity, with a maximum chlorophyll value of (122  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ). The high level of N-ammonia was also associated with the release of domestic effluents, aquaculture and degradation of organic matter that occur in the mangrove areas along the Muriá borehole. Phosphate, among the dissolved nutrients, was the one that suffered the most neutralizing action, with low concentrations, so as not to offer signs of eutrophication. Silica concentrations were influenced by variations in tides and water flows. In general, the results obtained allowed an excessive intake of nutrients to be observed along the Muriá borehole, with fluctuations in their concentrations influenced by seasonality, tides and anthropic activities indicating a highly dynamic environment that directly influences the primary productivity of the region.

**Keywords:** nitrogen; phosphorus; silicate; estuaries.

<sup>1</sup>Universidade Federal Rural da Amazônia - Belém (PA), Brasil.

<sup>2</sup>Universidade Federal do Pará - Belém (PA), Brasil.

\*Autor correspondente: luanramirez18@gmail.com

Conflitos de interesse: os autores declaram não haver conflitos de interesse.

Financiamento: nenhum.

Recebido: 22/11/2020 - Aceito: 15/02/2022

## INTRODUÇÃO

Os estuários são ecossistemas de transição continente-oceano com alta produtividade e biodiversidade biológica, sustentando importantes bens e serviços ambientais à humanidade, intimamente associados à dinâmica físico-química costeira, incluindo interações entre as variáveis biológicas, meteorológicas e oceanográficas (BERNARDINO *et al.*, 2015). São considerados de extrema importância na produtividade primária, por causa das altas concentrações de nutrientes, além de constituírem habitat natural para aves, mamíferos e peixes, servindo de berçário natural para a desova de muitas espécies (PEREIRA *et al.*, 2010).

Nas últimas décadas, o desenvolvimento de atividades urbano-industriais tem contribuído com o aporte de cargas poluentes para os ecossistemas estuários, pela massiva introdução de efluentes, pela ocupação urbana, pela remoção da cobertura de áreas vegetadas, por intervenções na hidrodinâmica costeira, ou por crescentes atividades pesqueiras e de maricultura, podendo desencadear o processo de eutrofização (MARINS *et al.*, 2007; BERNARDINO *et al.*, 2015).

Com isso, descargas excessivas e alterações nas proporções de nutrientes decorrentes das transformações do uso da terra e de ações antrópicas podem levar ao processo de eutrofização, bem como modificações de teias alimentares aquáticas e ocorrências de eventos hipóxicos severos em ambientes costeiros (TURNER *et al.*, 1994; TURNER, 2002; SUNDARESHWAR *et al.*, 2003; WHITNEY *et al.*, 2005). Tais fatores refletem a necessidade de estudos relacionados à entrada de nutrientes nesses ambientes para melhor compreender a dinâmica e a identificação de possíveis impactos ligados à qualidade da água. Dessa forma, estudos voltados ao monitoramento da qualidade da água vêm sendo desenvolvidos em várias regiões do mundo, fornecendo um conjunto de dados para avaliação quantitativa e boletins que sintetizam os resultados (HUNTER *et al.*, 2013; SHERWOOD *et al.*, 2016; TANGO *et al.*, 2016).

Os nutrientes mais frequentemente associados à limitação e ao crescimento fitoplanctônico incluem nitrogênio (N), fósforo (P) e silicato (Si) (DAY *et al.*, 1989). Além dos nutrientes, destacam-se também a incidência de raios solares, temperatura, regime de marés e ressurgências (LEGENDRE *et al.*, 1995; AGAWIN *et al.*, 2000).

A composição média da biomassa fitoplanctônica descrita por Redfield (1958) serve de referência estequiométrica mais amplamente aplicada para a limitação de nutrientes da produção primária. Logo, quantificar as principais entradas de nutrientes em um ambiente aquático pode mostrar a importância relativa das principais fontes desses compostos que contribuem para a sua concentração, fornecendo subsídios para a gestão da qualidade dos recursos hídricos (PEREIRA FILHO *et al.*, 2016).

Nesse seguimento, o presente estudo teve como objetivo investigar a distribuição espacial e temporal dos nutrientes N, P e Si em um sistema fluvioestuarino amazônico, a fim de caracterizar os mecanismos de interação deles com os parâmetros abióticos e bióticos (clorofila *a*).

## METODOLOGIA

### Área de amostragem

A área objeto do presente estudo está situada no estuário do Rio Curuçá-Pará, localizado no setor Costa Atlântica do Salgado, norte do Brasil. Esse sistema possui uma planície costeira com ambientes transicionais e altamente dinâmicos, resultantes das condições meteorológicas e oceanográficas da região (MÁCOLA e EL-ROBRINI, 2004).

Os rios que compõem o sistema estuarino possuem características de canais de marés, com amplas desembocaduras, e sofrem grande influência marinha. Vários dos canais de maré (localmente chamados de furos) inundam extensas áreas durante a maré alta (CASTELLANOS-GALINDO *et al.*, 2014). Esses ambientes são bastante complexos e importantes para o desenvolvimento econômico local, especialmente aqueles relacionados à pesca e à aquicultura (SOUSA *et al.*, 2013). Entre os canais de maré que compõem o estuário de Curuçá, destaca-se o furo do Muriá ou Maripanema, que se estende por 14 km, ficando permanentemente inundado mesmo na baixa-mar, e permite a conexão entre as águas do Rio Mocajuba e o Rio Curuçá.

O clima da região é do tipo equatorial úmido, de acordo com a classificação Köppen, e apresenta regime pluviométrico médio de 2.100 mm, em que é possível distinguir dois períodos sazonais distintos: chuvoso (janeiro a julho), que acumula 90% da precipitação anual, e menos chuvoso (agosto a dezembro) (RODRIGUES *et al.*, 2013). A série temporal de precipitação do presente estudo foi obtida de dados da estação meteorológica de Curuçá (PA) disponibilizados pela Rede Hidrometeorológica Nacional da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2018).

### Coleta de dados

As amostras de águas superficiais foram coletadas em um trecho de 6 km ao longo do furo do Muriá, localizado entre as coordenadas geográficas 00°43'48" de latitude Sul e 47°51'06" de longitude a Oeste de Greenwich, em 21 pontos distribuídos ao longo do trecho (Figura 1), nos meses de janeiro, fevereiro, março, maio e junho (estação chuvosa) e julho, setembro, outubro e novembro (estação menos chuvosa) de 2015, durante as marés de baixa-mar e preamar, abrangendo ambos os períodos sazonais da região. Os parâmetros físico-químicos (temperatura, pH e salinidade) foram medidos *in situ* com a utilização de uma sonda multiparamétrica da marca Hanna modelo HI 9829.

### Análises químicas

O filtrado obtido no procedimento para determinação dos nutrientes e clorofila *a* das amostras foi obtido pelos filtros GF/F de 0,45 µm. Os nutrientes inorgânicos dissolvidos N-amoniaco ( $\text{NH}_4$ ), nitrito ( $\text{NO}_2$ ), nitrato ( $\text{NO}_3$ ), fosfato ( $\text{PO}_4$ ) e silicato (Si) foram determinados por espectrofotometria na região do visível segundo Grasshoff *et al.* (1999). O nitrogênio inorgânico dissolvido (NID) foi obtido por meio da soma dos valores dos nutrientes nitrogenados (N-amoniaco, nitrito e nitrato), e o oxigênio dissolvido (OD), determinado segundo o método de Winkler (1888), como descrito em Strickland *et al.* (1972).

A determinação da concentração de pigmentos fotossintetizantes (clorofila *a*) foi extraída de filtros de fibra de vidro com 90% de acetona, obtida por espectrofotometria e calculada pela fórmula de Strickland *et al.*, (1972), descrita detalhadamente por Teixeira (1973).

### Tratamento dos dados

#### Análise estatística

As relações entre as variáveis ambientais (parâmetros físico-químicos, nutrientes dissolvidos e clorofila *a*) foram avaliadas por meio de uma análise de componentes principais (ACP), e, para melhorar a detecção de relações não lineares, os dados foram transformados por raiz cúbica *e/ou*  $\log(X+1)$  (LEGENDRE *et al.*, 1998), com a utilização do *software* PAST (HAMMER *et al.*, 2001).

