

Aspectos da hidrodinâmica do sistema estuarino Piraquê-Açu e Piraquê-Mirim, sudeste do Brasil

Hydrodynamics aspects of the Piraquê-Açu e Piraquê-Mirim estuarine system, Southeastern Brazil

Rafael Carvalho Neves^{ac}, Valéria da Silva Quaresma^{ad}, Amine Selim de Salles Gonçalves Melado^{ae}, Fernanda Paula Silva e Nascimento^{bf}, Rodolfo Teixeira Alves^{ag}, Alex Cardoso Bastos^{ah}

^aUniversidade Federal do Espírito Santo (UFES), ^bLeibniz Institute for Baltic Sea Research Warnemünde (IOW)
^crafaelceanografia@yahoo.com.br, ^dvdsquaresma@gmail.com, ^eaminesalles@gmail.com, ^ffenascimento paula@gmail.com,
^grtalves@gmail.com, ^halexcardosobastos@gmail.com

Resumo

Essa pesquisa visa caracterizar e interpretar a hidrodinâmica nos dois braços e proximidade da desembocadura do Sistema Estuarino Piraquê-Açu e Piraquê-Mirim, localizado no município de Aracruz, Estado do Espírito Santo. Apesar da sua importância ecológica regional, este sistema estuarino possui histórico de impactos causados por atividades humanas, como pesca, lançamento de esgoto e efluentes de atividades agrícolas e industriais. Dados hidrodinâmicos obtidos com ADCPs e dados físicos da coluna d'água obtidos com CTDs foram coletados simultaneamente ao longo dos ciclos de maré sizígia e quadratura, durante as campanhas chuvosa e seca do ano de 2010, no braço norte e sul, bem como na proximidade da desembocadura. A intensidade das correntes no braço sul foi superior em todas as campanhas amostrais, quando comparadas ao braço norte. Entretanto, a assimetria de maré foi verificada nos dois braços. No braço norte, a mistura vertical foi condicionada pela velocidade das correntes, com tendência de estratificação nos 2 m superficiais durante as quadraturas e mistura da coluna d'água nas sizíguas. O braço sul não apresentou estratificação evidente em nenhuma campanha amostral. Próximo à desembocadura ocorreram as maiores salinidades durante o período seco, quando comparadas ao período chuvoso. A coluna d'água apresentou pouca mistura nas campanhas da quadratura e predomínio de mistura durante as sizíguas, com correntes de até 1,75 m/s na maré vazante. Os padrões de fluxo residual predominante nas proximidades da desembocadura estão de acordo com a circulação gravitacional clássica com indicação de transporte sedimentar em direção ao oceano nas camadas superficiais e em direção ao interior do estuário nas camadas mais profunda. Também foi observada uma grande influência da batimetria no fluxo residual encontrado na proximidade da desembocadura com a formação de vórtices entre o canal e a margem.

Palavras-chave: dinâmica estuarina, estratificação da coluna d'água, fluxo residual.

Abstract

This research aims to characterize and interpret the hydrodynamics in the two arms and next to the Piraquê-Açu and Piraquê-Mirim Estuarine System mouth, located in Aracruz, Espírito Santo, Brazil. Despite its regional ecological importance, this estuarine system has a damage history caused by human activities, such as fishing, sewage discharge and effluents from agricultural and industrial activities. ADCP and CTD data were collected simultaneously in the north and south arm, as well as next the estuarine system mouth, during spring and neap tides on the rainy and dry local seasons in 2010. The currents intensity on the south arm was higher as north arm in all sample surveys. However, ebb asymmetry was verified in the two arms. In the north arm, vertical mixing were conditioned by the current intensity, with a stratification trend up to 2 m from surface during neap tides and column mixing during the spring tides. The south arm did not have evident stratification in any sampling campaign. Next to the estuarine system mouth, high salinity was verified during the dry period, when compared to the rainy period. The water column showed little mixing during the neap tide and a mixing predominance during the spring tide, with currents up to 1.75 m/s. The residual flow patterns next to the estuarine system mouth are in accordance with the classic gravitational circulation. There is an apparent sediment transport to the ocean in the surface layers and a preferential direction to into the estuary on the bottom layers. A great influence of the bathymetry in the residual flow was also observed next to estuarine mouth with resultant eddies between the channel and the margin.

Key-words: estuarine dynamics, water column stratification, residual flow.

1. Introdução

A enorme relevância das áreas costeiras em termos ecológicos, econômicos e sociais torna essencial o conhecimento e a análise dos processos atuantes em

regiões estuarinas para o seu correto manejo e mitigação de problemas ambientais, associados à dinâmica natural e a ação humana. Os estuários são ambientes costeiros caracterizados por se localizarem

na interface continente-oceano com histórico de amplo desenvolvimento de atividades humanas, como portos, complexos industriais e centros urbanos, além da ocorrência de atividades pesqueiras, recreação e turismo, sendo importante fonte de sustento de inúmeras famílias (Gomes, 2007).

Estudos sobre a dinâmica estuarina fornecem informações valiosas sobre a qualidade da água local, devido à natureza coesiva das argilas associada à adsorção e o transporte de matéria orgânica, nutrientes e metais pesados agregados a essas partículas (Bianchi, 2007). O sedimento estuarino pode apresentar concentrações de poluentes com várias ordens de grandeza a mais, quando comparadas à água presente na coluna d'água, pois o estuário age como um filtro natural do material particulado e dissolvido originado nas bacias hidrográficas e carregado pelos rios em direção ao mar (Dyer, 1995).

As características hidrodinâmicas, sedimentares, morfológicas e biológicas dos estuários são influenciadas principalmente pelo regime de aporte fluvial com a sua carga sedimentar e pela atuação das forçantes oceanográficas características da região costeira adjacente. Além disso, o cisalhamento do vento na interface ar-água, a geometria do estuário, os parâmetros físico-químicos da água e a influência do efeito de Coriolis não podem ser negligenciados (Dronkers, 1986). Esses fatores também são fundamentais para caracterização dos processos de mistura, circulação e estratificação da coluna d'água, bem como eficiência na retenção de materiais particulados e dissolvidos no estuário (Kjerfve, 1988; Miranda et al. 2002).

Tendo em vista a carência de estudos na literatura que abordem a variabilidade da hidrodinâmica no Sistema Estuarino Piraquê-Açu e Piraquê-Mirim (SEPAPM), o presente artigo tem como objetivo principal descrever o padrão de circulação observado nos dois braços e na proximidade da desembocadura do estuário durante a atuação de diferentes regimes de maré (sizígia e quadratura) e aporte de água fluvial (períodos chuvoso e seco).

O entendimento dos processos atuantes no SEPAPM também possui grande relevância para as comunidades locais, em decorrência das atividades econômicas desenvolvidas na região, como navegação, pesca e turismo. Além disso, este sistema estuarino possui enorme importância ecológica pela extensa área de manguezal no seu entorno, dentro da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Municipal Piraquê-Açu e Piraquê-Mirim, e pela localização da sua desembocadura adjacente à Área de Proteção Ambiental Costa das Algas e o Refúgio de Vida Silvestre de Santa Cruz para preservação da elevada biodiversidade associada à ocorrência de bancos e pradarias de algas marinhas.

2. Materiais e métodos

2.1 Área de estudo

O SEPAPM está localizado no município de Aracruz, Estado do Espírito Santo – Brasil, e apresenta uma forma de “Y”, com sua abertura para o oceano orientada para leste e os seus braços norte e sul voltados, respectivamente, para noroeste e oeste em direção ao continente (Figura 1). O aporte fluvial deste sistema estuarino é advindo do rio Piraquê-Açu no braço norte, com uma área de drenagem de 376 km², e do rio Piraquê-Mirim no braço sul com uma área de drenagem de 69 km² (Coser et al., 2007). Quanto aos aspectos geológicos e geomorfológicos, o SEPAPM possui características de um estuário formado pelo afogamento dos vales dos rios durante a última elevação do nível do mar no período Quaternário (Dalrymple et al., 1992) e está localizado no compartimento de costas famintas intercaladas por deltas, descrita por Dominguez (1999). Essa região da costa é caracterizada por falésias da Formação Barreiras e baixo desenvolvimento de depósitos de planícies quaternárias. Silva et al. (2014) descreve um modelo de fácies sedimentares para o SEPAPM, incluindo fácies marinhas na foz do sistema estuarino até a bifurcação dos dois braços, fácies estuarinas no braço sul e no braço norte, até aproximadamente 11km para o continente, e fácies fluviais na porção continental do braço norte. Os autores ainda pontuam que o braço sul apresenta fácies descritas como reliquias que seriam um hiato estratigráfico marcado por processo erosivo moderno.

Classificado como tropical úmido-seco, o clima da região apresenta grande associação sazonal entre a temperatura e a umidade, tendo no verão uma intensificação nos índices pluviométricos (~200 mm/mês), enquanto que nos períodos mais frios, há uma diminuição da pluviosidade (~70 mm/mês) (Mendonça e Oliveira, 2007). As precipitações frontais ocorrem durante os meses de inverno, com a entrada de frentes frias, formadas pela atuação de sistemas atmosféricos extratropicais (Amarante et al., 2009). Quanto à maré, a sua amplitude em todo o litoral do Estado do Espírito Santo é caracterizada como micromaré com amplitudes máximas de 1,7 m (DHN, 2021). A vegetação do manguezal possui uma considerável preservação no entorno do SEPAPM, correspondendo à aproximadamente 12 km² (Arrivabene et al. 2014).

2.2 Dados hidrodinâmicos e característica física da coluna d'água

O ano de 2010 foi atípico com a inversão do padrão normal de pluviosidade da região: o verão apresentou anomalias negativas de pluviosidade nas bacias hidrográficas dos rios que desaguam no SEPAPM, enquanto durante o inverno, a região de estudo apresentou anomalias positivas de pluviosidade (Figura 2), devido ao fenômeno El Niño de intensidade

moderada ocorrido no mesmo período (Kayano et al. 2016). As amostragens do período chuvoso anômalo ocorreram nos dias 23 de fevereiro (quadratura) e 01 de março de 2010 (sizígia) e as do período seco anômalo nos dias 20 (quadratura) e 26 de julho de 2010 (sizígia).

