

Influência do regime de vazão da usina hidrelétrica de Pedra do Cavalo no comportamento espacial e temporal da salinidade no trecho fluvioestuarino do baixo curso do rio Paraguaçu à baía do Iguape

Influence of the flow regime of the Pedra do Cavalo hydroelectric plant on the spatial and temporal behavior of salinity in the fluvio-estuarine stretch of the lower course of Paraguaçu river to the Iguape bay

Tiago Rosário da Silva¹; Gabriel Aguadê do Couto²; Vânia Palmeira Campos³ e Yvonilde Dantas Pinto Medeiros⁴

^{1,2} Mestrado em Meio Ambiente, Águas e Saneamento, Universidade Federal da Bahia - BA, Brasil

tiagosilva.eng@gmail.com; gaguade@gmail.com

³ Doutorado em Química, Universidade Federal da Bahia - BA, Brasil

vaniaroc@ufba.br

⁴ Doutorado em Hidrologia, Universidade Federal da Bahia - BA, Brasil

Yvonilde.medeiros@gmail.com

Recebido: 17/07/14 - Revisado: 05/09/14 - Aceito: 05/12/14

RESUMO

A presença de barramento à montante regularizando o aporte de águas doce e materiais dissolvidos e particulados de origem fluvial no estuário exerce impactos consideráveis no processo de diluição das águas. Modelagem ambiental, utilizando-se da construção de cenários pelos modelos matemáticos, tem sido aplicada em estudos, com o objetivo de analisar tais impactos, no comportamento hidrodinâmico e da qualidade de água desses ambientes. O modelo SisBaHiA foi a ferramenta utilizada neste trabalho para a análise dos fenômenos envolvidos nos padrões de circulação das águas e o transporte e dispersão de sais no trecho do baixo curso do rio Paraguaçu à baía do Iguape. Os cenários foram desenvolvidos baseando-se nos hidrogramas ambientais propostos no plano de operação da Usina Hidrelétrica de Pedra do Cavalo, considerando os períodos hidrológicos de ano normal e seco característicos da região, as demandas prioritárias, o ecossistema e as populações ribeirinhas que habitam as margens do trecho fluvioestuarino, e utilizando-se dos recursos disponibilizados pelo ambiente. Os cenários modelados identificaram os padrões de circulação hidrodinâmica e a verificação da intrusão salina através da identificação da isoalina 5‰ no ambiente, relacionada com a magnitude das vazões operadas, auxiliando no processo de definição do ambiente que deverá ser mantido na região, atendendo aos diversos interesses da população e do ecossistema estuarino.

Palavras Chave: Modelagem ambiental. Ambiente estuarino. Circulação hidrodinâmica. Intrusão salina. Vazão ambiental

ABSTRACT:

The presence of an upstream barrier regulating the supply of freshwater and dissolved and particulate materials in the estuary of fluvial origin exerts considerable impact on the dilution of process water. Environmental modeling, using the construction of scenarios by mathematical models, has been applied in studies aiming to analyze these impacts, the hydrodynamic behavior and the quality of water in these environments. The SisBaHiA model was the tool used in this paper for the analysis of the phenomena involved in the circulation patterns of water and the transport and dispersion of salts in the stretch of the lower course of the Paraguaçu river to the Iguape bay. The scenarios were developed based on the proposed environmental hydrographs in the operation plan of Pedra do Cavalo hydroelectric plant, considering the hydrological periods of normal and dry year characteristic of the region, the priority demands, the ecosystem and coastal communities that inhabit the banks of the fluvio-estuarine stretch and using the resources provided by the environment. The modeled scenarios identified patterns of hydrodynamic circulation and verification of saline intrusion by identifying the isohaline 5‰ in the environment related to the magnitude of the operated flow, helping define the environment to be maintained in the region, taking into account the various interests of the population and the estuarine ecosystem.

Keywords: Environmental modeling. Estuarine environment. Hydrodynamic circulation. Salt intrusion. Environmental outflow

INTRODUÇÃO

O estuário é um ambiente de transição entre as águas do escoamento da bacia hidrográfica e as águas marítimas que se misturam formando zonas que a depender da influência das forças fluvial e de maré, interferem nos processos de circulação e troca de energia do ambiente, bem como nas características físicas, químicas e biológicas do ecossistema em questão.

Segundo Powell et al. (2002) as descargas fluviais são de extrema relevância para a ocorrência dos processos físicos, químicos, biológicos e geológicos nos sistemas estuarinos e nas variações da quantidade e qualidade dessas águas, influenciando diretamente nos padrões de circulação e mistura, na diluição e intrusão do sal, no transporte de sedimentos, nutrientes, poluentes, e também na regulação da distribuição das comunidades biológicas.

Miranda et al. (2002) enfatizaram que os movimentos hidrodinâmicos dos estuários são influenciados pelas atuações dos fenômenos físicos, químicos, climatológicos, oceanográficos e hidrológicos, que de modo geral, associados à morfologia do ambiente, proporcionam a dinâmica peculiar da massa d'água e de todas as substâncias e elementos presentes nela.

Entre as características da água, a salinidade possui relevância na determinação da selevidade espacial dos organismos aquáticos, alterando a sua mobilidade e variando a concentração de sais ao longo do corpo hídrico, possibilitando a formação de regiões mais ou menos propícias para o desenvolvimento da biota cultivada e extraída pelas comunidades ribeirinhas da região.

A salinidade é um escalar adimensional por ser relacionada à condutividade elétrica da água a uma temperatura e pressão conhecida. Possibilita a caracterização das massas de água, estabelecendo as condições de múltiplos usos para atender as diferentes demandas, além de determinar as diversas propriedades físico-químico-biológicas do ambiente. É influenciada diretamente pela temperatura e pressão, alterando a capacidade de dissolução dos sais pela molécula da água e consequentemente, a sua densidade.

Alber (2002) relatou a importância da salinidade como fator determinante e crítico na caracterização dos ambientes estuarinos, que através do deslocamento na isoalina causado por variações na entrada de água doce, pode afetar a distribuição da vegetação enraizada e dos organismos sésseis.

A Resolução CONAMA 357/05, no art. 2 define a classificação das águas em doce com salinidade igual ou inferior a 0,5‰, águas salobras com salinidade superior a 0,5‰ e inferior a 30‰ e águas salinas com salinidade superior a 30‰. A Tabela

Tabela 1 - Classificação de ambientes costeiros

Zona	Salinidade (%)
Hiperalina	> 40
Eualina	40 – 30
(Mixoalina)	(30 - 0,5)
polialina	30 – 18
mesoalina	18 – 5
oligoalina	5 - 0,5
Límnica (água doce)	< 0,5

Fonte: Adaptado de Ferreira et al. (2006)

1 apresenta a classificação de ambientes costeiros em termos de zonas de salinidade (FERREIRA et al., 2006).