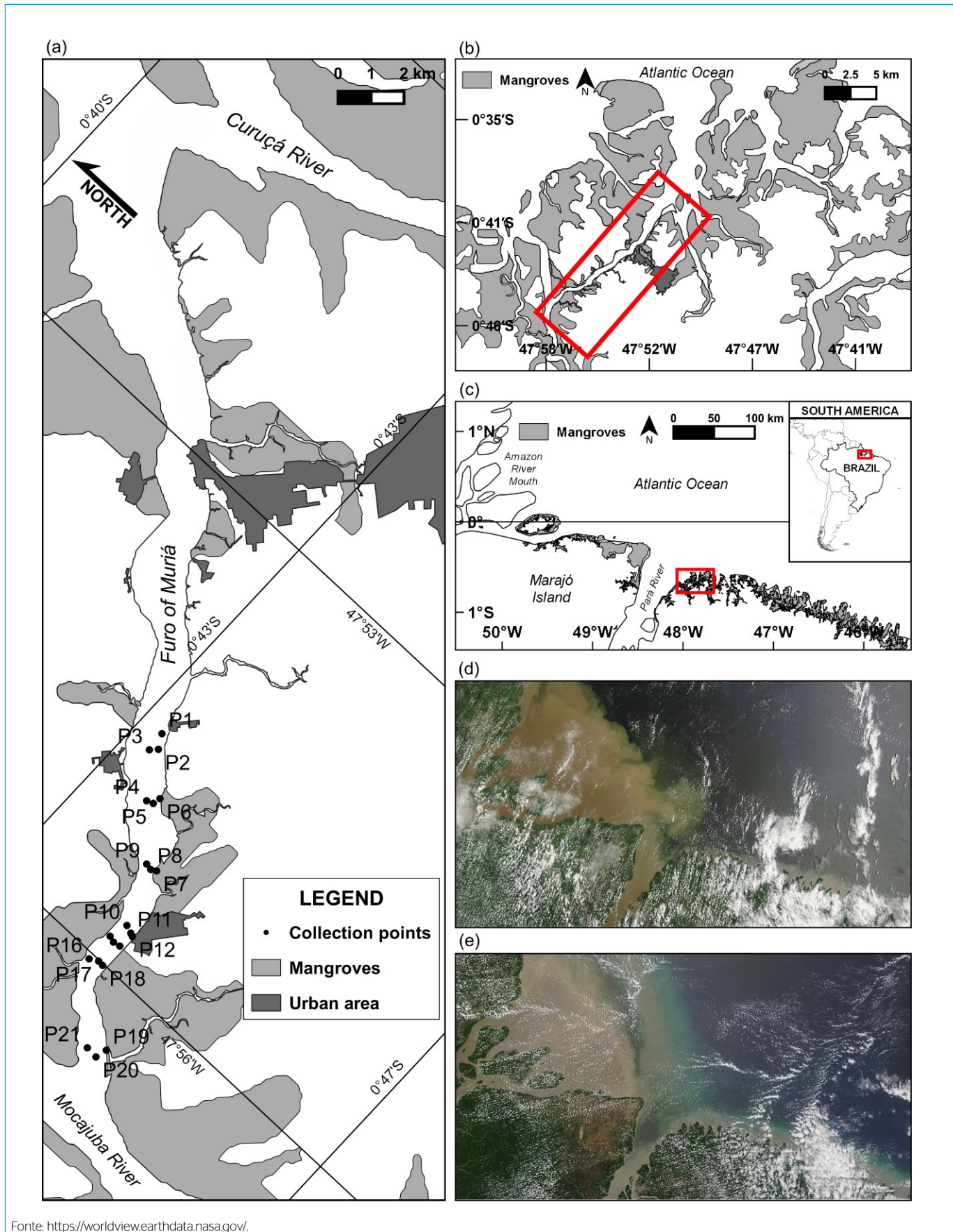


Figura 1 - (A) Posição dos pontos de coleta de águas superficiais ao longo do trecho no furo do Muriá; (B) sistema fluvioestuarino de Curuçá (PA); (C) localização do setor Costa Atlântica do Salgado, norte do Brasil; (D) imagens MODIS-Terra em março de 2015 e (E) em setembro de 2015.

A ACP foi aplicada para todas as variáveis ambientais — salinidade, pH, temperatura, OD, fosfato, silicato, nitrito, nitrato, N-amoniaco e clorofila *a* — das amostras de águas superficiais do furo do Muriá, para melhor resumir os principais padrões de variação das variáveis mensuradas.

Os mapas de distribuição espacial das variáveis ambientais foram elaborados no programa Surfer 8.0 (GOLDEN SOFTWARE, 1999).

### Relação de Redfield

Redfield (1958) estabeleceu uma razão ótima para o crescimento equilibrado do fitoplâncton, no qual desvios fortes desses índices apontam que o nutriente em menor escala se torna limitante se disponível em uma quantidade mínima. No presente estudo a razão entre os nutrientes dissolvidos (nitrogênio, fósforo e silicato) foi estudada com base em seus dados medianos, por representarem valores centrais e minimizar os efeitos nos valores médios das proporções. Esses valores revelam mais claramente tendência de proporcionalidade entre os nutrientes.

### Diagrama de mistura

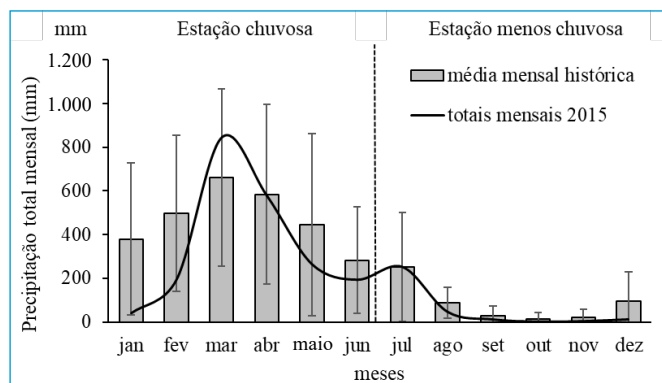
A distribuição espacial dos constituintes dissolvidos foi analisada em função do gradiente de salinidade, para verificar o comportamento das variáveis fosfato, silicato, NID e clorofila *a*, pelo diagrama de dispersão e/ou mistura, indicando quando um elemento é removido ou adicionado no processo de mistura em diferentes salinidades.

Segundo Liss (1976), os pontos alinhados próximos da linha teórica de diluição ou sobre ela indicam um processo de mistura com comportamento conservativo. Caso contrário, se pontos se desviarem da linha teórica de diluição para cima ou para baixo, eles apontam para processos de adição ou remoção do constituinte, sugerindo um comportamento não conservativo.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Regime de chuvas

De acordo com os registros históricos dos últimos 33 anos (1982 a 2015), pôde-se observar a sazonalidade climática típica da região que abrange o setor Costa Atlântica do Salgado, com estações bem definidas (Figura 2), no entanto a precipitação mensal do ano de 2015 apresentou alguns desvios em relação ao padrão histórico, particularmente nos meses que compõem a estação chuvosa



**Figura 2** - Precipitação mensal observada em 2015 e média histórica mensal da precipitação nos últimos 33 anos (1982-2015) no município de Curuçá (PA).

da região (janeiro, fevereiro, março, maio, junho e dezembro), os quais apresentaram comportamento atípico, ou seja, precipitações abaixo da média histórica, com exceção do mês de março, com ocorrência de chuvas intensas, fato associado ao fenômeno El Niño que ocorreu em 2015.

Klein (2015) relatou que o fenômeno El Niño ocorrido entre 2015 e 2016 poderia se tornar um dos mais fortes já registrados. Segundo Yoon *et al.* (2009), apenas uma fração da variabilidade da precipitação na região amazônica pode ser explicada pelo fenômeno, e essa relação é mais atuante sobretudo na estação chuvosa, podendo dessa forma diminuir ou intensificar o volume das precipitações. Logo, o comportamento pluviométrico atípico durante o período de estudo pode ter sido influenciado pelo evento do El Niño, refletindo diretamente no comportamento e na disponibilidade dos nutrientes ao longo do furo do Muriá.

No período de coleta, os meses correspondentes à estação chuvosa acumularam um volume de precipitação de 2.111,6 mm, com destaque para o mês de março, com volume de precipitações acima da média histórica, enquanto na estação menos chuvosa o volume de precipitação foi de 316,3 mm, com destaque para os meses de setembro, outubro, novembro e dezembro, com volumes de chuva praticamente iguais a 0. Apesar de considerado um ano atípico, o volume de precipitação acumulativa alcançou 2.428 mm, que em termos gerais está em conformidade com o limite esperado para a região, o qual apresenta precipitações abundantes ultrapassando 2.000 mm anuais.