A representação dos pontos coleta, juntamente com o dia amostral, foi representada a partir de quatro letras. As duas letras iniciais representam a estação de coleta (PA, PM ou DE para o braço norte – Piraquê-Açu, braço sul – Piraquê- Mirim e proximidade da desembocadura da SEPAPM, respectivamente), a terceira letra indica a maré de quadratura (Q) ou sizígia (S) e a quarta letra representa a estação chuvosa (C) ou seca (S).

Foram realizadas medições dos parâmetros físico-químicos da água em dois pontos fixos localizados nas estações PA e PM e ao longo de um transecto na estação DE, com orientação norte-sul (Figura 1). As séries temporais com dados de corrente, bem como temperatura e salinidade da coluna d'água foram medidas a cada hora por 13 horas, de modo a abranger todo o ciclo da maré semidiurna local. As perfilagens com CTD foram realizadas nas estações PA e PM, bem como na margem norte, sul e centro do canal na proximidade da desembocadura (transecto DE). Os dados de corrente foram obtidos de forma simultânea partir do fundeio de ADCPs (*Acoustic Doppler Current Profile*) nas estações PA e PM, em uma profundidade média de 8 e 7 metros, respectivamente, com aquisição de dados a cada 20 min. Perfilagens horárias na estação DE com ADCP de casco também foram realizadas ao longo dos 250 metros de comprimento de canal com porção mais profunda próximo à margem sul.

Dados pluviométricos e de intensidade e direção dos ventos foram obtidos da série histórica da estação meteorológica automática do Instituto Estadual do Meio Ambiente e Recursos Hídricos/IEEMA (RAMQAR 02), instalada no município da Serra, a 84 km de Aracruz. Os dados de amplitude de maré utilizados foram baseados na Tábua de Maré do Terminal de Barcaças da Barra do Riacho/ES, obtidos junto ao Banco Nacional de Dados Oceanográficos (BNDO) da Marinha do Brasil.

2.3 Análise dos dados hidrodinâmicos

O processamento dos dados coletados pelos ADCPs, após *blanking distance* inerente aos equipamentos acústicos utilizados (30cm), consistiu na remoção dos dados com menos de 95% de confiabilidade (*spikes*) e inserção da declinação magnética local (-23,3°) para correção da direção da corrente segundo o norte verdadeiro.

Para verificar a relação entre a variabilidade da estratificação vertical e a mistura na seção transversal (estação DE), utilizou-se o número de Richardson (Ri) por camada, o qual compreende as características

globais das propriedades da coluna d'água (Miranda et al., 2002).

A classificação do estuário para as diferentes estações amostrais e períodos foi realizada a partir do Diagrama Estratificação-Circulação proposto por Hansen e Rattray Jr. (1966), o qual possibilita a análise da variabilidade da classificação do estuário de acordo com as variações temporais da descarga fluvial para os estuários e as mudanças dos períodos da maré (quadratura e sizígia), além de permitir a caracterização de diferentes partes do estuário, contribuindo para uma análise mais completa da sua circulação. Os estuários do Tipo 1 possuem transporte de sal realizado pelo processo de difusão turbulenta e o fluxo resultante é estuário abaixo em todas as profundidades, característico de estuários bem misturados. Estuários do Tipo 2 têm processos advectivos e de difusão turbulenta importantes para o transporte de sal com fluxo resultante oposto ao longo da coluna d'água. Este tipo é característico de estuários parcialmente misturados. Regiões estuarinas do Tipo 3 têm transporte de sal realizado, quase exclusivamente, por processos advectivos, sendo característico de fiordes. Os estuários Tipo 4 possuem a marcante presença da cunha salina. Além disso, a partir da consideração da estratificação vertical da coluna d'água, o diagrama é subdividido em Tipo a: fracamente estratificado e Tipo b: altamente estratificado.

Os Parâmetros de Estratificação e Circulação foram calculados a partir das médias espaciais (ao longo da coluna d'água) e temporais (durante ciclos completos de maré). Além disso, estes parâmetros também estão relacionados a uma grandeza adimensional, denotada por ν , que representa o balanço entre o fluxo de sal transportado estuário acima e estuário abaixo pela ação do transporte advectivo e da difusão turbulenta. Quando $\nu=1$, não ocorre circulação gravitacional e o transporte de sal para dentro do estuário ocorre por difusão turbulenta. Já quando ν é próximo a 0, a difusão turbulenta se torna pouco importante e o transporte de sal estuário acima é por advecção (Miranda et al., 2002).

Por fim, o fluxo residual na estação DE foi avaliado em cada período de coleta, levando em consideração principalmente as variações espaciais de profundidade (de 2 a 12 m) e a caracterização das velocidades residuais ao longo do transecto. Além disso, também foi possível analisar, através da velocidade residual perpendicular à direção do canal, locais de convergência e divergência do fluxo que possibilitaram a compreensão do transporte residual de massa e sedimentos na região.

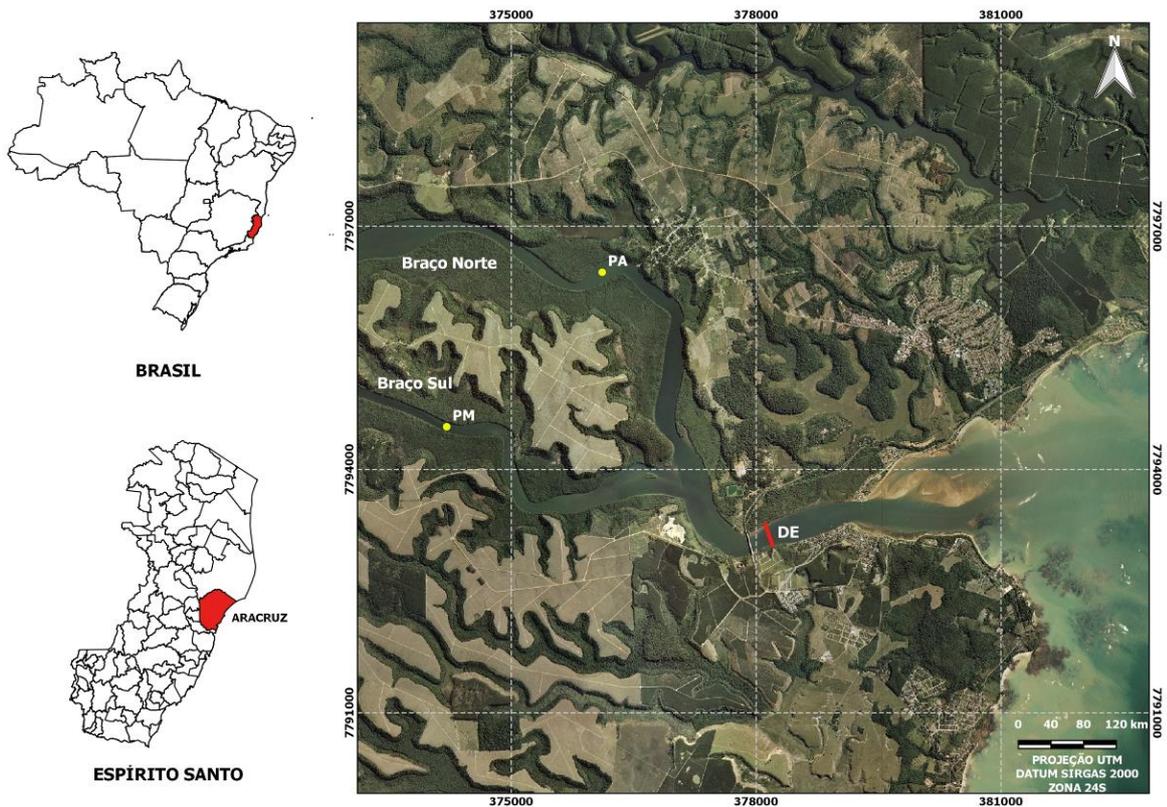


Figura 1: SEPAPM com desembocadura localizada no Município de Aracruz, Estado do Espírito Santo, Brasil. Os pontos PA e PM, bem como o transecto DE representam os locais de coleta dos dados no braço norte, braço sul e na proximidade da desembocadura do SEPAPM, respectivamente.

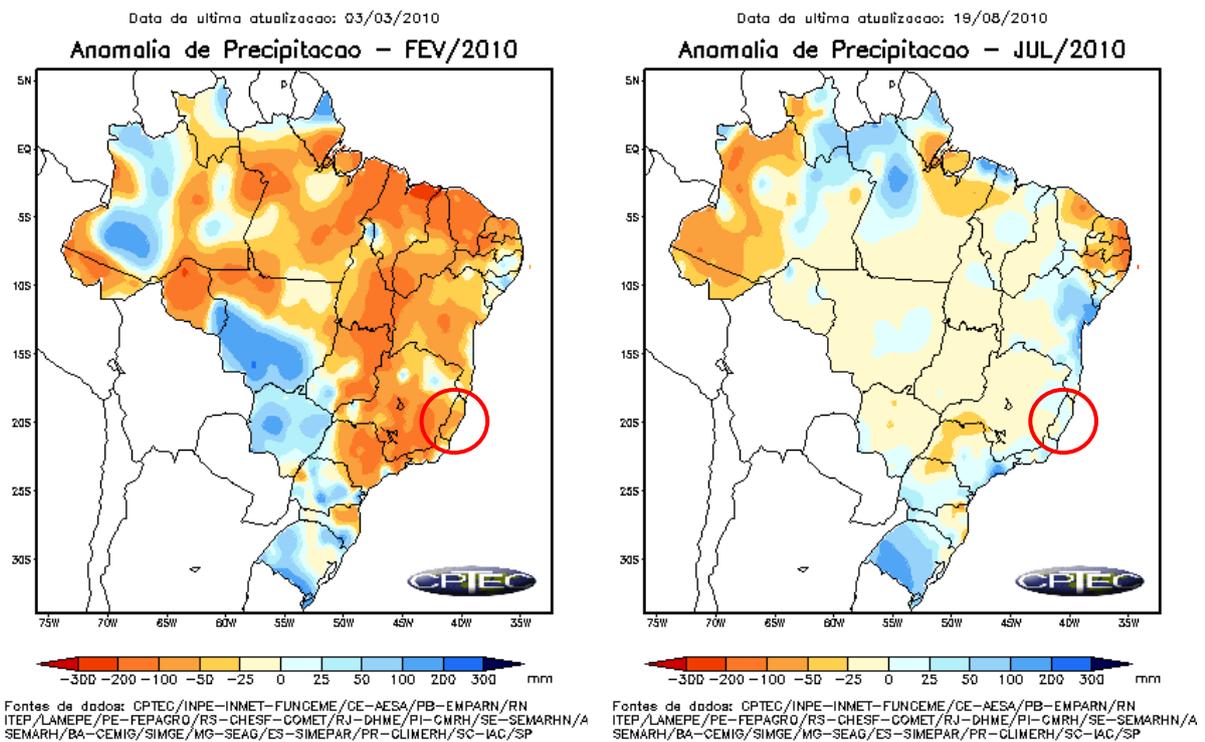


Figura 2: Anomalia de precipitação na área de estudo durante os meses de coleta dos dados (fev/2010 e jul/2010). Os círculos vermelhos indicam a localização do Estado do Espírito Santo. Fonte: CPTEC.

