IAHR **AMH**

XVIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
OAXACA, MÉXICO, OCTUBRE, 1998

IMPACTO DA VAZÃO DA BARRAGEM DO VALO GRANDE NA DISTRIBUIÇÃO DE SALINIDADE NO COMPLEXO ESTUARINO - LAGUNAR DE IGUAPE - CANANÉIA (ESTADO DE SÃO PAULO)

Paolo Alfredini & Igor Oliveira dos Santos

05508-900, São Paulo, Brasil; e-mail: alfredin@usp.br; Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Centro Tecnológico de Hidráulica e Recursos Hídricos e Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica

05508-900, São Paulo, Brasil; e-mail: iosantos@usp.br

RESUMO

O Complexo Estuarino-Lagunar de Iguape-Cananéia é um dos maiores do gênero no Brasil e o maior do Estado de São Paulo, representando uma importante área de preservação ambiental. A salinidade das águas é de fundamental importância para definir a qualidade das águas para os processos biológicos que ali se desenvolvem. A disponibilidade de dados hidráulico-salinos levantados na década de 80 permitiu caracterizar o estuário como bem misturado. Procedeu-se à calibração do método proposto por IPPEN (1966) como modelo de descrição da dinâmica da intrusão salina, o que permitiu verificar a adequação desta metodologia e as suas limitações, também tendo em vista algumas hipóteses que tiveram que ser adotadas. Procurou-se também inferir o impacto sobre o Mar Pequeno do aumento da descarga de água doce proveniente da Barragem do Valo Grande, que se constitui na principal condicionante antrópica da região, e que põe em comunicação a bacia fluvial do Rio Ribeira do Iguape com o Mar Pequeno. Quando a barragem vertedora estiver completada estará dotada de comportas que permitirão, por meio de uma apropriada regra operacional, controlar os danos advindos das inundações do Baixo Ribeira por meio do desvio de uma parcela da vazão para o Mar Pequeno. Esta regra operacional deverá estar condicionada, além dos aspectos hidrológicos, ao impacto produzido pela redução de salinidade sobre a biota do sistema estuarino-lagunar.

ABSTRACT

The Iguape-Cananéia Estuarine-Lagunar Complex is one of the largest in Brazil and the largest one in the State of São Paulo, corresponding to an important environmental preservation area. Water salinity has a fundamental importance to defining water quality for the biological processes. The availability of hydraulic and saline data which have been measured in the eighties enabled to classify the estuarine area as well mixed according to water density behaviour. The method proposed by IPPEN (1966) was adopted to describe the salinity intrusion dynamics and calibrated, which gave the possibility to evaluate its reliability and its limitations, also regarding some hypothesis used. The impact assessment due to the fresh water increasing from the Valo Grande Dam, which was also evaluated because this is the main anthropic influence in this estuarine area and the fluvial connection between Ribeira do Iguape River and Mar Pequeno. When the spillway dam will be concluded it will have sluices which will enable, by an adequate operational rule, to control flood disasters due to floods in Lower Ribeira deviating a discharge portion in the Mar Pequeno. This operational rule should be conditioned, beyond hydrological features, to the impact on the estuarine-lagunar biota produced by the salinity reduction.

IAHR **AMH**

XVIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
OAXACA, MÉXICO, OCTUBRE, 1998

IMPACTO DA VAZÃO DA BARRAGEM DO VALO GRANDE NA DISTRIBUIÇÃO DE SALINIDADE NO COMPLEXO ESTUARINO - LAGUNAR DE IGUAPE - CANANÉIA (ESTADO DE SÃO PAULO)

Paolo Alfredini & Igor Oliveira dos Santos

05508-900, São Paulo, Brasil; e-mail: alfredin@usp.br; Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Centro Tecnológico de Hidráulica e Recursos Hídricos e Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica

05508-900, São Paulo, Brasil; e-mail: iosantos@usp.br

INTRODUÇÃO

O Complexo Estuarino-Lagunar de Iguape-Cananéia, localizado no extremo sul do Estado de São Paulo, possui cerca de 2000 Km^2 e é o maior e o mais bem preservado do gênero no litoral paulista, revestindo-se de grande importância como berçário da vida marinha, sendo considerado um dos maiores viveiros de peixes e crustáceos do litoral brasileiro. Desde a década de 50, com a instalação da Base Sul do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo e da Missão Hidrográfica de Cananéia do Laboratório de Hidráulica da Universidade de São Paulo, vários estudos e levantamentos de dados foram realizados na região. Estes estudos basicamente visaram a obtenção do conhecimento científico da área, bem como a avaliação do impacto das obras ali implantadas, dentre as quais se destaca o Valo Grande.