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo analisar as mudanças hidrodinâmicas e de salinidade, em consequência da operação da Usina Hidrelétrica de Pedra do Cavalo (UHEPC), por meio da utilização de um modelo hidrodinâmico, comparando as características hidrodinâmicas e de salinidade do corpo d'água para diferentes cenários de vazões defluentes, levando em consideração o conceito de vazão ambiental.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de Estudo

O estudo foi aplicado no trecho fluvioestuarino do rio Paraguaçu, no estado da Bahia, localizado entre a barragem de Pedra do Cavalo, à montante das cidades de Cachoeira e São Félix até a falha de Maragogipe, no limite oeste da Baía do Iguape, nas proximidades das localidades de Coqueiros e Najé.

A extensão do curso d'água mede aproximadamente 20 km e escoa encaixada num vale rochoso com altitude de até 220 m, sendo navegável em toda extensão na preamar em condição de maré de sizígia, apresentando restrições de navegabilidade em baixa-mar de sizígia, em razão de baixas profundidades e formações de bancos de areias em locais mais rasos.

A região é pressionada pela antropização do adensamento populacional, pela presença de cidades e atividades industriais que margeiam todo o trecho, despejando seus efluentes no rio, além da presença de atividade de dragagem de areia do leito, agricultura, pecuária, atividade pesqueira, a navegação de embarcações de pequeno a médio porte e a UHEPC no seu curso.

A região de estudo foi subdividida em 4 pontos amostrais PA1, PA2, PA3 e PA4 (Figura 1), que abrangem a área situada à jusante da barragem de Pedra do Cavalo, compreendendo a Unidade de Conservação de mesmo nome (município de Cachoeira) e o estuário do Rio Paraguaçu.

O baixo curso do rio Paraguaçu recebe contribuições oriundas da bacia hidrográfica do rio Paraguaçu – com área de drenagem de aproximadamente 55 mil km², bem como dos

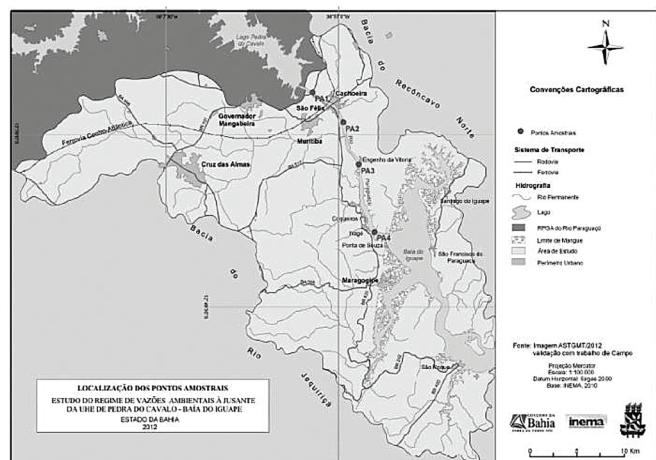


Figura 1 – Localização dos pontos amostrais

Fonte: INEMA/UFBA (2013)

principais afluentes da região e suas respectivas áreas de drenagem continental: rio Catú ($7,12 \text{ km}^2$), rio Capivari ($334,40 \text{ km}^2$), rio Cachoeirinha ($108,47 \text{ km}^2$) e o rio Pitanga ($21,96 \text{ km}^2$) (Votorantim Energia, 2013).

METODOLOGIA

O estudo foi realizado a partir da identificação da dinâmica fluvial associada à variação das marés, buscando compreender os fenômenos físico-químicos e suas relações, bem como as equações matemáticas e modelos hidrodinâmicos e de transporte de sais adequados. Para tanto, foi realizado:

(1) identificação das condições hidrológicas de referência, através de levantamento fluviométrico e de revisão de literatura; (2) identificação do comportamento das marés, através da análise das constantes harmônicas das estações maregráficas da região e de revisão de literatura; (3) escolha do modelo hidrodinâmico e de transporte de sais adequado, capaz de representar o fenômeno de interesse; (4) identificação das possíveis mudanças na calha do curso d'água, isto é, nível d'água e vazão e também o transporte de sais para as diferentes condições hidrológicas; (5) avaliação das alterações das características hidrodinâmicas e do perfil longitudinal da salinidade no rio Paraguaçu, a jusante da UHEPC, através de utilização de um modelo computacional.

Para o desenvolvimento dessa pesquisa foram utilizados os hidrogramas de referência propostos pelos estudos desenvolvidos por INEMA/UFBA (2013). Estes estudos fundamentaram-se na metodologia holística de construção de blocos-Building Block Methodology (BBM) (KING, 2008), que se apresentou como a mais indicada, por envolver de forma bastante clara não apenas os aspectos biofísicos, mas as questões socioeconômicas e institucionais.

A metodologia BBM (KING, 2008), considera como uma das fontes de informação para o conhecimento do rio, a população extrativista e ribeirinha, que observa e analisa o rio cotidianamente e depende diretamente do seu estado saudável e da diversidade de sua biota.

O método apoia-se no conceito de que algumas vazões no regime hidrológico de um rio são mais importantes que outras quanto à manutenção do ecossistema fluvial. Essas vazões podem ser identificadas e descritas em termos de sua magnitude, duração e frequencia, construindo dessa maneira o regime de vazões necessário à manutenção do ecossistema.

A indicação desse regime de vazões foi obtida após oficinas com os especialistas envolvidos. A metodologia BBM se aplica a rios que possuem poucos dados e se fundamenta na integração de uma equipe de especialistas interdisciplinares que interagirão entre eles ao longo das suas fases assim estruturadas:

(1) levantamento de dados, determinação da integridade atual do habitat, escolha das seções e classificação da condição do rio ou estuário; (2) oficina de trabalho dos especialistas para a definição de um regime de vazão adequada; (3) negociação entre os atores envolvidos, considerando preocupações ambientais com os interesses dos usuários e possibilidades de manejo.

Além disso, para o procedimento de verificação longitudinal da intrusão salina, é necessária a identificação da

ocorrência através da isoalina de 5‰, que se refere à faixa igual (isolinha) de salinidade com valor de 5‰ (FLANNERY et al., 2002; GENZ, 2006; LESSA et al., 2009; LIMA et al., 2010; TELESH; KHLEBOVICH, 2010), característica de ambiente com baixa salinidade ou oligoalino (FERREIRA et al., 2006).

Neste contexto, a modelagem hidrodinâmica e de qualidade da água consiste em uma ferramenta importante no auxílio à tomada de decisão. No entanto, os modelos devem ser utilizados criteriosamente, pois eles não produzem dados, mas sim, transformam estes em informação (TUCCI, 2005). Assim, as simulações visam fornecer informações sobre a dinâmica das águas e seus processos de mistura em diversas situações fluviais e marítimas.

A Escolha do Modelo

A escolha do modelo hidrodinâmico a ser utilizado depende de vários aspectos, dentre os quais se destacam os objetivos do estudo, as características do ecossistema, a disponibilidade de dados, a escala de representatividade do fenômeno e a familiaridade com o modelo (TUCCI, 2005).