3. Resultados e discussão

3.1 Braço Norte (PA) e Braço Sul (PM)

No braço norte, as correntes mais intensas, de cerca de 0,75 m/s, ocorreram próximas à superfície durante a maré vazante de sizígia (Figura 3c), o que pode ser explicado pelo aporte de água fluvial menos densa superficialmente. As correntes estuarinas observadas em PA durante os períodos de maré sizígia (Figura 3b) apresentaram magnitudes superiores quando comparadas as correntes no período de quadratura (Figura 3a) devido a maior amplitude da maré naqueles períodos. As correntes de vazante para nordeste-leste (~60°) em PA ainda se mantêm predominantes nas proximidades da superfície entorno de 1 hora após a baixamar (detalhes nas Figuras 3b (18-19hs), 3d (9-10h)). Foi observada uma inversão completa da direção das correntes ao longo da coluna d'água em todos os períodos amostrais, durante o ciclo de maré na estação PA (Figura 3b,d), sendo a deflexão das correntes para o quadrante sul até que a inversão tenha se completado.

As correntes estuarinas atuantes no braço sul (estação PM) foram mais intensas (Figura 3e,g), quando comparadas às correntes do braço norte (Figura 3a,c). Durante a quadratura, velocidades predominantes de até 0,25 m/s foram observadas em todas as profundidades (Figura 3g). Já na maré sizígia, as correntes intensas foram verificadas durante a vazante e atingiram 1,1 m/s (Figura 3e). A inversão da direção das correntes durante a preamar e a baixamar também foi observada em todos os períodos amostrais em PM (Figura 3f,h). Entretanto, assim como observado na estação seca anômala do braço norte (Figura 3d), a permanência das correntes de maré vazante por um maior tempo (~1h) na camada superficial também foi detectada somente nas campanhas caracterizadas pelo maior volume de chuva (jul/2010), indicando o maior aporte de água fluvial pela bacia hidrográfica nesse período (Figura 3h). Além disso, as maiores velocidades de corrente observadas principalmente nos períodos de sizígia no braço sul, quando comparadas às velocidades de corrente no braço norte do SEPAPM, estão associadas a aspectos morfológicos do estuário, notadamente o maior estreitamento do braço sul e a geração de correntes mais intensas, fato também observado no estudo de Nichols e Biggs (1985). A maior velocidade das correntes no PM também está relacionada a diferença de sedimento de fundo observada por Silva et al. (2013) na região de estudo (areia grossa), quando comparada a região monitorada do braço norte (lama arenosa). Silva et al. (2014) também observaram um ecocaráter tipicamente erosivo no trecho do braço sul (PM) com correntes mais intensas.

A presença de correntes mais intensas durante a maré vazante de sizígia (Figura 3c,e) indica a existência de uma assimetria negativa nas correntes de maré nas estações PA e PM e a dominância de maré

vazante. A atuação de enchentes mais longas (~6:30h) quando comparado às vazantes (~5:00h) (Figura 3b,d,f), além da permanência da atuação de correntes de enchente após o nível máximo da maré (entorno de 30min a 1h) (Figura 3d,f) corroboram a ocorrência de assimetria de maré nos braços do SEPAPM. Como essas diferenças de intensidade e tempo de ocorrência das correntes de maré de enchente e vazante foram similares nos períodos monitorados (chuvoso e seco), parece haver uma menor influência do aporte fluvial na ocorrência desta assimetria das correntes de maré durante a sizígia. Entretanto, durante o período de quadratura essa predominância não é evidente. Apesar da presença de planícies de maré com vegetação de mangue ser um dos principais fatores causadores da distorção entre as correntes de maré vazante e enchente em estuários (Dronkers, 1986; Mazda e Kamiyama, 2007; Mazda et al., 2007), não se pode considerar que o SEPAPM apresente uma extensa planície entremarés (Aracruz, 2013), embora possa haver considerável influência dessas áreas na intensificação das correntes de maré vazante no sistema estuarino. Também se sabe que a interação da propagação da onda de maré com a geometria do estuário, além da sua fricção com o fundo e os contornos terrestres geram alterações na onda de maré por processos não lineares, chamada de “assimetria de maré barotrópica” (Godin, 1991; Parker, 1991; Friedrichs e Madsen, 1992), apesar de não ter sido realizada de uma análise detalhada do comportamento da maré dentro do sistema estuarino. Portanto, a transferência de energia dos constituintes harmônicas fundamentais da onda maré para frequências harmônicas mais altas e as suas relativas fases (Aubrey e Speer, 1985; Friedrichs e Aubrey, 1988), principalmente M2 e M4, também pode ser responsável pela a assimetria de maré vazante observada em PA e PM.

No braço norte (estação PA), a termoclina não foi evidente nas séries temporais, uma vez que os perfis de temperatura apresentaram variação de menos de 3°C da superfície ao fundo (Figura 4a,c). Quanto à estratificação observada no perfil de salinidade, a ocorrência de uma camada de água menos salina foi bem demarcada durante as quadraturas (22 em PAQC e 14 em PAQS) com a presença de uma haloclina bem pronunciada entre o primeiro e segundo metro de profundidade (Figura 4b). Durante a sizígia seca anômala, toda a coluna d'água se apresentou misturada devido a maior ação da turbulência gerada pelas correntes de maré (Figura 4d). As menores salinidades (27) foram observadas na superfície durante a baixamar e as maiores salinidades (33) ocorreram próximo ao fundo durante a preamar, evidenciando o aporte de água fluvial superficialmente. Durante a quadratura da estação seca, os valores de salinidade maiores que 32, observados em toda camada mais profunda, até 6 m do fundo, demonstra a entrada da cunha salina (Figura 4b).

No braço sul, não houve estratificação da coluna d'água em nenhuma das campanhas amostrais (Figura 4e-h). As maiores temperaturas da água (27 a 30°C) foram observadas nas campanhas caracterizadas pelo menor volume de chuva (fev. e mar./2010), assim como observado no braço norte, e estão diretamente relacionadas à maior incidência de radiação solar nesse período do ano (verão). Os perfis de salinidade (~30 a 33) não tiveram variações significativas entre os períodos amostrais, apesar de maiores valores de salinidade serem observados durante a preamar de sizígia em toda a coluna d'água devido à entrada da cunha salina (Figura 4h).

Ainda no braço sul, a mistura da coluna d'água em todas as campanhas está atrelada à ação de correntes mais intensas observadas na região, que por sua vez tem relação com fatores morfológicos (canal mais estreito e menor área da bacia de drenagem fluvial adjacente). A área da bacia hidrográfica do rio Piraquê-Mirim, que alimenta o braço sul do SEPAPM (estação PM), é 5 vezes menor do que o rio Piraquê-Açu, que alimenta o braço norte (estação PA). As salinidades superficiais encontradas no braço sul foram sempre superiores (Figura 4f,h) às salinidades medidas no braço norte (Figura 4b,d), efeito do maior aporte de água fluvial neste último. Durante as campanhas caracterizadas pelo maior volume de chuva (jul./2010), o padrão e a variação dos valores de salinidade (27 a 32) foram semelhantes entre o braço norte e sul (Figura 4d,h), pois a ação de um maior prisma de maré se tornou mais importante para a circulação, quando comparada a influência do aporte fluvial.

3.2 Desembocadura (DE)

Próximo da desembocadura do SEPAPM, os perfis de direção e velocidade da corrente durante as marés de quadratura apresentaram semelhança entre as campanhas chuvosa e seca com o desenvolvimento de vórtices ao longo da coluna d'água sob condições de velocidades menores que 0,25 m/s (Figura 5a-f). Estes vórtices foram identificados a partir da variação abrupta da direção as correntes ao longo da coluna d'água e entre as regiões do transecto (margens e canal). No início da maré enchente e vazante, de ambos os períodos amostrais, estes vórtices foram característicos da circulação, sendo gerados durante o movimento de rotação da corrente de maré causada pelo cisalhamento da corrente com o fundo e as bordas do canal e a consequente diminuição da velocidade e alteração da direção da corrente (Kashiwait, 1985). Entretanto, mesmo com a presença desses vórtices, a coluna d'água apresentou uma circulação residual para sul-sudoeste (180°-225°) entrando no estuário durante o desenvolvimento da maré enchente. Price e Townend (2000) e Quaresma et al. (2007) também detectaram a rotação da maré ao longo da planície de maré de Southampton Water (UK), mostrando que os períodos

de inundação foram marcados por constantes correntes em direção à desembocadura do estuário.