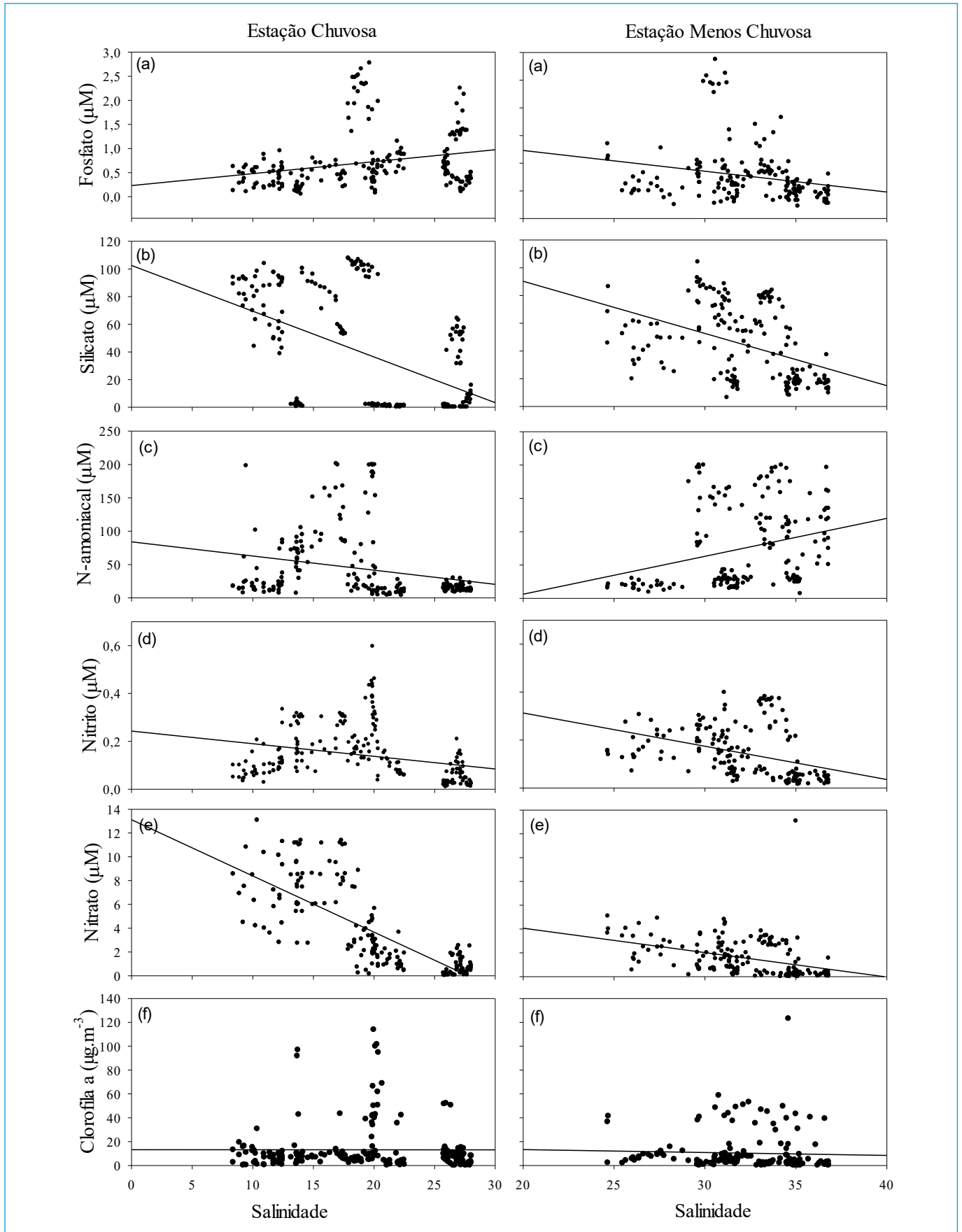
### Distribuição espacial de nutrientes

Para avaliar a distribuição dos nutrientes NID, fosfato e silicato, além da clorofila *a*, em função da salinidade, foram construídos diagramas de mistura para os dados superficiais. Ressalta-se que os pontos alinhados sobre a linha teórica obedecem à diluição física para os componentes conservativos, enquanto os que apresentam desvios positivos e negativos sugerem adição e remoção dos constituintes, gerando comportamento não conservativo.

De modo geral, as concentrações dos constituintes apresentaram comportamento não conservativo em ambas as estações, chuvosa e menos chuvosa, ao longo da amostragem espacial. A distribuição superficial das concentrações de fosfato ao longo do furo do Muriá apresentou valores oscilando de 0,05 a 2,88  $\mu\text{M}$ , revelando forte perfil de remoção ao longo da amostragem espacial independentemente da descarga do rio e do teor de clorofila *a* (Figura 3A), o qual pode ser explicado pelo maior consumo por parte da biomassa fitoplanctônica, indicando um sistema sob ação de baixo impacto ambiental em comparação a ambientes impactados. No sistema estuarino de Santos, por exemplo, foram encontrados valores de fosfato na faixa de 0,60 a 7,17  $\mu\text{M}$  durante o verão e 0,55 a 7,81  $\mu\text{M}$  durante o inverno, denotando um ambiente altamente impactado por ações antropogênicas (BERBEL *et al.*, 2008).

A distribuição do silicato (Figura 3B) tende a diminuir sua concentração à medida que a salinidade aumenta. Durante a estação chuvosa, em razão dos processos de lixiviação dos solos e dos processos erosivos que ocorrem na bacia de drenagem, foi possível observar maior adição de silicato no sistema com concentrações elevadas (107  $\mu\text{M}$ ), enquanto na estação menos chuvosa o silicato tende a ser removido do sistema conforme a salinidade aumenta, com o mínimo detectado de 6,41  $\mu\text{M}$ . Esse padrão de distribuição sazonal do silicato pode ser verificado em outras regiões estuarinas da região amazônica, por exemplo, o estuário de Paracauri, situado na Ilha de Marajó (PA), em que as concentrações de silicato diferiram entre as estações chuvosa (41,46 a 83,10  $\mu\text{M}$ ) e menos chuvosa (14,98 a 31,13  $\mu\text{M}$ ) (MONTEIRO *et al.*, 2015).





**Figura 3** - Diagrama de mistura dos nutrientes dissolvidos: (A) fósforo ( $\mu\text{M}$ ); (B) silicato ( $\mu\text{M}$ ); (C) N-amoniaco ( $\mu\text{M}$ ); (D) nitrito ( $\mu\text{M}$ ); (E) nitrato ( $\mu\text{M}$ ); (F) clorofila a ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ), nas águas superficiais do furo do Muriá, Curuçá (PA), nas estações chuvosa e menos chuvosa da região.

Segundo Edmond *et al.* (2007), as concentrações de silicato nas águas amazônicas podem variar entre 2 e 187  $\mu\text{M}$ , e a influência fluvial é um dos fatores que mais contribuem com o aporte de elementos siliclásticos para os ambientes estuarinos, por causa da sua origem terrígena. No presente estudo a distribuição das concentrações de silicato tende a sofrer variações em suas concentrações sob a influência dos rios Mocajuba e Curuçá e tributários.

Entre as concentrações das formas nitrogenadas (N-amoniaco, nitrito e nitrato) (Figura 3C, D, E), o N-amoniaco foi a mais representativa, com valores oscilando de 7 a 199  $\mu\text{M}$ , enquanto o nitrito (0,01 a 0,04  $\mu\text{M}$ ) e o nitrato (0,01 a 13  $\mu\text{M}$ ) apresentaram baixas concentrações, que podem estar associadas a níveis insaturados de oxigênio, impedindo a conversão eficiente de N-amoniaco em nitrito e nitrato por bactérias (MOLNAR *et al.*, 2013). O incremento de N-amoniaco está associado também a fontes antropogênicas, resultado de excreção biológica e regeneração da matéria orgânica por atividade bacteriana (BHAVYA *et al.*, 2016). No presente estudo os elevados valores de N-amoniaco estão associados a entradas adicionais de fontes alóctones (efluentes domésticos e atividades ligadas à aquicultura), bem como à degradação da matéria orgânica e de detritos advindos dos manguezais (autóctones).

O nitrito é a forma menos estável entre os compostos nitrogenados, o que justifica as baixas concentrações no furo do Muriá, enquanto o nitrato é o resultado final da oxidação completa pela atividade aeróbica de bactérias. Segundo Carmouze (1994), a taxa de regeneração ou formação de nitrato geralmente é menor do que a assimilação pelos produtores primários, resultando em baixas concentrações de nitrato na coluna d'água.

O desequilíbrio da estabilidade dos ecossistemas fluviais pode resultar em graves problemas ambientais, sobretudo em relação à entrada excessiva de nutrientes. Todavia, apesar das concentrações relativamente elevadas de N-amoniaco ao longo do furo do Muriá, não se observaram sintomas clássicos de eutrofização, fato associado à hidrodinâmica física, química e biológica do estuário, desenvolvendo o processo de autodepuração e, por conseguinte, evitando a progressiva deterioração da qualidade da água nesse sistema. Assim, pode-se inferir que o baixo tempo de descarga dos ecossistemas aquáticos tende a melhorar a qualidade da água em função da alta hidrodinâmica e das taxas de exportação (STRUYF *et al.*, 2004).

A distribuição superficial da clorofila *a* (Figura 3F) apresentou comportamento característico de ambientes com grande disponibilidade de MID, favorecendo o processo de produção e consumo da biomassa fitoplanctônica, com valores oscilando de 0,08 a 122  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , promovendo um estado de equilíbrio entre produção e consumo. Ou seja, mesmo havendo uma carga significativamente elevada de nutrientes nas águas do furo do Muriá, a produção de fitoplâncton manteve-se em equilíbrio ao longo do sistema.

Em geral, tem sido reportado que o crescimento de algas é limitado pelos compostos nitrogenados em águas marinhas e estuarinas (ELSER *et al.*, 2007; HOWARTH *et al.*, 2006), enquanto o crescimento do fitoplâncton é predominantemente afetado pela disponibilidade de luz sob condições saturadas de nutrientes em corpos d'água eutróficos (PENNOCK, 1985; WOFSEY, 1983).

## Relações estequiométricas

A relação entre compostos nitrogenados (NID), fosfatados (PID) e silicosos (DSi) é um ponto importante que determina qual elemento será o fator

limitante e, conseqüentemente, aquele que deverá ser controlado com o intuito de reduzir o crescimento exagerado do fitoplâncton.

Em geral, durante o período de estudo, as razões entre NID:PID não revelaram desvios significativos entre as estações chuvosa e menos chuvosa. Dessa forma, a sazonalidade não influenciou de forma direta os valores das proporções. A relação NID:PID das amostras de águas superficiais do furo do Muriá apresentou razão média (123:1) superior à estabelecida por Redfield (16:1), indicando a prevalência das formas nitrogenadas, com forte contribuição de N-amoniaco, como observado no diagrama de mistura. As alterações entre as razões NID:PID podem interferir diretamente na estrutura da comunidade fitoplanctônica, uma vez que as diferentes espécies presentes nos ambientes aquáticos têm suas necessidades nutricionais específicas para o metabolismo celular e reprodução, podendo responder de diferentes modos a essas alterações ao longo de um gradiente de estado trófico (DOWNING *et al.*, 1992).

Segundo Howarth (1988) e Fisher *et al.* (1995), muitas vezes é difícil prever se NID ou PID limita a produtividade do fitoplâncton com base somente em dados de nutrientes. Portanto, a entrada maciça de matéria orgânica e nutrientes de fontes antrópicas (alóctones) conduziu um incremento maior de NID ao longo do furo do Muriá, ocasionando uma discrepância da razão entre esses compostos. Esse aumento advindo de influências antropogênicas pode ocasionar mudanças físico-químicas no estuário, bem como efeitos na biogeoquímica da água (SOLOMON *et al.*, 2007; VAN DE WAAL *et al.*, 2009).