O canal do Valo Grande, com cerca de 3 Km de extensão, que foi aberto com a finalidade do acesso da navegação interior ao porto marítimo de Iguape no Mar Pequeno, a partir da década de 1840 pôs em comunicação as águas doces do Rio Ribeira com as salobras do Mar Pequeno. Em virtude da violenta erosão a que foi submetido este canal e as áreas ribeirinhas, bem como do correspondente elevado aporte de sedimentos no Mar Pequeno e que assoreou muitos trechos, além do impacto sobre a biota lagunar pela descarga de água doce e turva e de outros fatores, em 1978 um barramento permeável foi construído visando reduzir sensivelmente estes inconvenientes. Deste modo as águas voltaram a fluir em sua totalidade pelo chamado Ribeira Velho numa extensão de 27 Km até a desembocadura marítima da Barra do Ribeira. No entanto grandes inundações passaram a assolar frequentemente a bacia hidrográfica do Rio Ribeira do Iguape, a pior delas em volume e permanência das águas altas foi a de junho de 1983, cujas áreas ribeirinhas 150 anos após o início da construção do Valo estão ocupadas principalmente pela cultura da banana. No início desta década iniciou-se a obra de implantação da barragem vertedora definitiva, que será dotada de comportas cuja operação deverá ser regulada por uma regra a ser definida pelas condicionantes hidrológicas, bem como ecológicas no que diz respeito ao impacto sobre a biota do Mar Pequeno.

Neste estudo, que conta com o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, avalia-se a nível conceitual, por meio de um modelo unidimensional simplificado, o impacto sobre a salinidade do sistema estuarino-lagunar da operação do vertedor da barragem do Valo Grande.

CARACTERIZAÇÃO GERAL DA REGIÃO

O complexo estuarino-lagunar é basicamente conformado por três ilhas que definem o sistema de canais de maré por onde se propagam as ondas de maré a partir de três embocaduras marítimas. Conforme mostrado na Figura 1, as Ilhas Comprida, do Cardoso, de Cananéia e de Iguape conformam o Mar Pequeno, o Mar de Cubatão e a Baía de Trapandé. A onda de maré penetra no complexo pela: Barra de Icapara, entre a Ilha Comprida e a Ilha de Iguape; Barra de Cananéia, entre a Ilha Comprida e a Ilha do Cardoso; e Barra do Ararapira, entre a Ilha do Cardoso e a Ilha do Superagui (PR), sendo esta última a divisa administrativa com o Estado do Paraná. As áreas de encontro das ondas de maré situam-se em Subauna na Pedra do Tombo no Mar Pequeno, no Rio Guapara que é um alargamento do Mar de Cubatão e no canal interno entre a Ilha do Cardoso e o continente a cerca de 6 Km da foz na Baía de Trapandé.

De acordo com as medições de salinidade disponíveis na área (SÃO PAULO 1984 e 1985, MIRANDA ET ALII, 1995 E MIRANDA ET AL, 1997) desde a conclusão da Barragem do Valo Grande, em 1978, o complexo estuarino-lagunar é classificado como parcialmente misturado. De acordo com IPPEN (1966), a classificação seria de bem misturado, uma vez que a variação temporal do valor médio da salinidade muda menos do que 50% da superfície para o fundo na maioria das observações, abrangendo marés de sizígia e quadratura. Assim sendo, adotou-se o modelo de análise unidimensional de estuários misturados proposto por IPPEN (1966) para avaliar a intrusão salina, conforme apresentado no item a seguir.

Anteriormente a 1840, ao que tudo indica, havia um equilíbrio ótimo entre os componentes do ecossistema sob a influência da água do mar que, penetrando na região pela ação das marés, se diluía moderadamente por extensas áreas na água doce dos pequenos riachos. Antes do fechamento do Valo Grande em 1978 observava-se que, por influência das grandes vazões do Rio Ribeira do Iguape, as variações de temperatura, salinidade e transparência da água modificavam-se constantemente num mesmo local durante o dia, devido às fortes correntes e da carga sedimentar trazida pelo rio. Segundo GEOBRÁS (1966), a vazão mediana do ano médio do Rio Ribeira imediatamente a montante do canal do Valo Grande é de 375 m^3/s Em consequência, o ambiente tornou-se, principalmente no Mar Pequeno de Iguape, em grande parte impróprio para a reprodução, crescimento e mesmo a vida de inúmeros organismos, cujas populações foram reduzidas drasticamente ou desaparecerem da região por não encontrarem condições ideais para a sua sobrevivência. A Baía de Trapandé e o Mar de Cubatão apresentam a ictiofauna mais rica da região.