As maiores variações de temperatura e salinidade ao longo das profundidades nas campanhas da quadratura foram encontradas no período da tarde e durante a maré vazante, associadas à maior insolação e à condição hipopical do padrão de circulação estuarino, respectivamente. Nesse momento, observou-se um maior desenvolvimento da cunha salina, onde o fluxo do rio (menos denso) flui sobre o fluxo marinho (mais denso) (Figura 5i,j). Ao longo da maré vazante (NE - 45°), também foi possível observar a rotação da corrente originada pelo cisalhamento da corrente junto ao fundo nas proximidades da margem norte. Esta rotação foi observada pela entrada de água no estuário mesmo durante a vazante. Nesse momento, a coluna d'água apresentou fraca estabilidade ($2 < Ri < 20$) com momentos de instabilidade na borda norte do canal, sendo esta a porção mais rasa do transecto (Figura 5h).

Variações na orientação preferencial das correntes de maré vazante e enchente nas campanhas de sizígia foram observadas, devido as diferentes amplitudes da onda de maré em ambos os períodos (entorno de 20 cm), com desenvolvimento de uma deflexão direcional de 45° na corrente preferencial (Figura 6b,d,f,h). A diferente orientação das correntes levou a uma distinção na magnitude da velocidade ao longo do desenvolvimento da maré enchente e vazante, durante ambas as campanhas da sizígia. As maiores velocidades das correntes foram observadas na campanha chuvosa, com a corrente de maré vazante ultrapassando 1,5 m/s, próximo à margem sul do canal de maior profundidade, promovendo uma condição de instabilidade na coluna d'água ($Ri < 2$). Como já discutido na análise dos pontos PA e PM, Speerb e Aubrey (1985) observaram que as planícies de maré podem aumentar a velocidade máxima de vazante.

Durante a campanha seca de sizígia, o comportamento hidrodinâmico da corrente de maré durante a vazante e enchente foi diferente do apresentado durante a campanha chuvosa. A medida que houve diminuição da velocidade da corrente de maré vazante, foi observado um crescente aporte marinho junto ao fundo na baixamar para a enchente (Figura 6g,h). Esse input apresentou velocidades de até 0,5 m/s, ocasionando condições de instabilidade ao longo da coluna d'água. No decorrer do desenvolvimento da maré enchente, as velocidades chegaram à 1m/s, agora com a corrente predominando em todo o canal. O momento de preamar foi marcado por perfis de baixas velocidades, tendendo a zero, e vórtices ao longo da coluna d'água em decorrência da rotação da corrente e baixa estabilidade da coluna d'água.

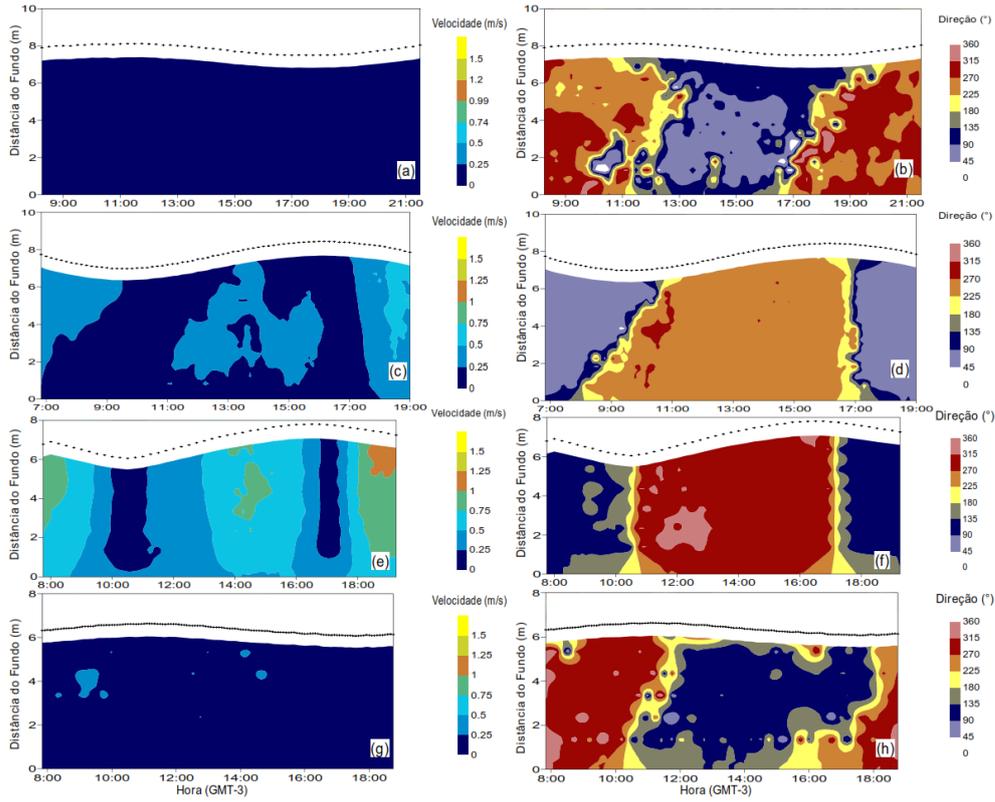


Figura 3: Velocidade e direção das correntes observadas no braço norte (PA) do SEPAPM durante a maré de quadratura da estação chuvosa (a,b) e durante a maré de sizígia da estação seca (c,d). Também são apresentadas a velocidade e direção das correntes observadas no braço sul (PM) durante a maré de sizígia da estação chuvosa (e,f) e durante a maré de quadratura da estação seca (g,h) As linhas pontilhadas representam a variação da maré localmente.

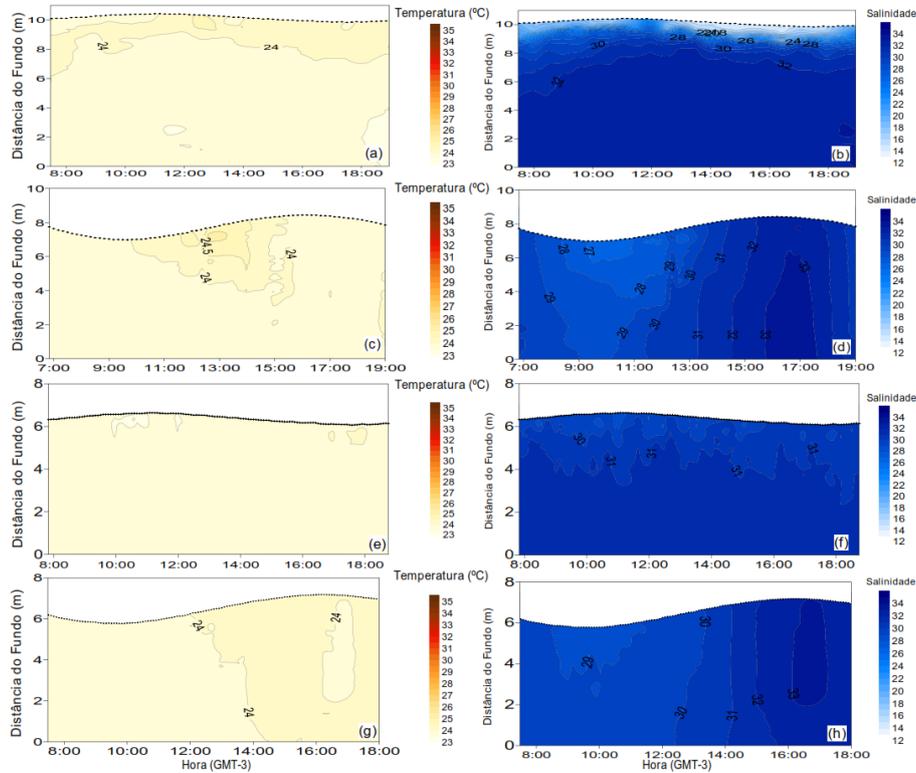


Figura 4: Perfis de temperatura e salinidade da água no braço norte (PA) do SEPAPM durante a maré de quadratura (a,b) e da maré de sizígia (c,d) da estação seca. Também são apresentados os perfis de temperatura e da água no braço sul (PM) durante a maré de quadratura (e,f) e a maré de sizígia (g,h) da estação seca. As linhas pontilhadas representam a variação da maré localmente.