A razão média entre DSi:PID sofreu influência da sazonalidade com proporções superiores que as estabelecidas por Redfield (16:1). Durante a estação chuvosa a média da razão DSi:PID foi 81:1, enquanto na estação menos chuvosa a razão DSi:PID foi 62:1. Esse padrão diferencial de distribuição da DSi ao longo da variação sazonal é esperado, uma vez que a influência fluvial, o regime de chuvas e as alterações que ocorrem na bacia de drenagem, principalmente durante a estação chuvosa, favorecem o processo de lixiviação dos solos, carreando sedimentos e elevando os níveis das concentrações da DSi.

## Variação espacotemporal

No furo do Muriá, a ACP evidenciou que os três primeiros componentes representaram 65% da variância total, explicitando forte influência da sazonalidade sobre as variáveis ambientais ao longo do primeiro componente (PC1), podendo-se observar a nítida separação de dois grupos distintos que se referem às estações chuvosa (janeiro a junho), localizada no primeiro e no segundo quadrante à esquerda, e menos chuvosa (julho a dezembro), localizada no primeiro e no segundo quadrante à direita. Os escores em cinza correspondem aos meses de janeiro e junho que seguiram padrão atípico no período, acompanhando a variação interanual. O PC1 concentrou 31,7% da variância total, destacando as variáveis salinidade (0,47), OD (0,45), temperatura (0,41) e nitrato (-0,48).

Na estação menos chuvosa foram observados maiores valores para as variáveis salinidade, OD e temperatura. A correlação positiva entre essas variáveis indica maior aporte de águas costeiras advindas do Rio Mocajuba, o qual sofre maior influência oceânica adentrando no furo do Muriá, elevando o grau de salinidade e teores de oxigenação das águas, enquanto a temperatura está relacionada ao baixo índice pluviométrico durante esse período.

Nos gráficos de isolinhas da salinidade, foi constatada a influência das águas do Rio Mocajuba a jusante, no qual os maiores valores de salinidade se mantiveram mais elevados em ambas as estações e variações de maré. Os valores de OD oscilaram durante as estações. Na estação chuvosa em ambas

as marés (baixa-mar e preamar) os maiores valores de OD seguiram a montante em direção ao Rio Curuçá, enquanto na estação menos chuvosa esse padrão se inverteu, com maiores valores de OD em direção ao Rio Mocajuba a jusante (Figura 4).

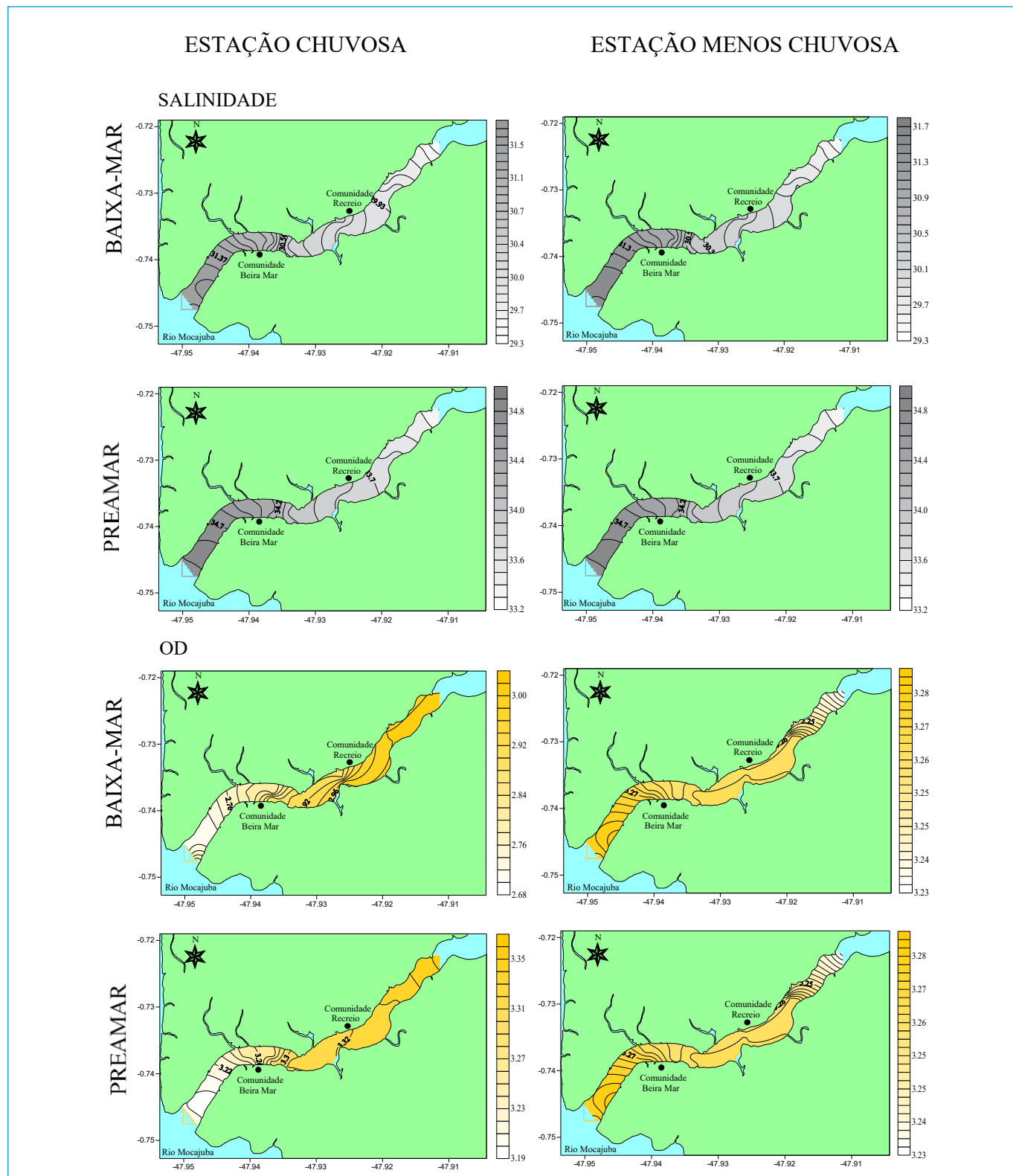


Figura 4 - Representação gráfica das médias dos valores de salinidade e oxigênio dissolvido ao longo da amostragem espacial e variações de maré.

Na estação chuvosa houve a prevalência de nitrato ( $\text{NO}_3$ ) na porção negativa da PC1, resultado final do processo de nitrificação, visto que a relação inversa entre  $\text{NO}_3$  e o OD evidencia reações de oxidação que ocorrem no ciclo do nitrogênio. A distribuição superficial da média dos valores de nitrato evidenciou a influência das águas do Rio Mocajuba na estação chuvosa em ambas as marés preamar e baixa-mar, enquanto na estação menos chuvosa as concentrações de nitrato se inverteram: na baixa-mar seguiu sentido jusante (Mocajuba) e preamar sentido montante (Curuçá), no entanto em menores concentrações (Figura 5).

Diferentemente da PC1, em que o padrão sazonal foi dominante sobre as variáveis salinidade, OD, temperatura e nitrato, o segundo componente (PC2) refletiu a influência da maré vazante (baixa-mar) e concentrou 19,7% da variância total sobre as variáveis silicato (0,64), localizado no quadrante inferior direito e associado principalmente às amostras da baixa-mar de junho, setembro e maio; fosfato (0,41), no quadrante superior direito e associado às amostras da baixa-mar de setembro; e pH (0,41), situado no quadrante inferior direito, cujos maiores valores foram obtidos sobretudo nas amostras de maio em ambas as marés (Figura 6).

A relação positiva entre o silicato e o fosfato está ligada à influência das águas oriundas dos rios da região, favorecendo o aporte desses nutrientes, oriundos de maneira especial dos rios Mocajuba e Curuçá. O fosfato sofreu influência das marés baixa-mar e preamar em ambas as estações, enquanto o silicato durante a estação chuvosa em ambas as marés obteve suas maiores concentrações sentido Rio Mocajuba, obtendo relação direta com a salinidade e o pH, fato associado à lixiviação dos rios (águas fluviais) e ao grande volume de águas que desembocam no oceano pelo Rio Mocajuba. Por sua vez, na estação menos chuvosa o silicato obteve comportamento inverso. Durante a baixa-mar, as maiores concentrações foram em sentido ao Rio Mocajuba e preamar sentido Curuçá, obedecendo dessa forma ao sentido natural das águas do furo do Muriá, que oscilam conforme a dinâmica das marés e o fluxo das águas (Figura 7).

O pH manteve-se alcalino ao longo da amostragem espacial (Figura 8), seguindo o mesmo padrão da salinidade, com maiores valores próximos aos do Rio Mocajuba, o que denota não haver modificações no sistema tampão do ambiente.