O modelo computacional adotado para simular o comportamento hidrodinâmico e o transporte de sais no trecho fluvioestuarino, localizado a jusante da UHEPC, foi o SisBaHiA Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental, devido a sua adequação ao estudo, pois é capaz de representar satisfatoriamente o fenômeno de interesse, simulando o escoamento em sentidos opostos e acoplado ao modelo de qualidade de água para o transporte de sais, fornecendo informações de elevação do nível d'água, velocidade das correntes, vazões e o perfil longitudinal da salinidade para diferentes cenários.

Além disso, o SisBaHiA foi utilizado em estudos anteriores na região (XAVIER, 2002; TOPÁZIO, 2003; CONSÓCIO SDO-HYDROS-CH2MHill-COPPETEC, 2003 e 2003/2004) sendo calibrado e validado para as situações e condições encontradas na Baía de Todos os Santos (BTS).

O modelo hidrodinâmico SisBaHiA, possui a linhagem FIST (Filtered in Space and Time), é otimizado para corpos de águas naturais, permitindo ótima representação de contornos recortados e batimetria complexa, como a usual em tais corpos de água. Esta linhagem é baseada em técnicas de filtragem, que se aproxima daquelas empregadas na Simulação de Grandes Vórtices (LES –Large Eddy Simulation). As equações de Navier-Stokes são resolvidas com aproximação em águas rasas, considerando a aproximação de pressão hidrostática (ROSMAN et al., 2013).

No SisBaHiA o método FIST3D é composto por dois módulos: um módulo promediado na vertical ou bidimensional na horizontal (2DH), através do qual a elevação da superfície livre e velocidades de corrente 2DH promediada na vertical são calculadas; e o outro módulo 3D que calcula o campo de velocidades tridimensional através de duas opções possíveis.

O modelo de qualidade de água do SisBaHiA é baseado no Modelo de Transporte Euleriano Advectivo-Difusivo (MTEAD) para escalares conservativo e não conservativo presentes na água.

No âmbito deste trabalho foi empregado o módulo 2DH do FIST3D, que é capaz de simular a circulação hidrodinâmica em corpos de águas naturais, sob diferentes cenários

meteorológicos, oceanográficos, fluviais ou lacustres e o módulo MTEAD para a verificação do transporte dos sais longitudinal promediado na vertical.

A discretização espacial foi feita por meio de elementos finitos quadrangulares de quarta ordem. Já a discretização vertical da coluna d'água foi feita através de diferenças finitas com transformação sigma. A discretização temporal foi feita via um esquema implícito de diferenças finitas, com erro de truncamento de segunda ordem (ROSMAN et al., 2013).

Os principais dados de entrada utilizados para simular os fenômenos envolvidos no estudo foram: vazões afluentes, velocidade e direção do vento, batimetria do trecho do rio ou canal, constantes harmônicas ou registros maregráficos, rugosidade relativa, malha de elementos finitos, mapas georreferenciados do domínio de modelagem, dados iniciais dos parâmetros de qualidade da água, entre outros.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Calibração do Modelo Hidrodinâmico

O processo de calibração para o ajuste dos parâmetros do modelo foi realizado para o período referente à 5ª campanha de campo, nos dias 25, 26 e 27 de fevereiro de 2013 em condição de maré de sizígia, sendo realizadas medidas de correntes utilizando um Perfilador Acústico de Correntes com efeito Doppler (ADCP) e medidas de salinidade através da sonda hidrográfica CTD (Conductivity, Temperature and Depth).

Conforme metodologia sugerida por Rosman et al. (2013) após verificar a compatibilidade das escalas características de discretização do modelo, bem como a geometria do domínio da modelagem, o processo de calibração concentrou-se em verificar, inicialmente, as variações dos níveis de maré e posteriormente, as velocidades das correntes.

As primeiras verificações demonstraram que o modelo hidrodinâmico necessitaria de ajustes, sobretudo nas constantes harmônicas e na batimetria, pois as velocidades e vazões simuladas pelo modelo apresentavam consideráveis diferenças de fase e de amplitude em relação aos dados medidos em campo.

A diferença de fase (diferença de tempo) e de amplitude (diferença de magnitude) na simulação foi associada ao marégrafo utilizado na fronteira aberta (forçante de maré). A Figura 2 representa as principais estações maregráficas da região e estão situadas nas localidades de São Roque (Estação 143), Najé (Estação 139) e Cachoeira (Estação 137) (FEMAR, 2013).

Foram utilizadas as constantes harmônicas do marégrafo de São Roque para representar a forçante de maré, por estar mais próximo à fronteira aberta do domínio da modelagem. Após análise das primeiras simulações, foi observada à necessidade de ajustar as constantes harmônicas à fronteira aberta do modelo, ajustando as componentes K1, M2, M4, MS4, O1 e S2, conforme Tabela 2.

Após a correção das constantes harmônicas, foram realizadas 20 (vinte) simulações, variando diversos parâmetros do modelo, a exemplo de: batimetria da fronteira de terra, espessura do meio poroso-rugoso, fator de rugosidade e rugosidade equivalente.

Tabela 2 - Constantes harmônicas ajustadas para a estação São Roque

Comp.	Amplitude (m)	Fase (rad)	Amplitude (m)*	Fase (rad)*
K ₁	0,035	3,70	0,036	3,24
M ₂	0,923	1,99	0,926	1,77
M ₄	0,066	5,55	0,070	5,11
MS ₄	0,045	0,68	0,046	0,40
O ₁	0,073	2,55	0,076	2,43
S ₂	0,372	2,36	0,339	1,96

(*) Valores ajustados.

A simulação que apresentou melhores resultados foi a décima sexta (S16), na qual é possível observar o desempenho do modelo SisBaHiA em representar satisfatoriamente o fenômeno estudado, tanto em termos comportamentais como em termos absolutos, com valores estatísticos do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (COE) acima de 93% para o nível d'água e para velocidade e vazão acima de 80%. Segundo Silva et al. (2008), quando o valor de COE for maior que 75%, o desempenho do modelo é considerado bom. Para valores de COE entre 36% e 75%, o desempenho é considerado aceitável, enquanto que para valores de COE abaixo de 36% o modelo é julgado inaceitável.

Além do COE, utilizou-se também o coeficiente de correlação de Pearson para a avaliação dos resultados da simulação S16 nos Pontos Amostrais (PA) 2, 3 e 4, conforme apresenta a Tabela 3.

Tabela 3 - Desempenho do modelo: Valores de Coeficiente de Correlação de Pearson (Dados medidos X simulados)

Parâmetro Correlacionado	Pontos Amostrais		
	PA2	PA3	PA4
	Correlação de Pearson (R^2)		
Nível d'água	0,96	-	0,99
Velocidade	0,93	0,97	0,95
Vazão	0,93	0,95	0,96

Segundo Rosman et al. (2013), no SisBaHiA, as diferenças estatísticas aceitáveis para nível d'água são inferiores a 5% e as de velocidade e vazão inferiores a 20%.

Validação do Modelo Hidrodinâmico

Para o processo de validação do modelo foram utilizadas às campanhas de campo realizadas nos dias 21/10/2011 em condição de maré de quadratura e 11/11/2011 em condição de maré de sizígia.