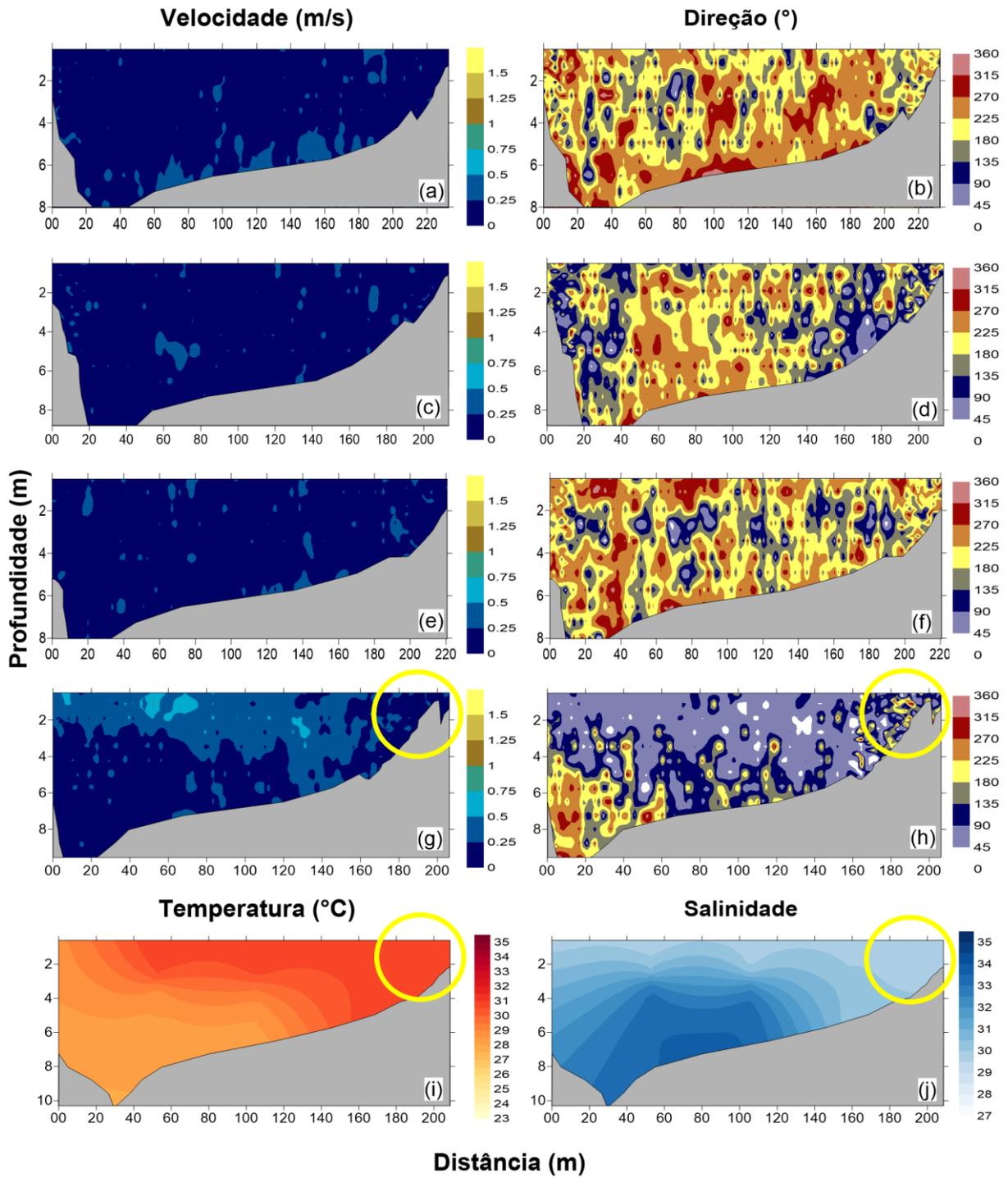


Figura 5: Velocidade e direção das correntes instantâneas e características na desembocadura do SEPAPM durante a maré de quadratura do período chuvoso na enchente (a,b), preamar (c,d) e baixamar (e,f), na vazante (g,h). A distribuição da temperatura (i) e de salinidade (j) ao longo da coluna d'água também são apresentados durante a maré vazante. Os círculos amarelos destacam os dados que indicam o aporte de água menos densa na margem norte do canal com a formação de vórtices.

Os valores máximos de salinidade das campanhas da sizígia foram maiores do que aqueles encontrados na quadratura, chegando a 34,7 na superfície mesmo em momentos de maré vazante (Figura 6j,l). As duas campanhas da sizígia também apresentaram baixa variação da salinidade ao longo da coluna d'água,

indicando influência marinha predominante na proximidade da desembocadura do sistema estuarino com altos valores de salinidade, como também encontrado nos braços norte e sul (pontos PA e PM).

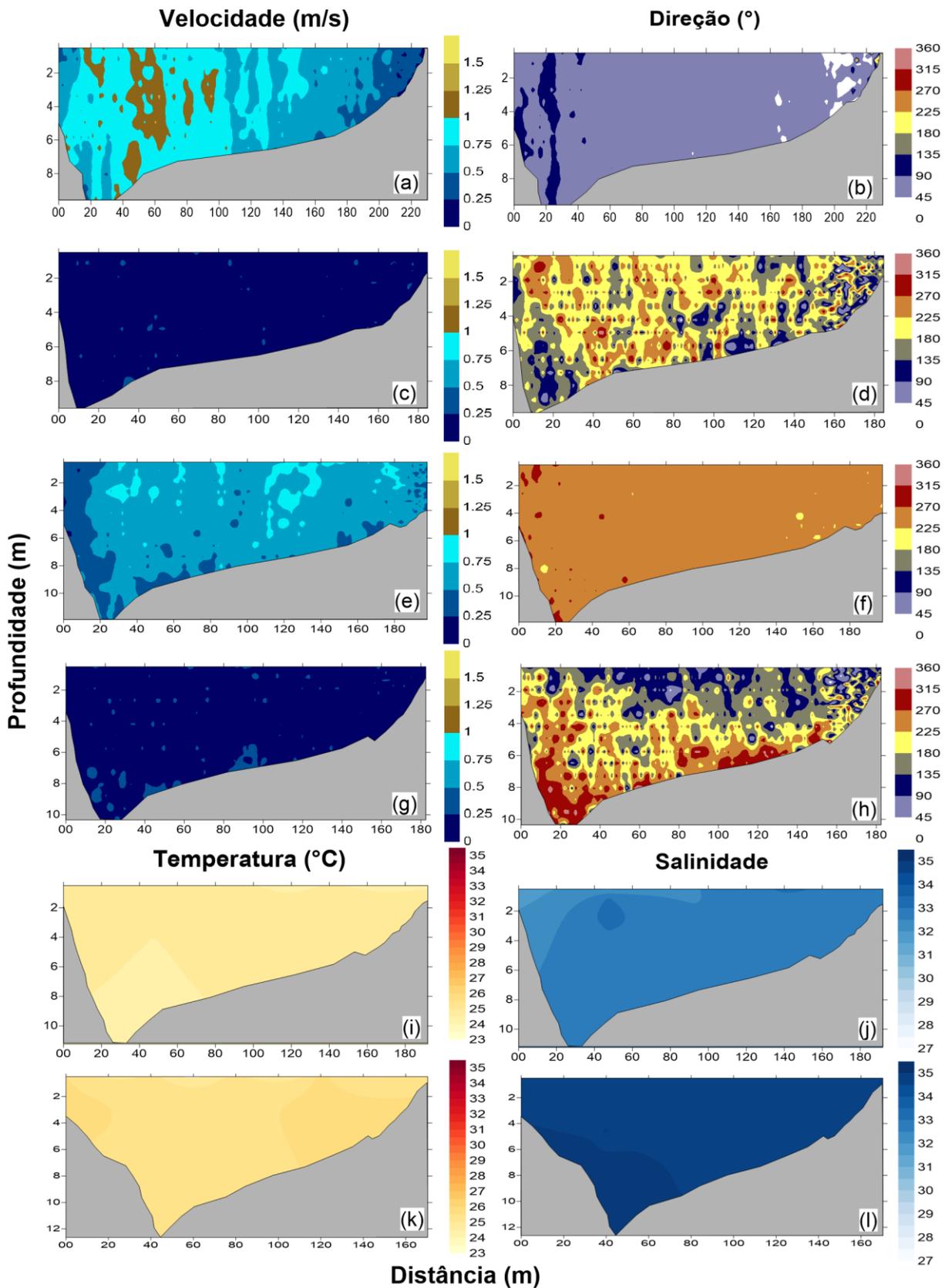


Figura 6: Velocidade e direção das correntes instantâneas e características na desembocadura do SEPAPM durante a maré de sizígia do período chuvoso na vazante (a,b) e enchente (e,f), bem como durante a maré de sizígia do período seco na vazante (c,d) e enchente (g,h). Perfis de temperatura e salinidade durante a baixamar da maré de sizígia do período chuvoso (i,j) e na preamar da maré de sizígia do período seco (k,l) também são apresentados.

3.3 Classificação do SEPAPM pelo diagrama estratificação-circulação

Como os parâmetros estuarinos se alteram no espaço e tempo devido a distintas condições de descarga fluvial, localização da estação amostral no estuário e período da maré (Tabela 1), a classificação dos braços e desembocadura do SEPAPM variaram nos diferentes dias amostrais (Figura 7). O processo de difusão turbulenta contribuiu mais significativamente do que a advecção para o transporte de sal estuário acima ($v \sim 1$).

As medições realizadas nas quatro campanhas amostrais em PM, o braço sul se enquadrou como um estuário bem misturado com fraca estratificação (Tipo 1a). Classificação causada pela atuação de correntes mais intensas observadas principalmente nas marés de sizígia em PM (Figura 3). Estas correntes geram uma maior mistura da coluna d'água (Figura 4). Além disso, o menor aporte de água fluvial no braço sul permite a entrada de uma maior quantidade de água salgada, causando uma menor estratificação da coluna d'água. Entretanto, a classificação do braço sul durante a campanha seca anômala se aproximou da transição entre os estuários bem misturado e parcialmente misturado (Tipo 1a e 2a, respectivamente). Fato explicado pelas maiores taxas de precipitação (Figura 1) e o consequente possível aumento do aporte fluvial.

O braço norte (PA) não pôde ser classificado em PASC e PAQS, pois os dados de salinidade e corrente, respectivamente, apresentaram problemas nas coletas. Entretanto, segundo as medições realizadas em PA durante a quadratura da campanha chuvosa anômala (PAQC), o braço norte foi classificado como misturado com estratificação moderada (Tipo 1b), enquanto na sizígia da campanha seca anômala (PASS), o mesmo se mostrou parcialmente misturado com fraca estratificação (Tipo 2a). A modificação da classificação do braço norte está relacionada principalmente aos

diferentes períodos da maré. A ação de correntes de maré menos intensas durante a quadratura (PAQC) permitiu o aparecimento de uma considerável estratificação vertical de salinidade (Figuras 3a). Entretanto, a ação de correntes de maré mais intensas durante a maré de sizígia (PASS) e o maior aporte de água fluvial no braço norte nesse período geraram uma circulação em duas camadas com sentidos opostos (Figura 3c e 4d), causando a intensificação da difusão turbulenta e o enfraquecimento da estratificação vertical.

Nas medições realizadas ao longo da proximidade da desembocadura do estuário (estação DE) durante as quatro campanhas amostrais, a classificação do SEPAPM se enquadrou como bem misturado com fraca estratificação (Tipo 1a) para os períodos da sizígia e como parcialmente misturado com fraca estratificação (Tipo 2a) para ambos os períodos de quadratura (Figura 7). A classificação do Tipo 1a durante as campanhas de sizígia foi causada pelas altas intensidades das correntes ($>0,5$ m/s) observadas em grande parte desse período de medição (Figura 6). Na medida em que a onda de maré de sizígia se propaga estuário acima, a sua interação com a morfologia de fundo ocasiona a dissipação de energia como movimento de rotação das correntes e contribui para a formação de vórtices que tendem a promover o processo de mistura da coluna d'água (Dyer, 1997; Miranda et al. 2002). Para as campanhas da quadratura, a classificação do estuário como Tipo 2a é resultado do bloqueio parcial da onda de maré, durante sua incursão no canal estuarino, pelo aporte fluvial com formação de uma estratificação superficial. Além disso, houve uma diminuição da mistura turbulenta, associada aos menores valores de intensidade das correntes ocasionados pela menor amplitude da maré de quadratura (Figura 5).