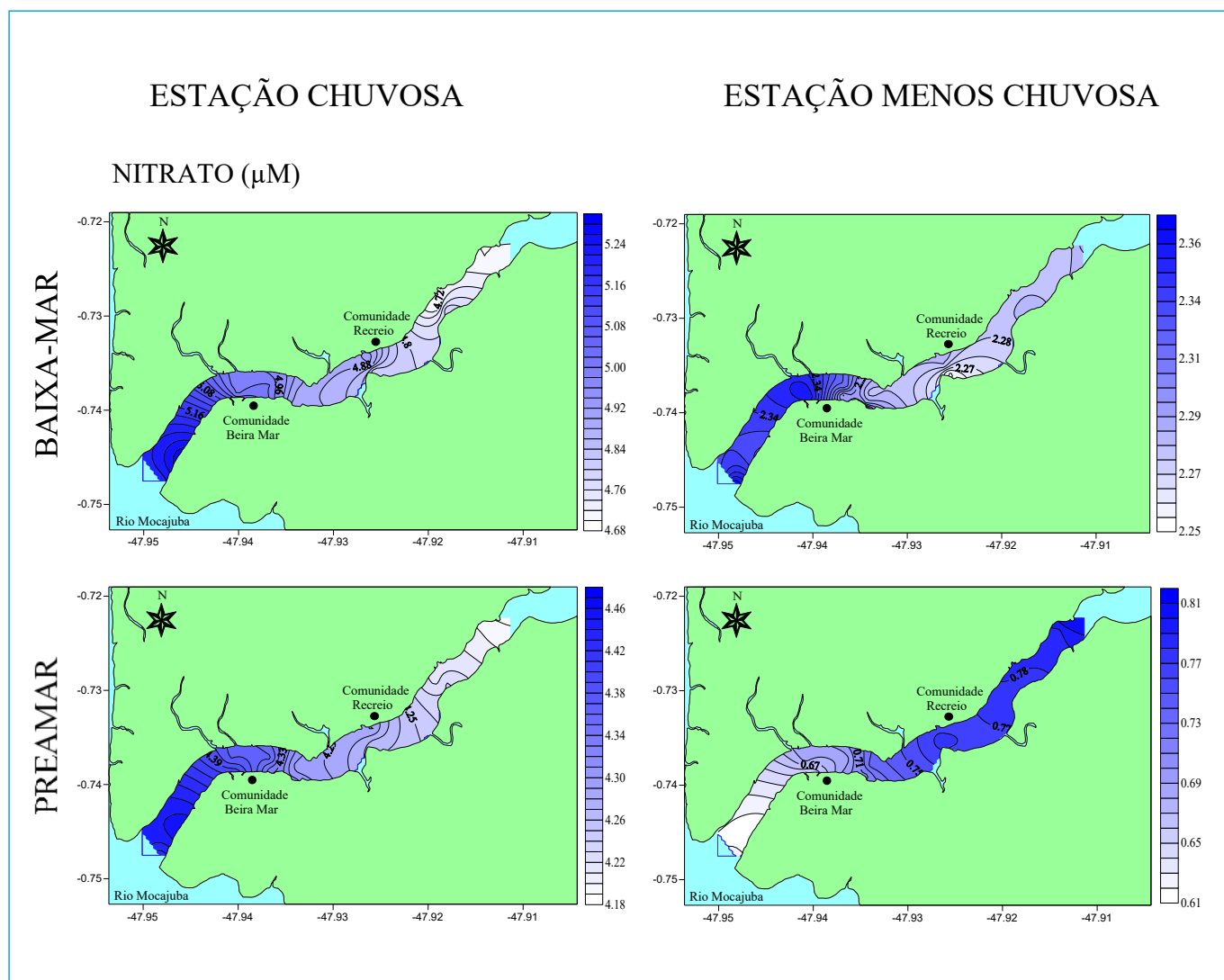
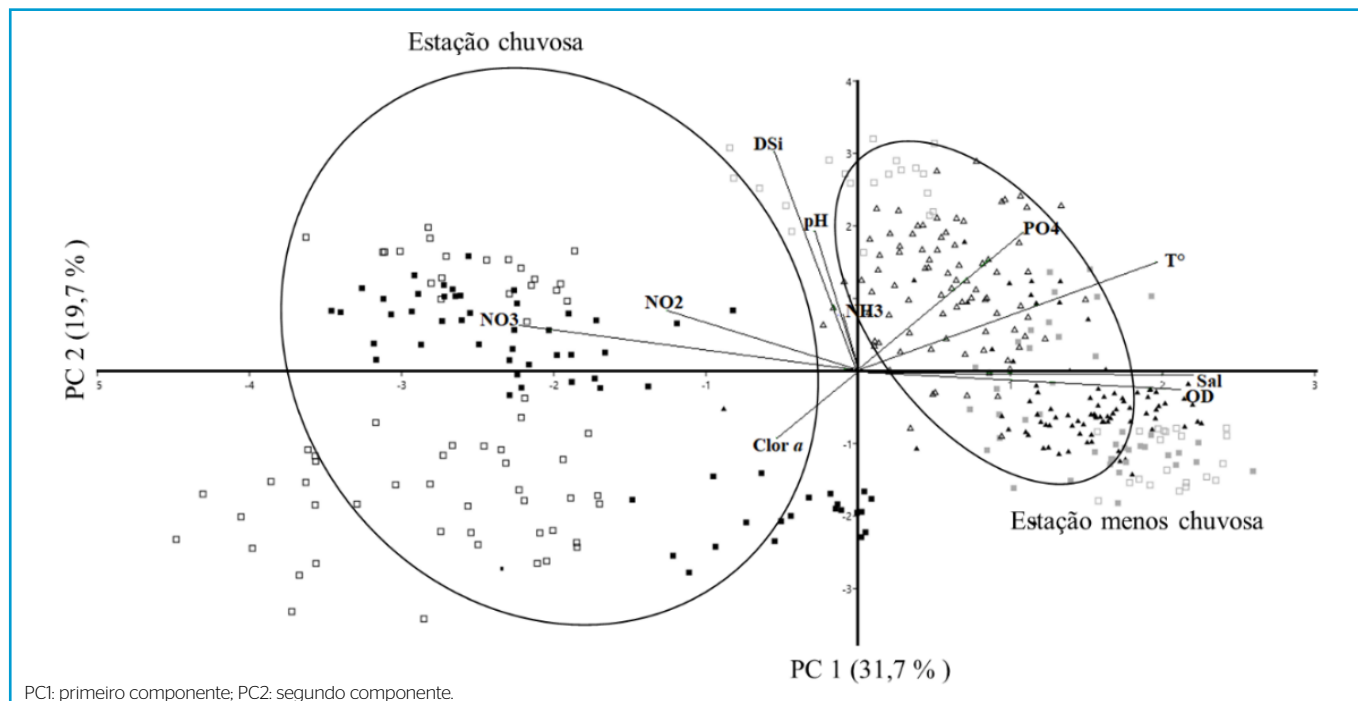


Figura 5- Representação gráfica das médias dos valores de nitrato ao longo da amostragem espacial e variações de maré.





**Figura 6** – Representação gráfica do plano fatorial do primeiro e do segundo componente da análise de componentes principais dos dados gerais da estação chuvosa (quadrados cheios – preamar / quadrados vazados - baixa-mar); estação menos chuvosa (triângulos cheios – preamar / triângulos vazados – baixa-mar). As elipses representam os grupos de amostras formados.

O terceiro componente (PC3) concentrou 15,9% da variância total com o predomínio das variáveis N-amoniaco (0,55) e nitrito (0,53), localizados no quadrante superior direito e associados aos valores dos meses de novembro e dezembro na baixa-mar. O pH correlacionou-se negativamente (-0,43) no quadrante inferior direito (Figura 9).

A correlação positiva entre o N-amoniaco e o nitrito indica processos de oxidação da matéria orgânica que ocorrem durante o ciclo do nitrogênio, no entanto a forte carga de N-amoniaco no furo do Muriá aponta para um possível gradiente de poluição. O N-amoniaco entre as formas nitrogenadas foi o que obteve maiores concentrações (~199,9 μM), sugerindo que esse nutriente está sendo disponibilizado no sistema principalmente pelo processo de amonificação.

A distribuição superficial da média dos valores do N-amoniaco seguiu o mesmo padrão de distribuição da salinidade sob maior influência do Rio Mocajuba (Figura 10).

Os altos valores de N-amoniaco encontrados ao longo do furo do Muriá estão associados a um conjunto de fatores que podem estar afetando o sistema, entre eles: despejo de efluentes domésticos, desenvolvimento de atividades ligadas à aquicultura e degradação da matéria orgânica que ocorre nos mangues, refletindo diretamente nas razões NID:PID. Todos esses fatores puderam ser observados ao longo do período de estudo, contribuindo de forma significativa com a disponibilidade desse nutriente na água. O lado oposto ao gradiente de poluição indica maior influência oceânica, elevando os valores de pH. Esse comportamento dá-se em razão das características das águas oceânicas em termos de salinidade e OD, refletindo a influência da intrusão salina e, conseqüentemente, elevando os valores de pH.

## CONCLUSÕES

A distribuição espacial e temporal dos nutrientes ao longo do furo do Muriá denotou um ambiente altamente dinâmico, sendo influenciado pelo regime sazonal e por variações de maré. O regime de chuvas da região é marcado por um padrão sazonal caracterizado por um período máximo e por outro mínimo de chuvas (estação chuvosa e estação menos chuvosa), o que determina a entrada de águas marinhas no estuário e a lixiviação das planícies alagadas das florestas de manguezais.

O N-amoniaco foi a forma mais representativa de NID em ambas as estações, com valores máximos de ~199 μM, subsidiando a produtividade primária, com valor máximo de clorofila *a* de 122 μg.m<sup>-3</sup>. O elevado nível de N-amoniaco esteve associado também ao lançamento de efluentes domésticos, à aquicultura e à degradação da matéria orgânica que ocorrem nas áreas de manguezais ao longo do furo do Muriá. O fósforo, entre os nutrientes dissolvidos, foi o que mais sofreu ação neutralizadora, com baixas concentrações, de modo a não oferecer sinais de eutrofização, enquanto a distribuição do silicato obedeceu à dinâmica natural das águas do furo do Muriá, oscilando conforme a dinâmica das marés e o fluxo das águas.