A Tabela 4 e a Tabela 5 apresentam os resultados estatísticos encontrados para os parâmetros de nível d'água, velocidade e vazão, obtidos na simulação para os períodos das campanhas de campo, em referência às cidades de Cachoeira, Najé e ao Ponto Amostral 2 (PA2).

Observou-se que o coeficiente de correlação de Pearson manteve-se acima de 91%, corroborando para a confirmação da eficiência do modelo em representar o fenômeno estudado.

Tabela 4 - Valores de Coeficiente de Correlação de Pearson. Campanha de Out/11

Parâmetro Correlacionado	Pontos Amostrais		
	PA2	PA3	PA4
	Correlação de Pearson (R^2)		
Nível d'água	0,94	-	0,92
Velocidade	0,91	-	-
Vazão	0,92	-	-

Tabela 5 - Valores de Coeficiente de Correlação de Pearson. Campanha de Nov/11

Parâmetro Correlacionado	Pontos Amostrais		
	PA2	PA3	PA4
	Correlação de Pearson (R^2)		
Nível d'água	0,96	-	0,99
Velocidade	0,93	-	-
Vazão	0,93	-	-

Simulação dos Cenários Propostos

Para a simulação dos cenários propostos, foram utilizados os hidrogramas ambientais definidos no estudo do regime de vazão ambiental da UHEPC, realizados por INEMA/UFBA (2013), que culminaram na elaboração do novo Plano de Operação da Usina, como condição de operação do reservatório e atendimento da demanda ambiental, visando garantir a manutenção dos processos do ecossistema estuarino, bem como, o desenvolvimento dos seus componentes.

As definições dos hidrogramas ambientais tomaram como referência a quantidade, qualidade e sazonalidade das vazões defluentes da usina, observadas as restrições e regras em função da proteção das comunidades à jusante, o atendimento das demandas prioritárias dos múltiplos usuários e a manutenção da variabilidade sazonal do ambiente estuarino.

Segundo o Plano Operacional da Usina Hidrelétrica de Pedra do Cavalo (INEMA/UFBA, 2013), na condição de Ano Normal, durante o período úmido, deve ser liberado um pulso de vazão média diária de $250 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ com duração mínima de 7 dias, e na condição de ano Seco, durante o período úmido, deve ser liberado um pulso de vazão média diária de $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ com duração mínima de 4 dias.

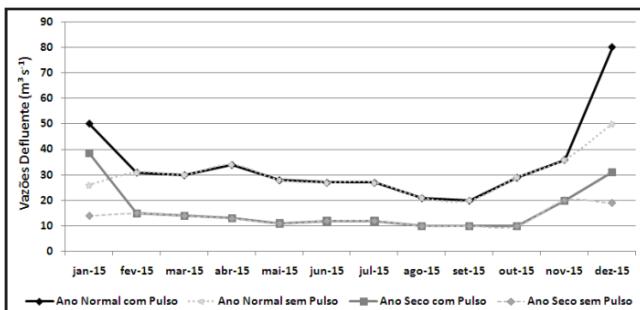


Figura 3 – Hidrogramas médios mensais para os cenários: Ano Normal com Pulso, Ano Normal sem Pulso, Ano Seco com Pulso e Ano Seco sem Pulso da UHEPC
Fonte: Adaptado de INEMA/UFBA, 2013

Assim, foram simulados quatro cenários: Ano Normal com Pulso; Ano Normal sem Pulso; Ano Seco com Pulso e Ano Seco sem Pulso, conforme representado na Figura 3.

A Figura 4 representa o resultado da simulação do comportamento hidrodinâmico no PA1 no trecho estudado para o ano de 2015. As vazões com sinal negativo indicam fluxo de corrente no sentido estuário acima ou maré enchente e as vazões positivas indicam o fluxo no sentido estuário abaixou ou maré vazante, o que evidencia a influência da forçante de maré no trecho estudado.

Os resultados da simulação no PA1 para o cenário Ano Normal com Pulso e Ano Normal sem Pulso demonstram, praticamente, a prevalência da forçante fluvial, com vazões de magnitude acima de $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ para enchentes e vazantes, limitando a influência da forçante de maré no ponto amostral.

Observa-se que em dezembro, mês característico de cheias na região, a forçante de maré quase não atingiu o PA1, devido às vazões com altas magnitudes defluentes da usina, possibilitando maior aporte de água doce para o estuário. Nos demais meses, o comportamento hidrodinâmico manteve-se variando em função das vazões maiores durante a maré vazante e menores durante a maré enchente.

Já o comportamento hidrodinâmico apresentado nos cenários Ano Seco com Pulso e Ano Seco sem Pulso apresentou uniformidade nas magnitudes das vazões e nos períodos de enchente e vazante, variando apenas em função do ciclo de maré da região.

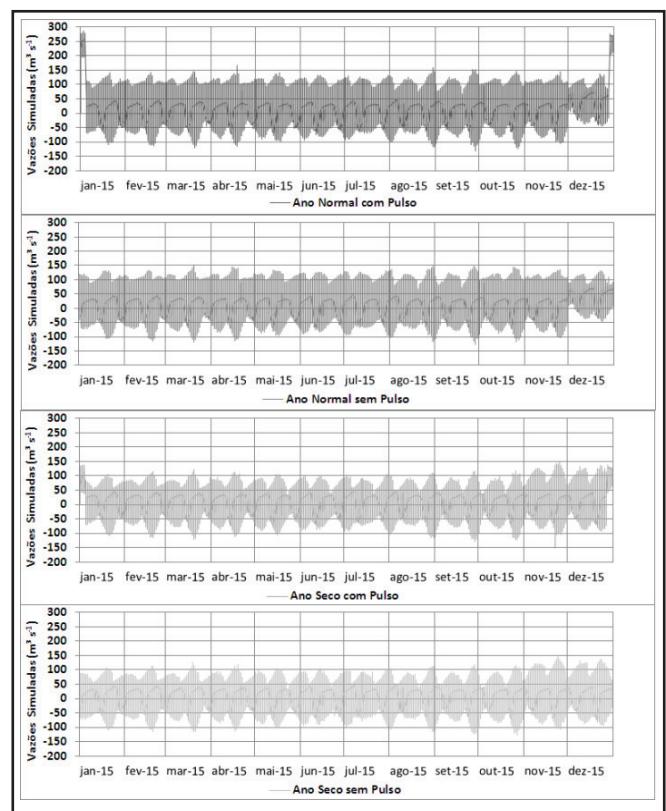


Figura 4 – Vazão simulada no PA1 para os cenários Ano Normal com Pulso, Ano Normal sem Pulso, Ano Seco com Pulso e Ano Seco sem Pulso

A Figura 5 representa os resultados das simulações dos cenários propostos utilizando o modelo de qualidade de água do SisBaHiA para o transporte longitudinal dos sais, relacionados aos valores de salinidade (‰) no PA1.