Tabela 1: Valores calculados para os parâmetros de estratificação e circulação nos braços norte e sul (estações PA e PM, respectivamente) e na proximidade da desembocadura (estação DE) do SEPAPM para os diferentes períodos de coleta. PA: estação braço norte – Piraquê-Açu; PM: estação braço sul, Piraquê-Mirim; DE: estação desembocadura; Q: quadratura; S: sizígia; C: estação chuvosa; S: estação seca.

Estação	Maré	Amostragem	Parâmetro de Estratificação	Parâmetro de Circulação
Seca	Quadratura	PAQS	0.133	-
		PMQS	0.015	1.305
		DEQS	0.094	5.380
	Sizígia	PASS	0.035	3.595
		PMSS	0.003	1.124
		DESS	0.026	0.580
Chuvosa	Quadratura	PAQC	0.115	0.402
		PMQC	0.008	0.660
		DEQC	0.065	4.760
	Sizígia	PASC	-	0.455
		PMSC	0.028	0.151
		DESC	0.004	0.660

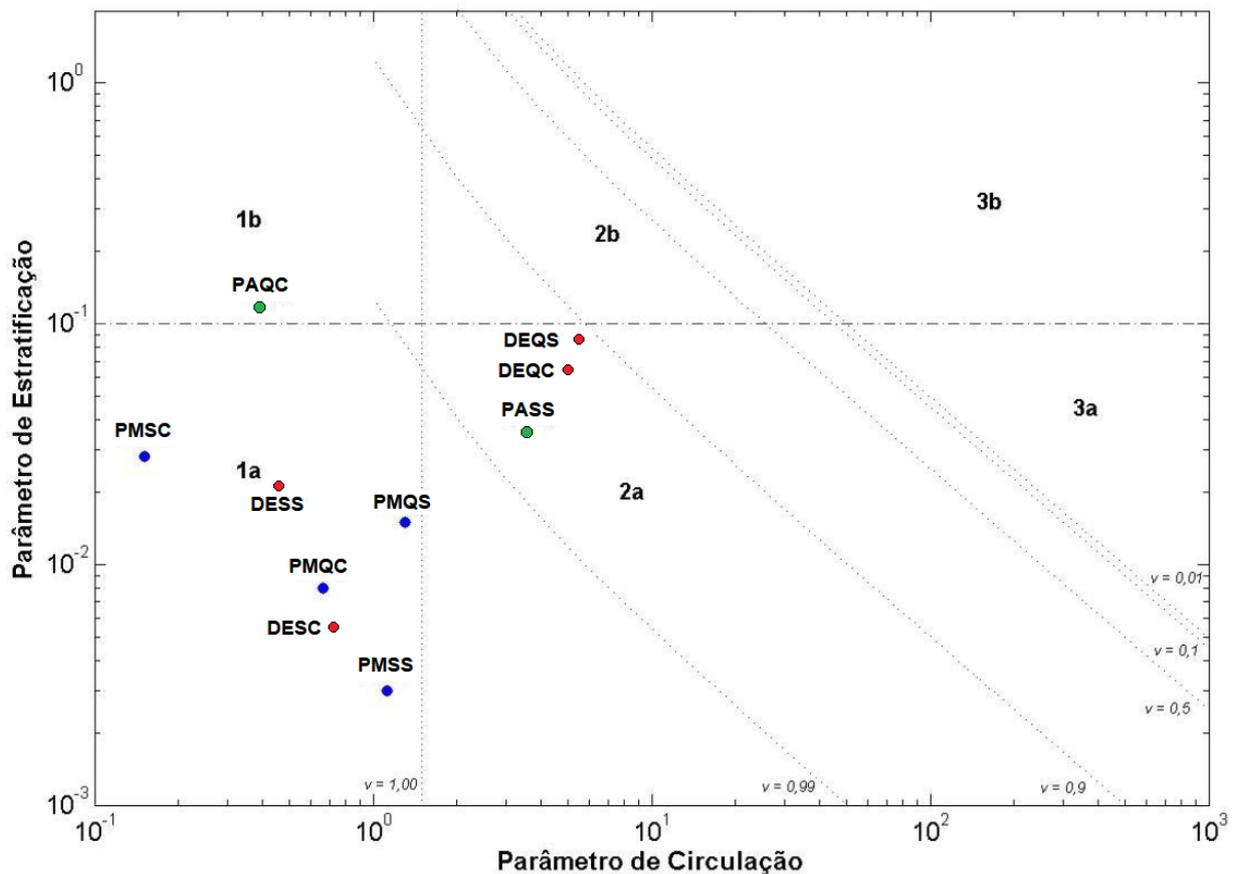


Figura 7: Classificação dos dois braços (PA e PM) e da proximidade da desembocadura (DE) do SEPAPM pelo Diagrama Estratificação-Circulação de Hansen e Rattray Jr. (1966) nos ciclos de maré de Quadratura – Estação Chuvosa (QC), Sizígia – Estação Chuvosa (SC), Quadratura – Estação Seca (QS) e Sizígia – Estação Seca (SS). Azul - braço sul (PM); Verde – braço norte (PA); e Vermelho – proximidade da desembocadura (DE).

3.4 Fluxo residual na desembocadura

Para a campanha chuvosa anômala durante a quadratura, o fluxo residual longitudinal apresenta o padrão clássico gerado pela circulação gravitacional, ou seja, um fluxo cisalhado verticalmente de duas camadas, com entrada de água no estuário pelo fundo e com saída pela superfície e áreas mais rasas (Figura 8a). Já para o fluxo transversal (Figura 8b), pode-se perceber a predominância de um giro anti-horário nessa seção, que abrange desde a margem norte até o talvegue do canal. Esse padrão é muito bem demarcado principalmente durante as quadraturas. Segundo Wong (1994), o fluxo de entrada do estuário tende a se concentrar na parte profunda e o fluxo de saída na parte rasa, como observado durante a quadratura chuvosa anômala (Figura 8 a,b), devido a maior fricção com a topografia que tende a separar horizontalmente a circulação gravitacional.

Considerando a circulação longitudinal da quadratura chuvosa (Figura 8 a,b), onde temos uma circulação gravitacional com domínio da fricção, juntamente com a circulação lateral e o giro

anticiclônico, pode-se considerar que este padrão hidrodinâmico acarretará importantes implicações para as trocas sedimentares entre o ambiente estuarino e costeiro. Por exemplo, devido à dinâmica dominada pela fricção nesse período, qualquer distúrbio na água presente nas margens rasas pode ocasionar a remobilização do sedimento acumulado e o seu posterior transporte tanto para o canal quanto para fora do estuário pela região superior e intermediária da coluna d'água.

A circulação residual da sizígia na campanha chuvosa anômala apresenta um fluxo contrário ao padrão de circulação gravitacional, com fluxo residual para fora do estuário junto ao fundo, próximo ao talvegue do canal, e predominantemente para dentro do estuário pela superfície principalmente em direção à margem norte (Figura 8c). Esse padrão não é observado nos outros períodos amostrados, indicando que foi um evento influenciado pelas condições meteorológicas do momento da coleta. Como não há gradiente de pressão baroclínico vertical ou transversal ao perfil, esse fluxo pode estar relacionado (i) ao gradiente de pressão barotrópico, gerado pelas

ondas e pelo vento proveniente de uma frente fria que se aproximava da região; (ii) ao vento local que se encontrava em direção ao estuário, provocando o tipo de circulação residual observada; (iii) ou ao fluxo residual resultante da assimetria na mistura gerada pela maré. Cheng e Valle-Levinson (2009) comprovam que essa terceira opção pode levar ao desenvolvimento de um fluxo contrário ao clássico quando a assimetria é “reversa”, ou seja, o coeficiente de viscosidade de borda durante a vazante é maior do que a enchente. As três opções são possíveis e suportadas pela análise das condições meteorológicas encontrados na região durante as coletas.

A circulação residual da sizígia na campanha chuvosa anômala indica uma tendência de fluxo norte próximo ao fundo e margem norte, além de fluxo sul na superfície, até a distância de 80 m da margem sul (Figura 8d). Essa tendência tem a mesma característica do giro anti-horário encontrado na quadratura, sendo que as velocidades apresentadas aqui durante a sizígia são maiores. Percebe-se também que durante a sizígia, há uma predominância do fluxo para sul, principalmente no talvegue do canal. Considerando que nessa região o fluxo longitudinal é em direção ao oceano, a tendência é de exportação do MPS, principalmente porque a camada superficial com entrada de água é muito fina e fraca comparada às velocidades de saída no canal (Figuras 8c). Portanto, sugere-se que o sedimento pode estar sendo suspenso na margem norte e transportado pelo vórtice para o canal com tendência de exportação para o oceano. Além disso, a circulação lateral indica uma situação de forte divergência em relação ao fluxo de entrada no estuário, localizado entorno de 90 metros da margem sul em subsuperfície (~2 m de profundidade) (Lerczak e Geyer, 2004).

O fluxo residual longitudinal ao canal durante a quadratura seca anômala é representado por duas camadas, semelhante à circulação gravitacional clássica (Figura 9a). Entre 2 m de profundidade e o fundo, o fluxo ocorre em direção ao interior do estuário, enquanto o fluxo de água em direção ao oceano está confinado aos 2 m superficiais. Este predomínio pode estar relacionado com algum fenômeno *offshore*, como atuação de ventos de leste, provavelmente associado ao acúmulo de água na desembocadura do estuário que impulsionou a maior entrada resultante nesse período (Geyer, 1997; Balsells et al., 2020). Diferente da situação encontrada na campanha da quadratura chuvosa (Figura 8a), durante quadratura seca não foi observado uma indicação bem marcada da fricção horizontalmente (Figura 9a), sendo o perfil observado somente verticalmente cisalhado.