Em geral, o aporte dos NID, em destaque o N-amoniaco, revelou forte contribuição antrópica de origem doméstica, atividades ligadas à aquicultura e aporte de matéria orgânica, que tendem a induzir a assimilação preferencial desse íon pelo fitoplâncton, por causa da fácil incorporação pelas células e do baixo gasto energético.

A relação NID:PID teve o fósforo como fator limitante, o que deve ser observado com cautela, por causa da discrepância do NID em relação ao PID, pois se podem evidenciar possíveis processos de eutrofização em função do

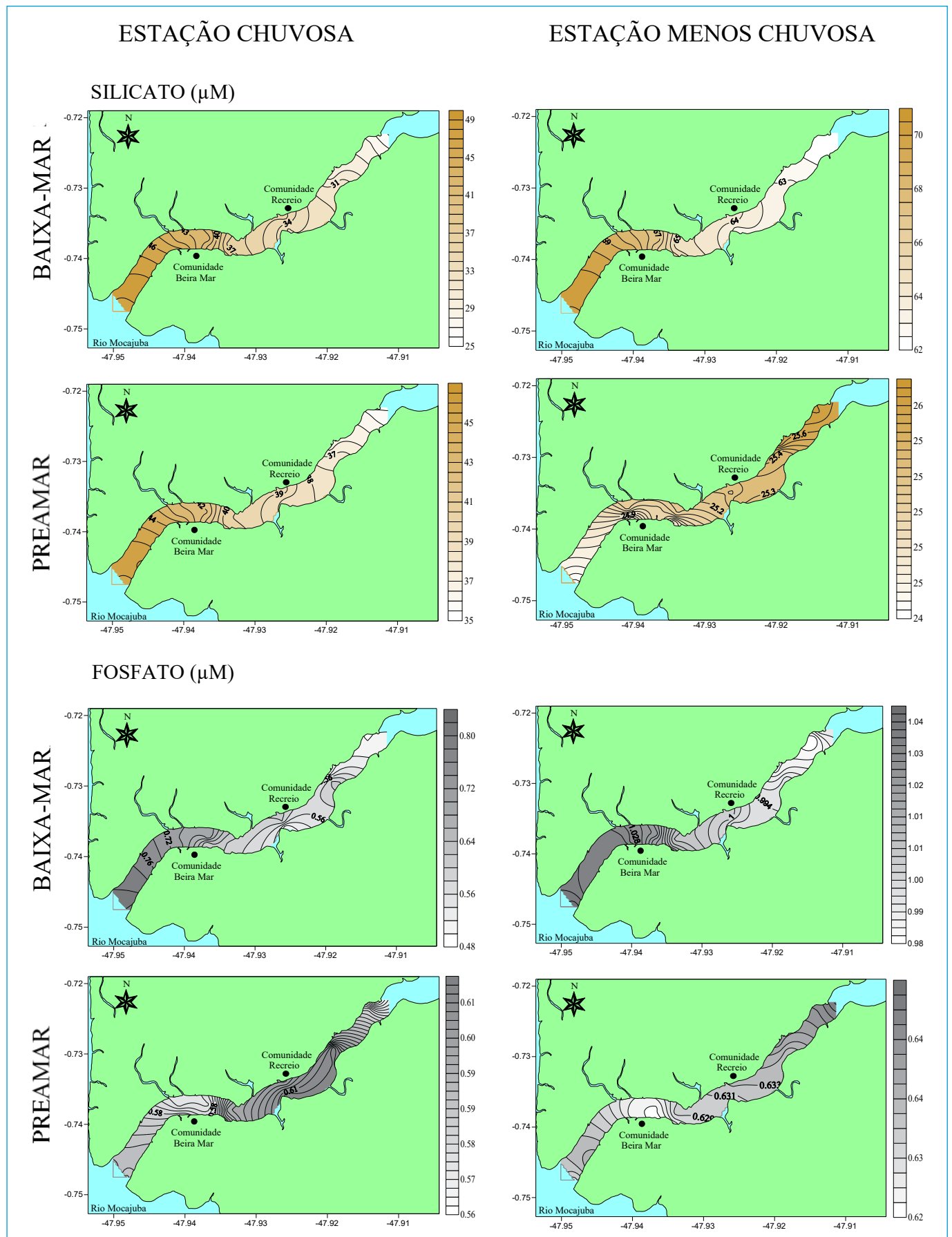


Figura 7 - Representação gráfica das médias dos valores de silicato e fosfato ao longo da amostragem espacial e variações de maré.

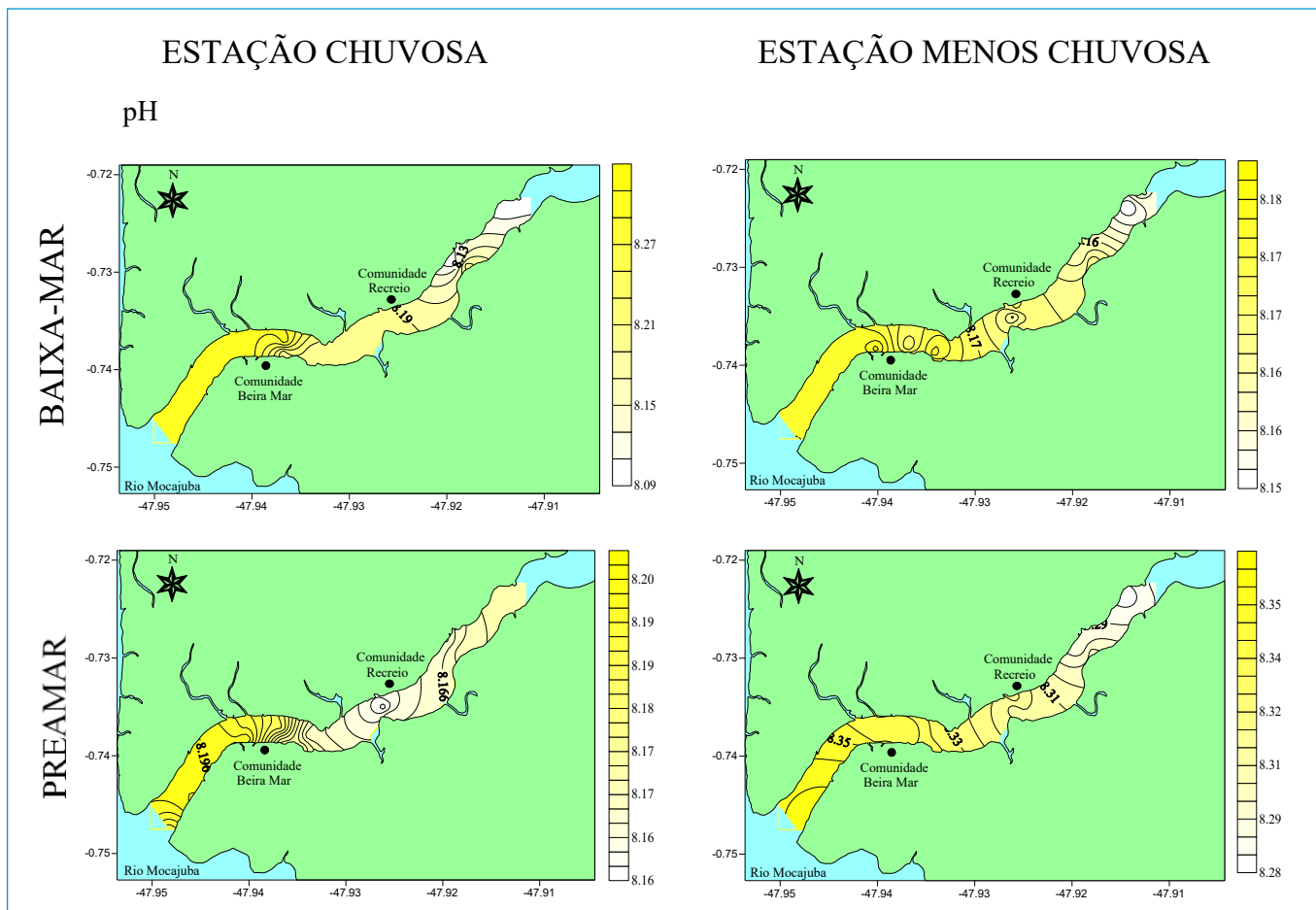
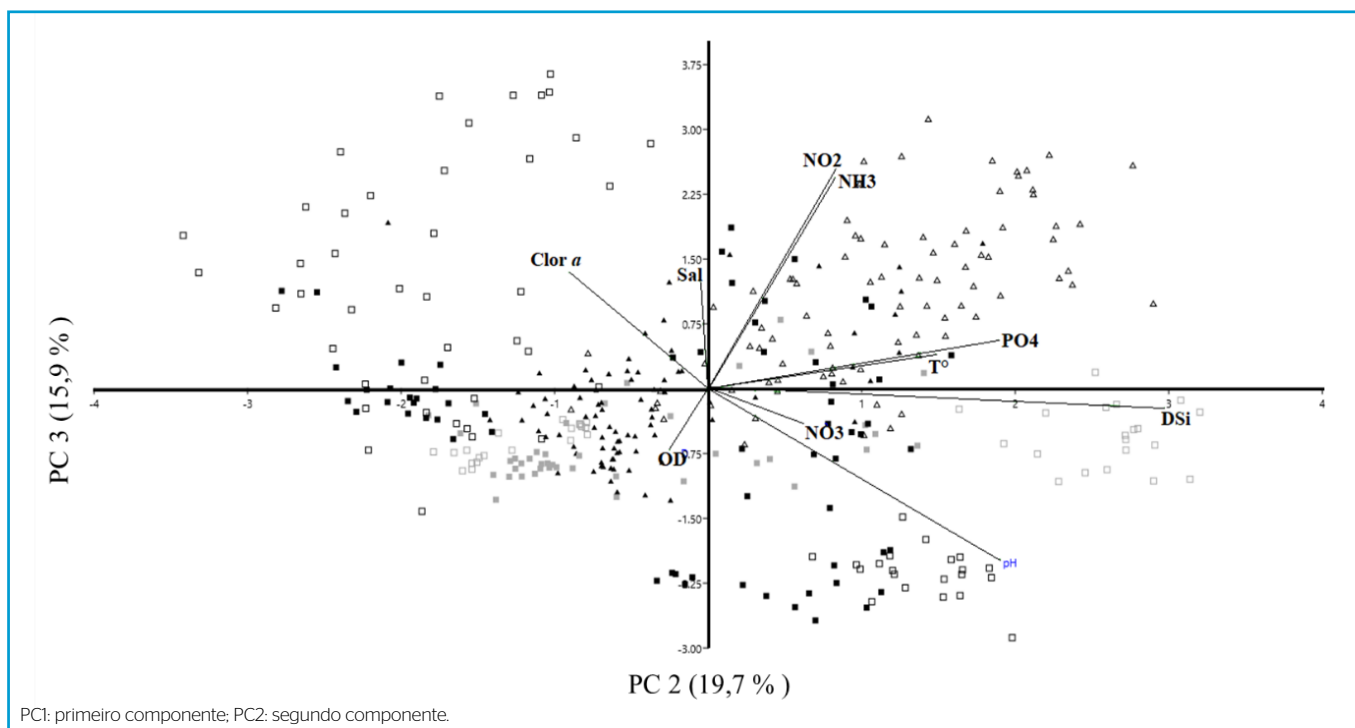