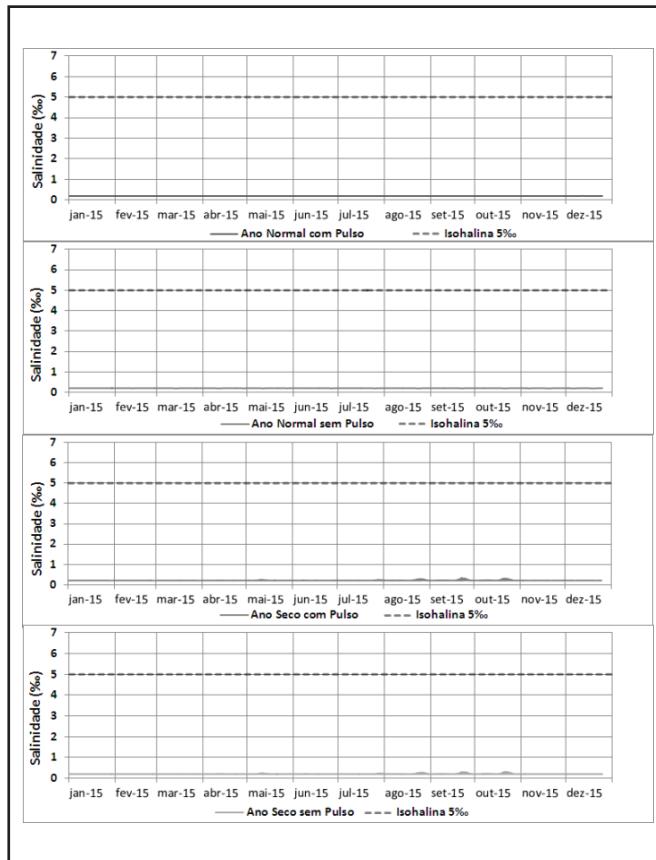


Figura 5 – Salinidade simulada no PA1 para os cenários de Ano Normal com Pulso, Ano Normal sem Pulso, Ano Seco com Pulso e Ano Seco sem Pulso

Os resultados de salinidade simulados para os quatro cenários e condições hidrológicas propostas, corroboraram com a análise do comportamento hidrodinâmico no PA1, sobre a afirmativa de não estar sendo influenciado pela forçante de maré, o que é evidenciado pelos valores de salinidade próximos a zero (0,2‰), característica de águas doce (BRASIL, 2005), permanecendo abaixo da isohalina de 5‰, possibilitando a caracterização do ambiente como lúmico (FERREIRA et al., 2006) e propício ao desenvolvimento do biota estenoalino na região.

Os resultados hidráulicos simulados no PA2 (Figura 6) representam também, o padrão de comportamento hidrodinâmico em função dos cenários propostos pelos hidrogramas ambientais operados pela Usina Hidrelétrica de Pedra do Cavalo.

Os resultados das simulações no PA2 não apresentaram alteração significativa no comportamento hidrodinâmico, em relação aos diferentes cenários e condições propostas para o Ano Normal e Ano Seco. Ocorreu apenas a mudança de influência da forçante, se comparado com os resultados do PA1, passando a ser influenciado pela forçante de maré.

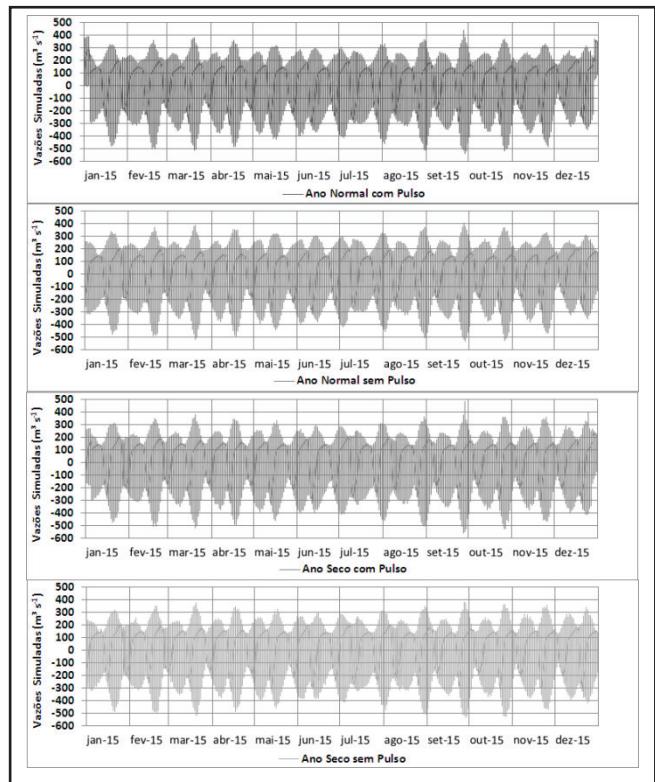


Figura 6 – Vazão simulada no PA2 para os cenários Ano Normal com Pulso, Ano Normal sem Pulso, Ano Seco com Pulso e Ano Seco sem Pulso

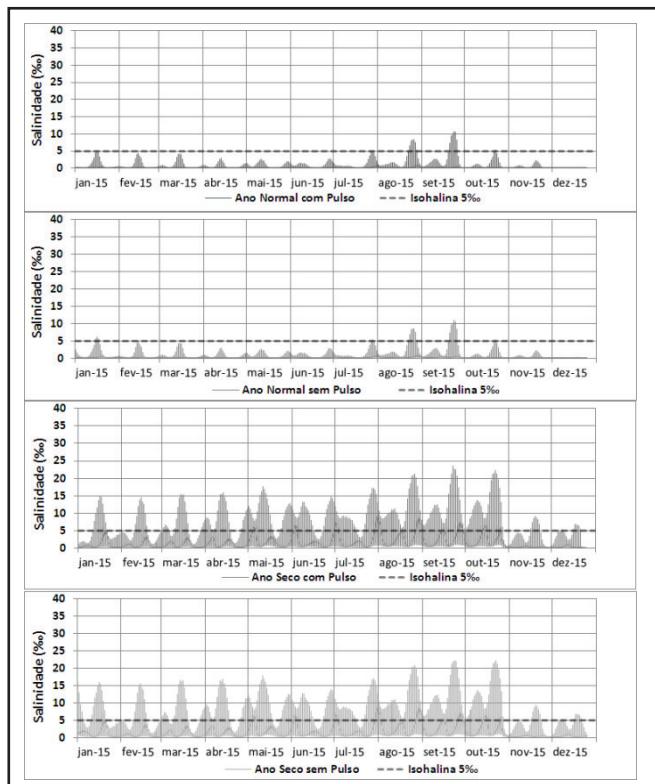


Figura 7 – Salinidade simulada no PA2 para os cenários Ano Normal com Pulso, Ano Normal sem Pulso, Ano Seco com Pulso e Ano Seco sem Pulso

As vazões de maiores magnitudes ocorreram na condição de maré de sizígia e na enchente, medindo em torno de $500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, ocorrendo uma diminuição no período característico de estiagem da região (Maio a Agosto), registrando vazões em torno de $400 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ em maré de sizígia e na enchente, ambos apresentando tempo de enchente menor do que o tempo de vazante, no trecho analisado.