A salinidade, uma das características ambientais mais importantes para o desenvolvimento da biota lagunar, apresentava os seguintes valores médios na vertical (em g/l) no Mar de Cananéia próximo à cidade de Cananéia (DAEE, 1980) nos meses de setembro a março: 19,87 $\pm$ 4,29 anteriormente ao fechamento do Valo Grande (anos de 1975, 1976 e 1977) e 28,14 $\pm$ 2,10 no primeiro ano após o fechamento do Valo Grande (no ano de 1979). A estação do ano de menor salinidade é normalmente de fevereiro - março e a de maior salinidade agosto - outubro.

FUNDAMENTOS DA ANÁLISE UNIDIMENSIONAL DE ESTUÁRIOS MISTURADOS SEGUNDO IPPEN (1966)

FATORES BÁSICOS GOVERNANDO A DISTRIBUIÇÃO DE SALINIDADE EM ESTUÁRIOS

A dinâmica da intrusão salina depende dos fatores básicos que governam o regime de escoamento em estuários, que são fundamentalmente:

- O efeito da maré atuando na extensão do desenvolvimento da intrusão como uma função das marés forçantes na boca estuarina, que no caso geral resultam da superposição da maré astronômica e dos efeitos meteorológicos.
- O efeito das forças gravitacionais em função das variações da densidade entre a água doce provinda das bacias hidrográficas interiores e da água salgada que penetra pela boca estuarina, produzindo as chamadas correntes de densidade.
- As forças gravitacionais que induzem a vazão de água doce resultante rumo à boca estuarina.

REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA UNIDIMENSIONAL DA INTRUSÃO SALINA

Quando o prisma de maré resulta muito maior em relação à vazão de água doce durante um ciclo de maré o estuário pode vir a ser classificado como bem misturado. Neste tipo de dinâmica hidráulico-salina a intrusão não pode ser identificada por uma fronteira definida claramente como uma interface entre água doce e água salgada, como no caso de uma cunha salina. Assim, as salinidades podem ser tratadas como médias ao longo da profundidade. Admite-se poder definir como bem misturado o estuário em que a variação do valor médio temporal da salinidade for inferior a 50 % da superfície para o fundo do canal. Nestas condições as correntes de maré são muito mais eficazes do que as correntes de densidade.

No tratamento unidimensional simplificado a partir da equação da continuidade e da equação de difusão convectiva, mediados por um período de tempo equivalente a um ciclo de maré pode-se chegar à Equação (1) que define a salinidade para qualquer distância x, medida como positiva a partir da extremidade oceânica para o interior do estuário, e para qualquer instante t da maré, cuja contagem inicia-se a partir do instante de baixa-mar na extremidade oceânica:

$$\frac{s(x,t)}{s_0} = \exp\left\{-\frac{U_f}{2D_0'B}\left[N - (N - x)\exp\left(a_0\frac{(1-\cos\sigma t)}{h}\right) + B\right]^2\right\} \qquad (1)$$

em que:

s_0: salinidade oceânica
U_f: velocidade da água doce
D_0': coeficiente de difusão aparente
B: comprimento em baixa-mar para a máxima salinidade oceânica atingir a extremidade oceânica do estuário
a_0: amplitude da maré na extremidade oceânica
σ: frequência angular da maré
h: profundidade média do estuário

O termo N é dado pela Equação (2):

$$N = \left(\frac{hu_0}{a_0\sigma}\right) \qquad (2)$$

em que u_0 é a máxima corrente de maré na extremidadade oceânica do estuário.

A estimativa de B é dada pela Equação (3):

$$B \approx \frac{u_0}{\sigma}\left(1-\cos\sigma t_B\right) \qquad (3)$$

em que t_B é o instante, contado a partir da baixa-mar, em que se atinge a salinidade oceânica na extremidade oceânica do estuário.

A relação entre o coeficiente de difusão aparente e o coeficiente de difusão é fornecida pela Equação (4):

$$\frac{D_0^{'}}{D_0} = \frac{U_f\left(1-\cos\sigma t_B\right)}{9\sqrt{f}\sigma h \ln\left(\frac{s_0}{s_{min}}\right)} \qquad (4)$$

em que s_{min} corresponde à salinidade média mínima em baixa-mar e na embocadura oceânica do estuário.

CONSIDERAÇÕES SOBRE OS DADOS UTILIZADOS

Toda aproximação conceitual envolve inevitáveis esquematizações da realidade física para se atingir uma solução. Na abordagem unidimensional aqui utilizada, além das considerações já adotadas no equacionamento apresentado no item anterior, foram adotadas algumas simplificações e/ou considerações adicionais que importa salientar.