Figura 8 - Representação gráfica das médias dos valores de pH ao longo da amostragem espacial e variações de maré.



PC1: primeiro componente; PC2: segundo componente.

Figura 9 - Representação gráfica do plano fatorial do segundo e do terceiro componente da análise de componentes principais dos dados gerais da estação chuvosa (quadrados cheios – preamar / quadrados vazados – baixa-mar) e estação menos chuvosa (triângulos cheios – preamar / triângulos vazados – baixa-mar).

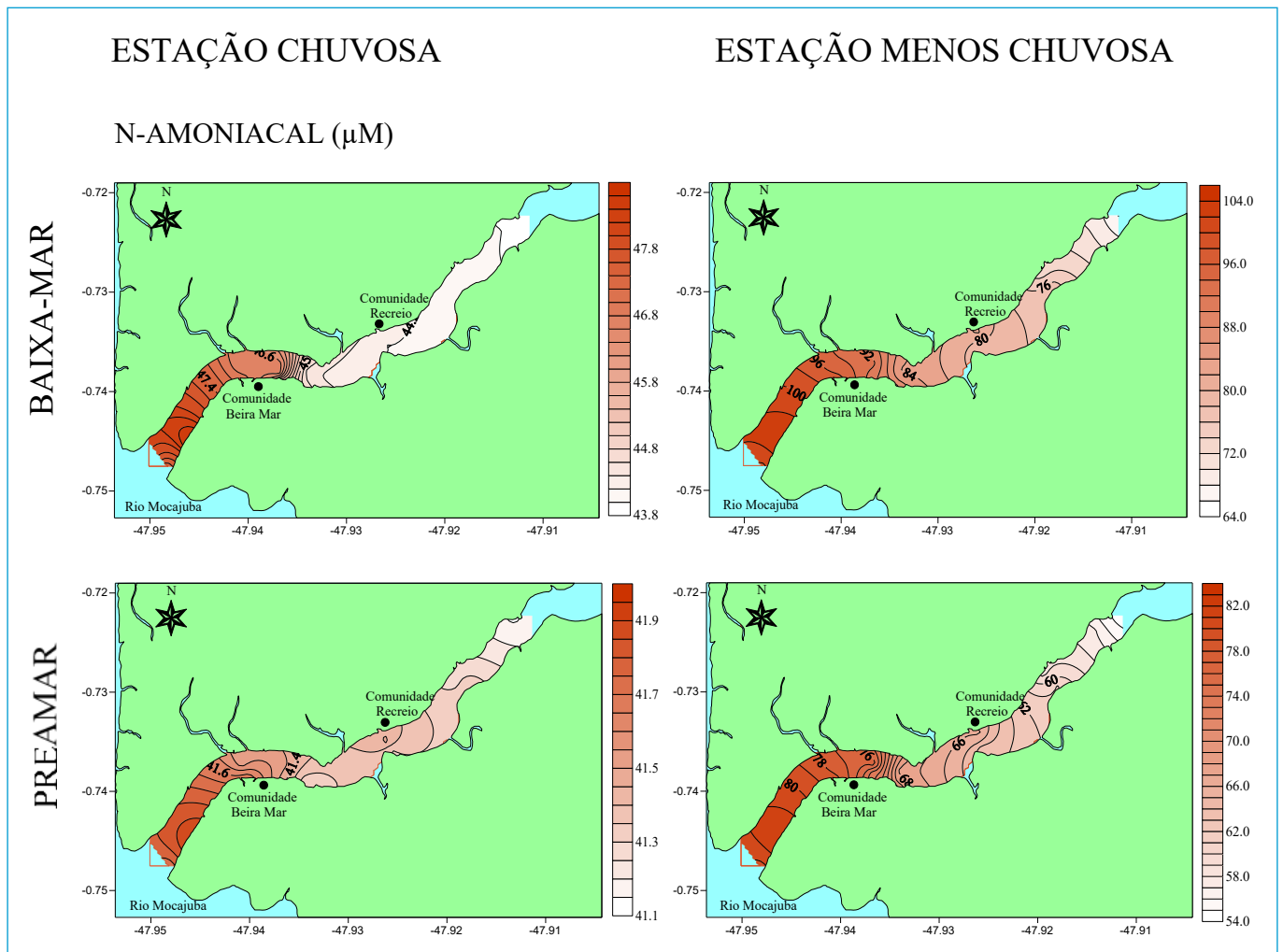


Figura 10 - Representação gráfica das médias dos valores de N-amoniaco ao longo da amostragem espacial e variações de maré.

desbalançamento das formas nitrogenadas pelo excesso de N-amoniaco no sistema. A relação Si:PID indicou novamente o fósforo como fator limitante na área de estudo, na qual o Si mostrou ter efeito pela contribuição das bacias de drenagem por intermédio da lixiviação dos solos. A estabilização do fósforo no furo do Muriá esteve associada ao efeito tampão do pH, mantendo as águas sempre alcalinas durante o período de estudo, influenciando assim nos processos de adsorção e dessorção do fósforo na coluna d'água.

## CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

Santos, R.M.: Conceituação, Curadoria de Dados, Análise Formal, Software, Supervisão. Sousa, P.H.C.: Conceituação. Varela, A.W.P.: Conceituação. Pamplona, F.C.: Curadoria de Dados, Análise Formal, Software, Supervisão. Santos, M.L.S.: Conceituação, Curadoria de Dados, Análise Formal, Obtenção de Financiamento, Investigação, Metodologia, Administração do Projeto, Recursos, Validação, Visualização.

## REFERÊNCIAS

AGAWIN, N.S.R.; DUARTE, C.M.; AGUSTI, S. Nutrient and temperature control of the picoplankton to phytoplankton biomass and production. *Limnology and Oceanography*, v. 45, n. 3, p. 591-600, 2000. <https://doi.org/10.4319/lo.2000.45.3.0591>

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). *Rede Nacional para monitorar a qualidade das águas*. Brasília: ANA, 2018. Disponível em: [http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/medicoes\\_historicas\\_abas.jsf](http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/medicoes_historicas_abas.jsf). Acesso em: 10 de outubro de 2018.

BERBEL, G.B.B.; BRAGA, E.S. Variação sazonal das especiações de fósforo dissolvido e sedimentar e suas inter-relações com parâmetros físicos e químicos em Santos - verão e inverno de 2005. In: BRAGA, E.S. (Org.). *Oceanografia e Mudanças Globais*. São Paulo: Universidade de São Paulo, p. 583-597, 2008.

BERNARDINO, A.F.; BARROS, F.; PEREZ, L.F.; NETTO, S.A.; COLLING, L.A.; PAGLIOSA P.R.; LANA, P.C.; MAIA, R.C.; CHRISTOFOLETTI, R.A.; FILHO, J.S.R.; COSTA, T.M. Monitoramento de ecossistemas bentônicos estuarinos.