A Figura 7 representa os resultados das simulações para a salinidade (%) no PA2 em função dos cenários ambientais propostos.

A Figura 7 mostra resultados simulados para os referidos cenários demonstrando variabilidade ambiental em função da salinidade nos períodos característicos de cheias e estiagem da região. Nos cenários Ano Normal com Pulso e Ano Normal sem Pulso, a salinidade manteve-se praticamente abaixo da isoalina de 5%, com exceção nos meses de agosto e setembro, devido a altas magnitudes de vazão registradas na maré enchente na condição de sizígia, prevalecendo a classificação de águas salobras (BRASIL, 2005) e classificando o ambiente como polialino (FERREIRA et al., 2006), favorável ao desenvolvimento do biota estenoalino. Entretanto, os resultados apresentados na simulação dos cenários Ano Seco com Pulso e Ano Seco sem Pulso, demonstraram alterações significativas da salinidade no ambiente. Praticamente, em todo o período observado, a salinidade esteve acima da isoalina de 5%, chegando a apresentar valores em torno de 20% nos meses de setembro e outubro, o que classifica o ambiente como mesoalino variando a polialino (Ferreira et al., 2006), favorecendo o desenvolvimento do biota eurialino na região.

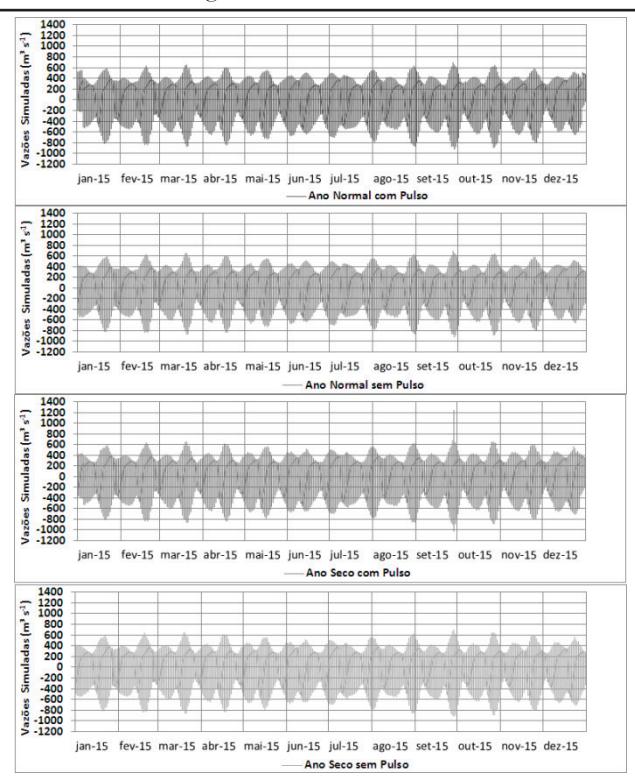


Figura 8 – Vazão simulada no PA3 para os cenários Ano Normal com Pulso, Ano Normal sem Pulso, Ano Seco com Pulso e Ano Seco sem Pulso

Observa-se que no PA2 ocorre a alteração da qualidade ambiental em função da escolha do cenário que será utilizado para a operação da usina de Pedra do Cavalo, possibilitando o acompanhamento da resposta do ambiente às alterações de quantidade e qualidade do aporte de água doce no trecho estudado.

A Figura 8 representa os resultados hidrodinâmicos das simulações em razão dos cenários propostos para as condições hidrológicas de Ano Normal e Ano Seco para o PA3.

Os resultados simulados no PA3 apresentaram, praticamente, uniformidade entre as magnitudes das vazões para os cenários propostos, independentemente, do hidrograma defluente da usina, perdendo a capacidade da variabilidade sazonal neste PA, pois, nota-se que o PA3 é totalmente influenciado pela forçante de maré.

As vazões registradas na enchente sob condição de maré de sizígia foram registradas com magnitudes da ordem de $900 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, maiores do que as vazões registradas na vazante sob mesma condição de maré com magnitude da ordem de $600 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

A Figura 9 representa o resultado das simulações de salinidade (%) no PA3, para os cenários de vazões propostas pelo estudo.

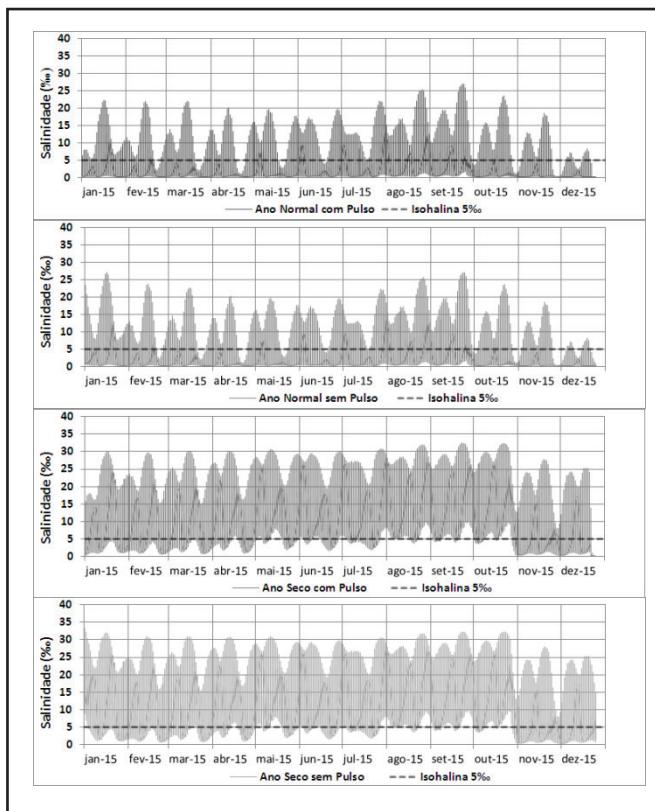


Figura 9 – Salinidade simulada no PA3 para os cenários Ano Normal com Pulso, Ano Normal sem Pulso, Ano Seco com Pulso e Ano Seco sem Pulso

Os resultados apresentados na Figura 9 para os cenários simulados, demonstraram o aumento significativo na salinidade em relação aos Pontos Amostrais anteriores, registrando a presença da isoalina de 5% variando em todo o período simulado, evidenciando o aumento na influência da forçante de maré na região.

Nos cenários Ano Normal com Pulso e Ano Normal sem Pulso a salinidade manteve-se praticamente acima da isoalina de 5‰, chegando a atingir valores acima de 25‰ nos meses de agosto e setembro permanecendo a classificação em águas salobras (BRASIL, 2005) devido a altas magnitudes de vazão registradas na maré enchente e na condição de sizígia, possibilitando a classificação do ambiente em polialino (FERREIRA et al., 2006), favorável ao desenvolvimento do biota eurialino.