Já o fluxo residual transversal ao canal durante a quadratura seca anômala apresenta uma situação inversa ao observado no período chuvoso (Figura 8b), com formação de um giro horário na seção e maiores velocidades na superfície (Figura 9b). Nesse padrão,

temos um possível transporte do MPS para a margem norte pela superfície e o sedimento suspenso próximo ao fundo transportado para o canal. Além do giro ocasionado pela circulação lateral, o giro resultante da resposta da circulação à curvatura do canal do estuário (Figura 2), próximo do transecto, também tende a transportar os sedimentos do canal para a margem norte. Portanto, mesmo com o transporte de sedimento em suspensão para a margem norte, a camada intermediária e de fundo dessa margem apresentou um forte fluxo de entrada nesse período, sendo a tendência de importação do MPS para dentro do estuário. Dessa forma, houve uma indicação de importação de MPS, apesar do maior fluxo fluvial que deveria gerar exportação.

Apesar da homogeneidade observada na coluna d'água, a circulação residual durante a sizígia seca anômala apresentou um fluxo com cisalhamento vertical e horizontal (Figura 9c), conforme esperado para regiões dominadas por gradientes de densidade (Cheng, 2014). O fluxo predominante de entrada no estuário está concentrado principalmente no fundo e na margem norte. Há um fluxo de saída do estuário na superfície, próximo ao canal e à margem sul, mas os valores são inferiores se comparados ao fluxo de entrada. Descartadas a ação da fricção e da força de Coriolis, que não respondem à circulação observada, sugere-se que a onda de maré interagiu com a curvatura existente um pouco a montante da seção DE amostrada e com as diferenças batimétricas apresentadas na seção, ocasionando a inversão da circulação gravitacional tradicional (Figura 9c). Ou seja, um padrão de atuação de onda de maré progressiva foi observado, onde há fluxo saindo do estuário pelo canal e entrando na região rasa da seção (conforme o descrito por Cheng e Valle-Levinson, 2009). Estudos realizados em outros ambientes estuarinos fracamente estratificados, como Waterhouse e Valle-Levinson (2010), indicam que a presença de uma curvatura gera uma recirculação do fluxo residual. Por isso, o fluxo residual no transecto durante a campanha de maré sizígia seca apresenta um giro anti-horário da corrente longitudinal, explicando assim as maiores velocidades em direção ao oceano no canal (margem sul, próxima a curvatura e com menos barreiras) e a corrente na margem norte em direção à montante (Figura 9c), proveniente da recirculação.

O fluxo residual transversal durante a sizígia da campanha seca anômala apresentou um giro horário na região mais rasa, próximo à margem norte (Figura 9d). Esse giro pode ser formado a partir da interação entre o fluxo longitudinal para dentro do estuário e a fricção junto ao fundo na região (Li e O'Donnell, 1997). No canal é possível perceber uma ligeira convergência do fluxo próximo à margem sul. Portanto, uma possível importação de MPS ocorreu nesse período, principalmente em resposta à tendência de transporte do sedimento suspenso do canal para a margem norte

pela superfície com posterior importação para dentro do estuário.

5. Conclusões

Os braços norte e sul do Sistema Estuarino Piraquê-Açu e Piraquê-Mirim (SEPAPM) apresentaram grandes diferenças quanto à hidrodinâmica. A intensidade das correntes observadas no braço sul (PM) foi superior em todas as campanhas amostrais, quando comparadas as intensidades das correntes no braço norte (PA). Contudo, o predomínio da assimetria de maré foi verificado nos dois braços, principalmente nas marés de sizígia. A estratificação e a mistura vertical no braço norte foram condicionadas fortemente pela velocidade das correntes. Durante as marés de quadratura, a presença de uma haloclina bem definida entre o primeiro e segundo metro de profundidade foi característico. Entretanto, a estratificação vertical foi mais pronunciada na quadratura seca anômala, devido à maior pluviosidade na bacia de drenagem e pouca mistura da coluna d'água associada às menores velocidades das correntes de maré. Além disso, a coluna d'água se apresentou totalmente misturada na sizígia seca anômala durante a preamar e nas marés enchente e vazante, enquanto a baixamar apresentou uma estratificação vertical muito fraca. O braço sul não apresentou estratificação evidente em nenhuma campanha amostral, pois as correntes mais intensas e o pequeno aporte fluvial, caracterizado pela menor área de drenagem comparada ao braço norte, permitem a mistura mais efetiva de toda a coluna d'água.

A proximidade da desembocadura do SEPAPM apresentou marcado padrão sazonal de variação da salinidade da água, representado por maiores salinidades durante as campanhas do período chuvoso anômalo e menores salinidades durante as campanhas do período seco anômalo. A estratificação e a mistura vertical foram fortemente condicionadas pela velocidade das correntes. A coluna d'água apresentou-se pouco misturada nas campanhas da quadratura, devido à constante incursão da cunha salina junto ao fundo, atrelada às correntes de baixa magnitude (enchente de 0,25 m/s e vazante de 0,5 m/s), com uma considerável variação da salinidade (27 na superfície e 35 no fundo). Em contrapartida, durante os períodos de maré de sizígia, a condição de mistura foi predominante, influenciada por correntes de alta intensidade nas marés enchente e vazante (1,0 m/s e 1,75 m/s, respectivamente).

Apesar do fluxo residual longitudinal observado na desembocadura, durante a maré sizígia do período chuvoso anômalo, não estar conforme o padrão de duas camadas gerado pelo gradiente baroclínico de pressão, os demais padrões encontrados indicam a existência de um fluxo residual predominante no SEPAPM de acordo com a circulação gravitacional clássica. Considerando o domínio da ação gravitacional na circulação residual longitudinal, há uma indicação de

transporte sedimentar em suspensão em direção ao oceano nas camadas superficiais e em direção ao interior do estuário nas camadas mais profundas. Apesar de não ter sido estudado em profundidade, o fluxo residual da circulação lateral na desembocadura parece ser influenciado principalmente pelas mudanças topográficas de fundo entre o canal e a margem norte mais rasa. Em todas as situações observadas há vórtices com giros opostos nos períodos chuvoso (anti-horário) e seco (horário), demonstrando uma ativa interação entre o canal e a margem.

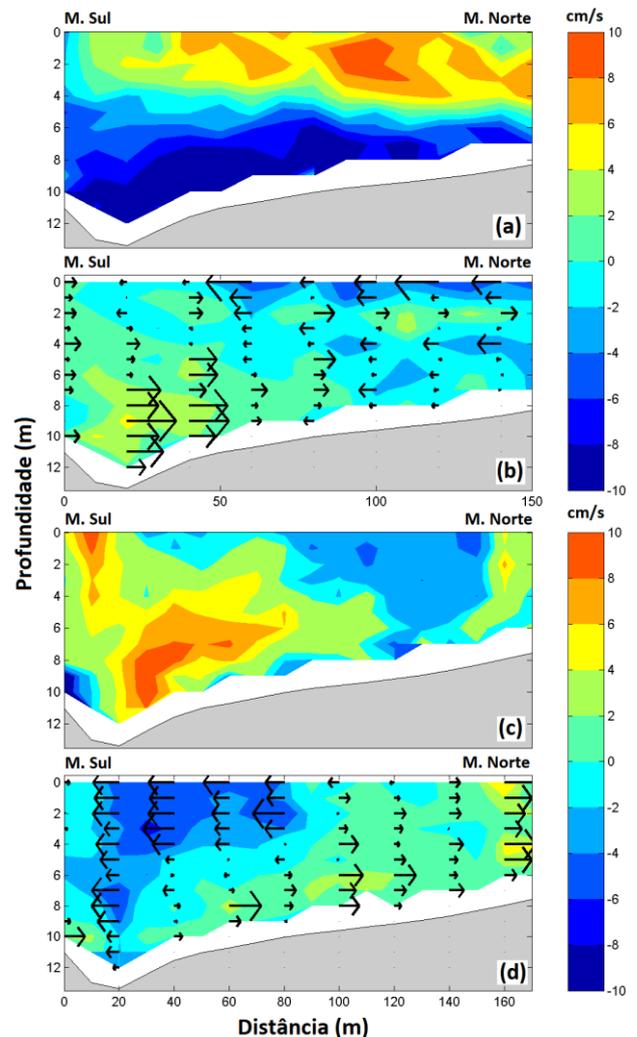


Figura 8: Fluxo residual na desembocadura do SEPAPM durante a estação chuvosa anômala. (a) e (b) apresentam os fluxos residuais com velocidades longitudinais ao canal (oeste-leste) e com velocidades transversais ao canal (norte-sul) na quadratura (DEQC), respectivamente. Valores positivos indicam direção para leste (fluxo em direção ao oceano); valores negativos, direção para oeste (fluxo em direção ao interior do estuário). (c) e (d) apresentam os fluxos residuais com velocidades longitudinais ao canal (oeste-leste) e com velocidades transversais ao canal (norte-sul) na sizígia (DESC), respectivamente. As setas pretas representam a direção e intensidade resultante das correntes transversais ao canal.