- IN: TURRA, A.; DENADAI, M.R. (Org). Protocolos para o monitoramento de habitats bentônicos costeiros - Rede de Monitoramento de Habitat Bentônicos Costeiros - *ReBentos* [online]. São Paulo: Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, p. 134-154, 2015.
- BHAVYA, P.S.; KUMAR, S.; GUPTA G.V.M.; SUDHEESH, V.; SUDHARMA, K.V.; VARRIER D.S.; DHANYA, K.R.E.; SARAVANANE, N. Nitrogen uptake dynamics in a tropical eutrophic estuary (Cochin, India) and adjacent coastal waters. *Estuaries and Coasts*, v. 39, p. 54-67, 2016. <https://doi.org/10.1007/s12237-015-9982-y>
- CARMOUZE, J.P. *O metabolismo dos ecossistemas aquáticos: fundamentos teóricos, métodos de estudos e análises químicas*, Edgard Blücher. São Paulo: FAPESP, p. 254, 1994.
- CASTELLANOS-GALINDO, G.A.; KRUMME, U. Long-term stability of tidal and diel-related patterns in mangrove creek fish assemblages in North Brazil. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v. 149, p. 264-272, 2014.
- DAY, J.; KEMP, W.M.; YANEZ-ARANCIBIA, A. Introduction to estuarine ecology. *Estuarine Ecology*. New York: John Wiley, p. 558, 1989.
- DOWNING, J.A.; MC CAULEY, E. The nitrogen: phosphorus relationships in lakes. *Limnology and Oceanography*, v. 37, n. 5, p.936-945, 1992.
- EDMOND, J.M.A.; SPIVACK, B.C.; GRANT, M.H.; HU, M.H.; CHEN, Z.; CHEN, S.; ELSER, J.J.; BRACKEN, M.E.S.; CLELAND, E.E.; GRUNER, D.S.; HARPOLE, W.S.; HILLEBRAND, H.; NGAI, J.T.; SEABLOOM, E.W.E.; SHURIN, J.B.; SMITH, J.E. Global 50 analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems. *Ecology Letters*, v. 10, p.1135-1142, 2007.
- FISHER, T.R.; MELACK, J.M.; GROBBELAAR, J.U.; HOWARTH, R.W. Nutrient limitation of phytoplankton and eutrophication of inland, estuarine, and marine waters. In: TIESSEN, H. (Ed). *Phosphorus in the global environment: transfers, cycles and management*, Chichester: John Wiley and Sons Ltd, 1995, p. 301-322
- GOLDEN SOFTWARE INC. *Surfer for windows: release 7.0, contouring and 3D surface mapping for scientist's engineer's user's guide*. New York: Golden Software, Inc., 1999, p. 619.
- GRASSHOFF K.; KREMLING K.; EHRHARDT, M. Methods of seawater analysis. *Wiley-VCH Verlag*, p. 419, 1999. <https://doi.org/10.1002/9783527613984>
- HAMMER, Ø.; HARPER, D.A.T.; RYAN, P.D. *PAST: paleontological statistics software package for education and data analysis*. 2001. Disponível em: <http://folk.uio.no/ohammer/past/>. Acesso em: 12 fev. 2018.
- HOWARTH, R.W. Nutrient limitation of net primary producer in marine ecosystems. Annual oiew of Ecology and Sistematics. *Annual Review of Ecology and Systematics*. v. 19, p. 89-110, 1988. <https://doi.org/10.1146/annureves.19.110188.000513>
- HOWARTH, R.W.; MARINO, R. Nitrogen as the limiting nutrient for eutrophication in coastal marine ecosystems: evolving views over three decades. *Limnology and Oceanography*, v. 51, n. 1, p. 364-376, 2006. [https://doi.org/10.4319/lo.2006.51.1\\_part\\_2.0364](https://doi.org/10.4319/lo.2006.51.1_part_2.0364)
- HUNTER, J., GEBERSA, A., DETTRICKA, T. Automating online reef report cards linking land management practices to water quality and coral reef ecosystem health. *Procedia Technology*, v. 8, p.183-191, 2013.
- KLEIN, K. NOAA predicts strong El Niño. *Eos Science News by Agu*, p. 1-2; 2015. Disponível em: <https://eos.org/articles/noaa-predicts-strong-el-nio>. Acesso em: 12 fev 2018
- LEGENBRE, L.; RASSOULZADEGAN, F. Plankton and nutrient dynamics in marine waters. *Ophelia*, v. 41, p. 153-172, 1995.
- LEGENBRE, P.; LEGENBRE, L. *Numerical Ecology*. 2. ed. Amsterdam: Ed. Elsevier, 1998.
- LISS, P.S. Conservative and non-conservative behavior of dissolved constituents during estuarine mixing. In: BURTON, J.D.; LISS, P.S. (Eds.). *Estuarine Chemistry*. New York: Academic Press Inc., p. 93-130, 1976.
- MÁCOLA, G.; EL-ROBRINI, M. *Ilha dos Guarás (Mariteua) - Município de Curuçá (NE do Pará): aspectos físicos, meteorológicos e oceanográficos*. Belém: CHD & GEMC; 2004.
- MARINS, R.V.; PAULA FILHO, F.J.; ROCHA, C.A.S. Geoquímica de fósforo como indicadora da qualidade ambiental e dos processos Estuarinos do rio Jaguaribe - costa nordeste oriental brasileira. *Química Nova*, v. 30, n. 5, p. 1208-1214, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422007000500029>
- MOLNAR, N.; WELSH, D.T.; MARCHAND, C.; DEBORDE, J.; MEZIANE, T. Impacts of shrimp farm effluent on water quality, benthic metabolism and N-dynamics in a mangrove forest (New Caledonia). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v. 117, p. 12-21, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2012.07.012>
- MONTEIRO, S.M.; EL-ROBRINI, M.; ALVES, I.C.C. Dinâmica sazonal de nutrientes em estuário amazônico. *Mercator*, v. 14, n. 1, p. 151-162, 2015.
- PENNOCK, J.R. Chlorophyll distributions in the Delaware estuary: regulation by light-limitation. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v. 21, n. 5, p. 711-725, 1985. [https://doi.org/10.1016/0272-7714\(85\)90068-X](https://doi.org/10.1016/0272-7714(85)90068-X)
- PEREIRA FILHO, J.; RÖRIG, L.R. Balanço de massa para nutrientes inorgânicos (N e P) no Estuário do Rio Itajaí-Açu, SC. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 21, n. 1, p. 168-187, 2016. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v21n1.p168-187>
- PEREIRA, M.D.; SIEGLE, E.; MIRANDA, L.B.; SCHETTINI, C.A.F. Hidrodinâmica e transporte de material particulado em suspensão sazonal em um estuário dominado por maré: Estuário de Caravelas (BA). *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 28, p. 427-444, 2010.
- REDFIELD, A.C. The biological control of chemical factors in the environment. *American Scientist*, v. 46, p. 205-222, 1958. PMID: 24545739
- RODRIGUES, J.C.; SOUZA, P.J.O.P.; LIMA, R.T. Estimativa de temperaturas basais e exigência térmica em mangueiras no nordeste do estado do Pará. *Revista Brasileira de Fruticultura*, v. 35, n. 1, p. 143-150, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0100-29452013000100017>
- SHERWOOD, E.T.; GREENING, H.S.; JANICKI, A.J.; KARLEN, D.J. Tampa Bay estuary: monitoring long-term recovery through regional partnerships. *Regional Studies in Marine Science*, v. 4, p. 1-11, 2016.
- SOLOMON, S.; QIN, D.; MANNING, M.; MARQUIS, M.; AVERYT, K.; TIGNOR, M.M.B.; MILLER JUNIOR, H.L.; CHEN, Z. *Climate change 2007: the physical science basis*. Contribution of Working Group to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007
- SOUSA, J.A.; CUNHA, K.N.; NUNES, Z.M.P. Influence of seasonal factors on the quality of the water of a tidal creek on the Amazon Coast of Brazil. *Journal of Coastal Research*, Special Issue, v. 65, p. 129-134, 2013.



- STRICKLAND, J. D. H.; PARSONS, T. R. *A Practical handbook of seawater analysis*. Toronto: Fisheries Research Board of Canada, v. 767, 1972. 311 p.
- STRUYF, E.; VAN DAMME, S.; MEIRE, P. Possible effects of climate change on estuarine nutrient fluxes: a case study in the highly nutrified Schelde estuary (Belgium, The Netherlands). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v. 60, n. 4, p. 649-661, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2004.03.004>
- SUNDARESHWAR, P.V.; MORRIS, J.T.; KOEPFLER, E.K.; FORNWALT, B. Phosphorus limitation of coastal ecosystem processes. *Science*, v. 299, p. 563-565, 2003.
- TANGO, P.J.; BATIUK, R.A. Chesapeake bay recovery and factors affecting trends: long term monitoring, indicators, and insights. *Regional Studies in Marine Science*, v. 4, p. 12-20, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2015.11.010>
- TEIXEIRA, C. Introdução aos métodos para medir a produção primária do fitoplâncton marinho. *Boletim do Instituto Oceanográfico*, v. 22, p. 59-92, 1973. <https://doi.org/10.1590/S0373-55241973000100004>
- TURNER, R.E. Element ratios and aquatic food webs. *Estuaries*, v. 25, p. 694-703, 2002.
- TURNER, R.E.; RABALAIS, N.N. Coastal eutrophication near the Mississippi river delta. *Nature*, v. 368, p. 619-621, 1994.
- VAN DE WAAL, D.B.; VERSPAGEN, J.M.H.; LÜRLING, M.; VAN DONK, E.; VISSER, P. M.; HUISMAN, J. The ecological stoichiometry of toxins produced by harmful cyanobacteria: an experimental test of the carbon-nutrient balance hypothesis. *Ecology Letters*, v. 12, n. 12, p. 1326-1335, 2009. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2009.01383.x>
- WHITNEY, F. A., CRAWFORDA, W. R., HARRISON, P. J. Physical processes that enhance nutrient transport and primary productivity in the coastal and open ocean of the subarctic NE Pacific. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, v. 52, p. 681-706, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2004.12.023>
- WOFSY, S. C. A simple model to predict extinction coefficients and phytoplankton biomass in eutrophic waters. *Limnology and Oceanography*, v. 28, n. 6, p.1144-1155, 1983. <https://doi.org/10.4319/lo.1983.28.6.1144>
- YOON, J.H.; ZENG, N. An Atlantic influence on Amazon rainfall. *Climate Dynamics*, v.34, p. 249-264, 2009.