No caso dos cenários Ano Seco com Pulso e Ano Seco sem Pulso, os resultados da simulação (Figura 9) demonstraram um maior aumento na salinidade no ambiente. Foi observada em todo o período simulado a presença da isoalina de 5‰, registrando valores de salinidade acima de 30‰, permitindo a classificação das águas em salobras e salinas (BRASIL, 2005), verificando apenas uma leve redução nos meses de novembro e dezembro característicos de cheias, devido ao aumento do processo de diluição da concentração dos sais. Baseado nos altos valores de salinidade observados, pode-se caracterizar o ambiente em mixoeualino, com ampla faixa de salinidade (FERREIRA et al., 2006), favorecendo o desenvolvimento do biota eurialino na região.

A Figura 10 representa os resultados hidrodinâmicos das simulações em razão dos cenários propostos para as condições hidrológicas de Ano Normal e Ano Seco para o PA4.

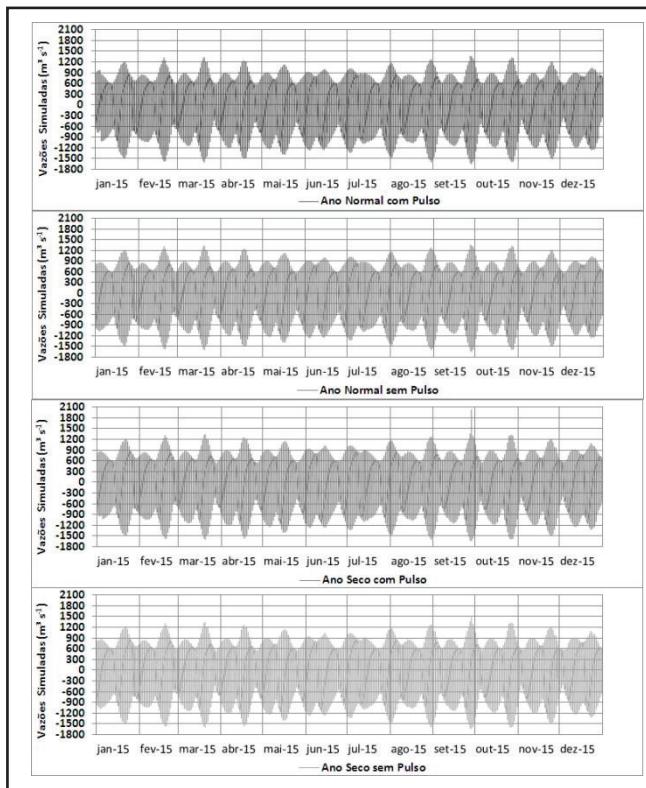


Figura 10 – Vazão simulada no PA4 para os cenários Ano Normal com Pulso, Ano Normal sem Pulso, Ano Seco com Pulso e Ano Seco sem Pulso

Os resultados simulados no PA4 apresentaram, praticamente, uniformidade entre as magnitudes das vazões para os cenários propostos, independentemente, do hidrograma defluente

da usina, perdendo a capacidade da variabilidade sazonal neste ponto amostral, pois, nota-se que o PA4, assim como no PA3, é totalmente influenciado pela força de maré.

As vazões registradas na enchente sob condição de maré de sizígia tinham magnitudes da ordem de $1.500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, mais altas do que as vazões registradas na vazante sob mesma condição de maré com magnitude da ordem de $1.300 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

A Figura 11 representa o resultado das simulações de salinidade (%) no PA4, em relação às magnitudes das vazões liberadas pela usina para os cenários propostos.

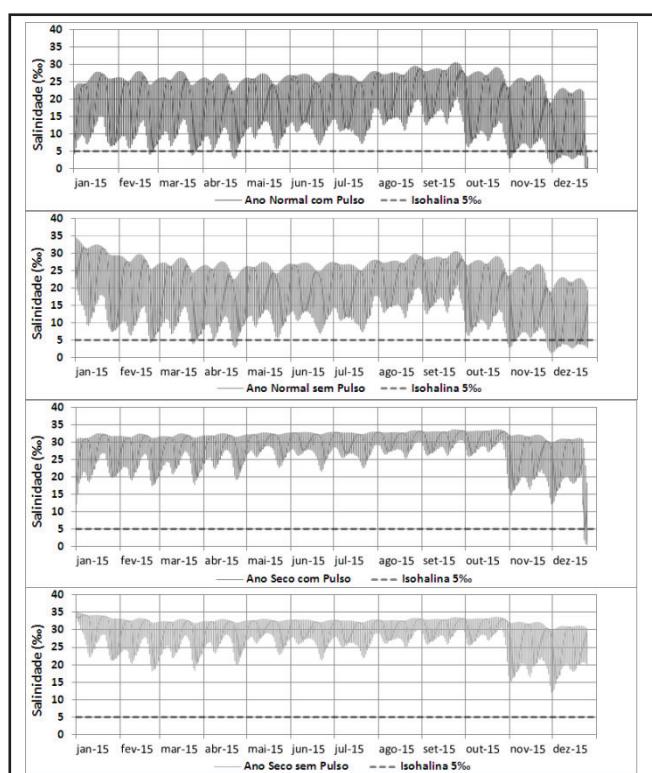


Figura 11 – Salinidade simulada no PA4 para os cenários Ano Normal com Pulso, Ano Normal sem Pulso, Ano Seco com Pulso e Ano Seco sem Pulso

Os resultados da simulação de salinidade para os quatro cenários demonstraram que em todo o período simulado há ocorrência da intrusão salina no PA4. Nos cenários Ano Normal com Pulso e Ano Normal sem Pulso a salinidade manteve-se praticamente acima da isoalina de 5‰, com valores variando de 1‰ a 30‰, características de águas salobras e salinas (BRASIL, 2005) em razão de altas magnitudes de vazão registradas na maré enchente em condição de sizígia, possibilitando também a classificação do ambiente em mixoalino variando a polialino (FERREIRA et al., 2006), favorável ao desenvolvimento do biota eurialino. No entanto, os resultados apresentados na simulação dos cenários Ano Seco com Pulso e Ano Seco sem Pulso, apresentaram os valores mais altos de salinidade para todo o trecho estudado, devido a sua proximidade com a baía de Iguape e também, com base no fato de que as vazões aplicadas pelos hidrogramas propostos não chegam ao PA4, distante 20 km da barragem de Pedra do Cavalo.

Foi observada uma faixa restrita de salinidade no ambiente variando de 13‰ a 34‰, classificando suas águas como salobras a salinas em todo o período simulado (BRASIL, 2005), variando em razão do ciclo de maré da região, permitindo a classificação do ambiente também em mixoalino variando a polialino (FERREIRA et al., 2006), favorecendo o desenvolvimento do biota eurialino na região.