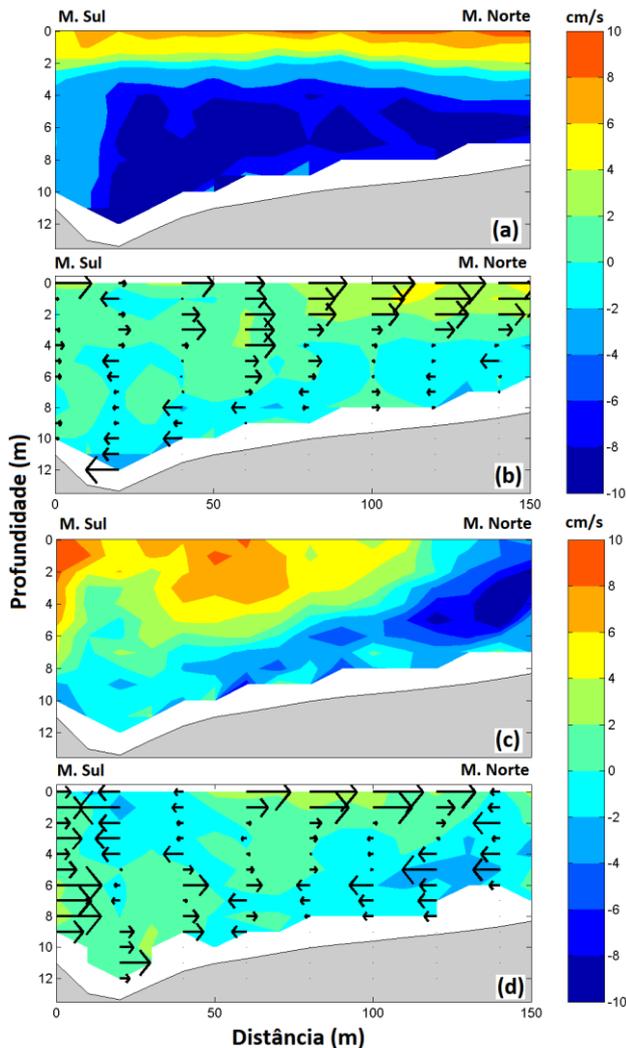


Figura 9: Fluxo residual na desembocadura do SEPAPM durante a estação seca anômala. (a) e (b) apresentam os fluxos residuais com velocidades longitudinais ao canal (oeste-leste) e com velocidades transversais ao canal (norte-sul) na quadratura (DEQS), respectivamente. Valores positivos indicam direção para leste (fluxo em direção ao oceano); valores negativos, direção para oeste (fluxo em direção ao interior do estuário). (c) e (d) apresentam os fluxos residuais com velocidades longitudinais ao canal (oeste-leste) e com velocidades transversais ao canal (norte-sul) na sizígia (DESS), respectivamente. As setas pretas representam a direção e intensidade resultante das correntes transversais ao canal.

Agradecimentos

Agradecimento à CNPq pelo financiamento do projeto intitulado “Processos geoquímicos, físicos e sedimentares de um estuário com múltiplos usos do seu entorno” realizado no Sistema Estuarino Piraquê-Açu e Piraquê-Mirim (SEPAPM).

Referências

AMARANTE, O. A. C.; SILVA, F. J. L.; ANDRADE, P. E. P. *Atlas Eólico: Espírito Santo*. Vitória, 1999.
 ARACRUZ. *Lei nº 3.739, de 07 de novembro de 2013. Altera a categoria de Unidade de Conservação Reserva Ecológica dos Manguezais Piraquê-Açu e Piraquê-Mirim para Reserva de Desenvolvimento Sustentável Municipal Piraquê-Açu e Piraquê-Mirim, no Município de Aracruz*, Aracruz, Câmara Municipal, , 2013.

ARRIVABENE, H. P. et al. Functional traits of selected mangrove species in Brazil as biological indicators of different environmental conditions. *Science of the Total Environment*, v. 476–477, p. 496–504, 2014.
 AUBREY, D. G.; SPEER, P. E. A study of non-linear tidal propagation in shallow inlet/estuarine systems Part II: Theory. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v. 21, n. 2, p. 207–224, 1985.
 BALSSELLS, M. F. P. et al. Wind-driven hydrodynamics in the shallow, micro-tidal estuary at the fangar bay (Ebro delta, nw mediterranean sea). *Applied Sciences (Switzerland)*, v. 10, n. 19, p. 1–20, 2020.
 BIANCHI, T. S. *Biogeochemistry of Estuaries*. Oxford: Oxford University Press, 2007.
 CHENG, P. Decomposition of residual circulation in estuaries. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v. 31, n. 3, p. 698–713, 2014.
 CHENG, P.; VALLE-LEVINSON, A. Spatial variations of flow structure over estuarine hollows. *Continental Shelf Research*, v. 29, n. 7, p. 927–937, 2009.
 COSER, L. M.; PEREIRA, B. B.; JOYEUX, J. Descrição da comunidade ictioplantônica e sua distribuição espacial no estuário dos rios Piraquê-Açu e Piraquê-Mirim, Aracruz, ES, Brasil. *Interfênciã: Revista de ciência y tecnologia de América*, v. 32, n. January 2007, p. 233–241, 2007.
 DA SILVA, A. E.; DA SILVA QUARESMA, V.; BASTOS, A. C. Sedimentological Sectorization of An Estuarine System In A Regressive Coast, Southeast Brazil. *Journal of Sedimentary Research*, v. 83, n. 11, p. 994–1003, 2013.
 DALRYMPLE, R. W.; ZAITLIN, B. A.; BOYD, R. Estuarine facies models: conceptual basis and stratigraphic implications. *Journal of Sedimentary Petrology*, v. 62, n. 6, p. 1130–1146, 1992.
 DHN, Diretoria de Hidrografia e Navegação - Marinha do Brasil. *Tábua de Maré - Terminal de Barra do Riacho (Estado do Espírito Santo) - 2021*. Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/chm/sites/www.marinha.mil.br.chm/files/dados_de_mare/terminal_barra_do_riacho.pdf>.
 DOMINGUEZ, J. M. L. The Coastal Zone of Brazil. In: DILLENBURG, S.; HESP, P. A. (Eds.). *Geology and geomorphology of Holocene coastal barriers of Brazil*. Heidelberg: Springer, 1999. p. 17–51.
 DRONKERS, J. Tidal asymmetry and estuarine morphology. *Netherlands Journal of Sea Research*, v. 20, n. 2–3, p. 117–131, 1986.
 DYER, K. R. Sediment Transport Processes in Coastal Environments. In: PERILLO, G. M. E. (Ed.). *Geomorphology and Sedimentology of Estuaries*. Elsevier ed. [s.l: s.n.]. v. 53p. 423–449.
 DYER, K. R. *Estuaries: A Physical Introduction*. 2. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 1997.
 FRIEDRICH, C. T.; AUBREY, D. G. Non-linear tidal distortion in shallow well-mixed estuaries: a synthesis. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v. 27, n. 5, p. 521–545, 1988.
 FRIEDRICH, C. T.; MADSEN, O. S. Nonlinear diffusion of the tidal signal in frictionally dominated embayments. *Journal of Geophysical Research*, v. 97, n. C4, p. 5637, 1992.
 GEYER, W. R. Influence of wind on dynamics and flushing of shallow estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v. 44, n. 6, p. 713–722, 1997.
 GODIN, G. Frictional effects in river tides. In: PARKER, B. B. (Ed.). *Tidal hydrodynamics*. New York: John Wiley & Sons, 1991. p. 379–401.
 GOMES, F. V. A Gestão da Zona Costeira Portuguesa. *Revista de Gestão Costeira Integrada*, v. 7, n. 2, p. 83–95, 2007.
 HANSEN, D. V.; RATTRAY JR., M. Gravitational circulation in straits and estuaries. *Journal of Marine Research*, v. 23, n. 1, p. 102–122, 1966.
 KASHIWAIT, M. Tidics - Control of tidal residual circulation and tidal exchange in a channel-basin system. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, v. 41, p. 1–10, 1985.
 KAYANO, M. T. et al. El Niño e La Niña dos últimos 30 anos : diferentes tipos. *Revista Climanalise*, n. Edição Comemorativa de 30 anos do Climanálise, p. 7–12, 2016.

- KJERFVE, B. **Hydrodynamics of Estuaries**. Boca Raton: CRC Press, 1988.
- LERCZAK, J. A.; GEYER, W. R. Modeling the lateral circulation in straight, stratified estuaries. **Journal of Physical Oceanography**, v. 34, n. 6, p. 1410–1428, 2004.
- LI, C.; O'DONNELL, J. Tidally driven residual circulation in shallow estuaries with lateral depth variation. **Journal of Geophysical Research C: Oceans**, v. 102, n. C13, p. 27915–27929, 1997.
- MAZDA, Y.; KAMIYAMA, K. Tidal deformation and inundation characteristics within mangrove swamps. **Mangrove Science**, v. 45, n. March, p. 21–29, 2007.
- MAZDA, Y.; WOLANSKI, E.; RIDD, P. **The Role of Physical Processes in Mangrove Environments: manual for the preservation and utilization of mangrove ecosystems**. Terrapub: Tokyo, Japan, 2007.
- MENDONÇA, F.; OLIVEIRA, I. M. D. **Climatologia: noções básicas e clima do Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.
- MIRANDA, L. B.; CASTRO, B. M.; KJERFVE, B. **Princípios de oceanografia física de estuários**. São Paulo: EDUSP, 2002.
- MIRANDA, L. B. DE; CASTRO FILHO, B. M. DE;; KJERFVE, B. **Princípios de oceanografia física de estuários**. São Paulo: Edusp, 2002.
- NICHOLS, M. M.; BIGGS, R. B. Estuaries. In: DAVIES, R. A. (Ed.). **Coastal sedimentary environments**. Nova Iorque: Springer-Verlag, 1985. p. 77–186.
- PARKER, B. B. The relative importance of the various nonlinear mechanisms in a wide range of tidal interactions (Review). In: PARKER, B. B. (Ed.). **Tidal hydrodynamics**. New York: John Wiley & Sons, 1991. p. 237–268.
- PRICE, D.; TOWNEND, I. H. Hydrodynamic, sediment process and morphological modelling. In: COLLINS, M.; ANSELL, K. (Eds.). **Solent Science — A Review**. [s.l.] Elsevier Science B.V., 2000. p. 55–70.
- QUARESMA, V. DA S.; BASTOS, A. C.; AMOS, C. L. Sedimentary processes over an intertidal flat: A field investigation at Hythe flats, Southampton Water (UK). **Marine Geology**, v. 241, n. 1–4, p. 117–136, 2007.
- SILVA, A. E. et al. Interpretation of sedimentary processes using Echo-Character Distribution: Case study of Piraquê-AÇU and Piraquê-Mirim estuarine system, Aracruz-ES (Brazil). **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 32, n. 2, p. 1–2, 2014.
- WATERHOUSE, A. F.; VALLE-LEVINSON, A. Transverse structure of subtidal flow in a weakly stratified subtropical tidal inlet. **Continental Shelf Research**, v. 30, n. 3–4, p. 281–292, 2010.
- WONG, K.-C. On the nature of transverse variability in a coastal plain estuary. **Journal of Geophysical Research**, v. 99, n. C7, p. 14209, 1994.

Recebido 25 de maio de 2020
 Aceito 13 de outubro de 2021