CONCLUSÕES

Os estudos hidrológicos e hidráulicos de suporte à determinação da vazão ambiental do rio Paraguaçu demonstraram as alterações ocorridas no regime fluvioestuarino ao longo do trecho entre a barragem e a Baía do Iguape quanto à magnitude e sazonalidade, considerando as condições hidrológicas características de ano Normal e ano Seco, observando as regras e restrições operacionais da usina de Pedra do Cavalo no atendimento aos múltiplos usuários e ao ecossistema em questão.

A alteração no comportamento hidrodinâmico do trecho estudado pode ser evidenciada na defasagem de tempo entre as preamares e baixa-mares, em função das magnitudes das vazões liberadas pela usina. Foi observada em todo o trecho a redução de tempo das correntes de enchente em relação ao tempo das correntes de vazante, com exceção do cenário Ano Normal para o PA1, que é influenciado diretamente pelas altas magnitudes de vazões defluentes pela usina.

As vazões mensais simuladas para os quatro períodos refletem as condições de diminuição na sua magnitude nos meses característicos de cheia, para trechos mais próximos da barragem, que tem seu fluxo controlado pelas vazões liberadas pela usina e da fraca influência desta operação sobre os trechos próximos da Baía do Iguape, os quais apresentam o comportamento hidrodinâmico de acordo com o ciclo das marés.

Os cenários simulados apresentaram alteração na qualidade ambiental em relação à salinidade, podendo ocasionar o deslocamento do biota estenoalino para as regiões próximas dos PA1 e PA2, favoráveis ao seu desenvolvimento. Enquanto que, em razão dos altos valores de salinidade observados nos PA3 e PA4 e também da ampla faixa de variação da salinidade no trecho fluvioestuarino, o domínio do habitat pelo biota eurialino característico de águas salobras é permitido.

REFERÊNCIAS

- ALBER, M. A Conceptual Model of Estuarine Fresh water Inflow Management. *Rev. Estuaries*, v. 25, n. 6B, p.1246-1261, 2002.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. *Resolução nº 357 de 17 de março de 2005*. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Brasília. Publicação DOU n. 53, de 18/03/2005, 2005. pag.58-63.
- CONSÓRCIO HYDROS / CH2MHILL / COOPETEC. *Modelagem computacional para análise de aspectos dos sistemas de disposição oceanica da área metropolitana de Salvador/B.A.* 2003/2004 (PENO-4144-RF).
- FEMAR - Fundação Estudos do Mar. *Estações Maregráficas do Brasil*. Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <http://www.fundacaofemar.org.br/#>. Acessado em: 12 de nov. 2013.
- FERREIRA, J.G.; NOBRE, A.M.; SIMAS, T.C.; SILVA, M.C.; NEWTON, A.; BRICKER, S.B.; WOLFF, W.J.; STACEY, P.E.; SEQUEIRA, A. *A methodology for defining homogeneous water bodies in estuaries- Application to the transitional systems of the EU Water Framework Directive*. In: *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 66. Elsevier, 2006, p. 468-482.
- FLANNERY, M.S.; PEEBLES, E.B.; MONTGOMERY, R.T. A percent-of-flow approach for managing reductions of freshwater inflows from unimpounded rivers to Southwest Florida estuaries. *Rev. Estuaries*. v. 25, n.6B, p.1318-1332, 2002.
- GENZ, F. *Avaliação dos efeitos da barragem Pedra do Cavalo sobre a circulação estuarina do Rio Paraguaçu e Baía de Iguape*. 2006. 266 f. Tese (Doutorado - Curso de pós-graduação em Geologia) - UFBA, Bahia. Disponível em: <http://www.goat.fis.ufba.br/uploads/userfiles/31.pdf>. Acessado em: 26 de maio de 2012.
- INEMA/UFBA. Relatório Intermediário 4 (RI4), referente ao Projeto Estudo do Regime de Vazões Ambientais a Jusante da UHE de Pedra do Cavalo – Baía de Iguape. Volume 4 - Relatório de Síntese - Documento base para oficina de proposição do hidrograma ambiental. Contrato nº 012/09 entre INGÁ e UFBA. Salvador-BA, 2013. 267p.
- KING, J.M.; THARME, R.E.; VILLIERS, M.S. *Environmental Flow Assessments For Rivers: Manual For The Building Block Methodology*. WRC Report N° 131/00. Fresh Research Unit. University of Cape Town. South Africa, July, 2008.
- LESSA, G.C.; CIRANO, M.; GENZ, F.; TANAJURA, C.A. S.; SILVA, R. R. Oceanografia Física. In: HATJE, V.; ANDREADE, J. B. (Orgs). *Baía de Todos os Santos: Aspectos Oceanográficos*, Salvador-BA. Ed. EDUFBA. Cap.III, 2009. 67-119 p.
- LIMA G.M.P.; LESSA G.C.; FRANKLIN, T. S. Avaliação dos impactos da barragem de Santa Helena no trecho estuarino do rio Jacuípe, litoral norte da Bahia - Brasil. In: *Quaternary and Environmental Geosciences*. v. 2, n. 1, p.40-54, 2010.
- MIRANDA, L.B.; CASTRO, B.M.; KJERFVE, B.; *Princípios de oceanografia física de estuários*. São Paulo : EDUSP - Editora da Universidade de São Paulo, 2002. 424 p.
- POWELL, G.L.; MATSUMOTO, J.; BROCK, D.A. Methods for Determining Minimum Freshwater Inflow Needs of Texas Bays and Estuaries. *Rev. Estuaries*. v. 25, n. 6B, p. 1262-1274, 2002.

ROSMAN, P. C. C.; CUNHA, C. L. N.; CABRAL, M. M. et al. *Referência Técnica do SisBaHiA*. COPPE /UFRJ. Programa de Engenharia Oceânica, Rio de Janeiro, RJ. Versão 9.2, 2013. 249 p. Disponível em: http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/SisBAHIA_RefTec_V92.pdf. Acessado em: 15 de abril de 2013.

SILVA, P.M.O.; MELLO, C.R.; SILVA, A.M.; COELHO, G. Modelagem da hidrografia de cheia em uma bacia hidrográfica da região do Alto Rio Grande. *R. Bras. Engenharia e Agricultura Ambiental*, v. 12, p. 258-265, 2008.

TELESH, I.V.; KHLEBOVICH, V.V. Principal processes with in the estuarines alinitygradient: A review. *Marine Pollution Bulletin*, v. 61, p.149–155, 2010

TOPÁZIO, E. F. *Modelagem de plumas do emissário com T90 variável na costa oceânica de Salvador-BA*. 2003. 129f. Dissertação (Mestrado - COPPE/UFRJ, Engenharia Oceânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, 2003.

TUCCI, C. E. M. *Modelos Hidrológicos*. 2^a ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS. ABRH GWP, 2005. v. 1. 678p.

VOTORANTIM ENERGIA - Usina Hidrelétrica Pedra do Cavalo. *Plano Operativo da UHE Pedra do Cavalo*. São Paulo, 2013.

XAVIER, A. G. *Análise da Hidrodinâmica da Baía de Todos os Santos – BA*. 2002. 222 f. Tese (Doutorado COPPE/UFRJ, D.Sc, Engenharia Oceânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, 2002.