A base de dados na qual foi fundamentada a verificação da calibração do modelo foi a levantada na campanha hidrográfica de 1983 a 1985 (SÃO PAULO, 1984 a 1985), efetuada pelo Centro Tecnológico de Hidráulica DAEE-EPUSP contando com o apoio do Instituto Oceanográfico da USP. Para as diversas seções levantadas (ver Figura 1), em marés de quadratura e sizígia, procedeu-se à determinação das salinidades médias na vertical de medida (talvegue do canal), que via de regra eram medidas em períodos próximos à preamar e à baixa-mar, com o intuito de se obterem as salinidades extremas. Estas medições abrangeram os meses de setembro a março, contemplando portanto as situações de salinidades mínimas e máximas. Não se considerou nos cálculos a penetração de água doce do Rio Ribeira do Iguape no Mar Pequeno através da Barra de Icapara, que situa-se muito próxima à primeira (cerca de 2 Km).

A informação de maré utilizada neste estudo foi extraída das Tábuas das Marés da Base Sul do Instituto Oceanográfico da USP, gentilmente fornecidas pelo Prof. Assoc. Joseph Harari, para a análise da dinâmica do Mar Pequeno de Cananéia e da Baía de Trapandé, e das Tábuas de Maré da MARINHA (1983, 1984 e 1985) para Santos e Paranaguá (Canal Sueste), para a análise do Mar Pequeno de Iguape. Deste modo não foram considerados eventuais efeitos meteorológicos sobre a maré.

A geometria dos canais estuarinos foi reduzida a dimensões médias de largura considerando canal retangular, com base no levantamento das seções batimétricas realizado em 1984 e 1985 (SÃO PAULO, 1984 e 1985), ponderando linearmente as áreas em função do espaçamento entre as seções. Por tratarem-se de canais largos, o raio hidráulico foi assumido igual à profundidade.

A composição das características geométricas do Estuário do Mar do Taquari, que se situa entre a Baía de Trapandé e o Mar de Cubatão, teve que ser aproximada para o trecho do canal interno à Ilha do Cardoso, em virtude de não se dispor de hidrografia para esta área.

O tempo t_B foi adotado exatamente igual ao semi-período da maré e para o cálculo de u_0 admitiu-se comportamento de onda estacionária pura para a maré com período de 44700 s.

As vazões de água doce adotadas fundamentaram-se no balanço hídrico exposto em GEOBRÁS (1966) para as descargas fluviais medianas do ano médio, não tendo sido considerada a influência de precipitações pluviométricas e evaporações referentes às superfícies molhadas do corpo estuarino lagunar. A condição vigente no período de 1983 a 1985 para o Canal do Valo Grande presumiu uma percolação pelo maciço da barragem. Admitiu-se uma condição denominada Valo Grande aberto, que considera uma descarga pelo vertedor da barragem de 178 m^3/s, correspondente a uma primeira aproximação de regra operativa que mantenha uma divisão equitativa das águas do Rio Ribeira entre o Valo Grande e o Ribeira Velho. Deve-se levar em conta que com a implantação de barragens de regularização, previstas a montante da bacia, estes valores poderão ser significativamente reduzidos.

RESULTADOS OBTIDOS

Os dados foram elaborados por meio de planilhas eletrônicas produzindo gráficos dos resultados (ver Figuras 2 a 7), cujos mais significativos encontram-se apresentados na sequência. Estes gráficos apresentam as condições de preamar e baixa-mar medida e calculada pela teoria com o Valo Grande fechado e a calculada com as comportas da barragem do Valo Grande deixando passar 178 m^3/s .

O conjunto de gráficos contempla os estuários do Mar Pequeno de Iguape, Mar Pequeno de Cananéia e Mar do Taquari (entre a Baía de Trapandé e o Mar de Cubatão), considerando-se como seção 0 a da boca do estuário do Mar Pequeno de Iguape, na Barra de Icapara, e a da boca do estuário do Mar Pequeno de Cananéia e Mar do Taquari, na Barra de Cananéia.

ANÁLISE E CONCLUSÕES

O melhor ajuste conseguido na calibração foi o do Mar Pequeno de Cananéia.

Em todos os casos a aderência dos pontos ajustados aos medidos é pior nas condições de quadratura. De um modo geral, os ajustes em baixa-mar são piores do que em preamar.

No Mar Pequeno de Iguape, por ser mais raso, o decaimento da salinidade é o mais acentuado. Os valores mais baixos de salinidade no Mar Pequeno de Iguape são devidos ao aporte de água doce da bacia do Mar Pequeno, bem como à reduzida capacidade evacuadora da Barra de Icapara devido ao seu entulhamento. A região já era normalmente caracterizada pela instabilidade das condições ambientais, especificamente de salinidade, mesmo após o fechamento do Valo Grande, principalmente por ocasião de retornos de água doce provenientes da Barra de Icapara e trazidas pelas correntes de enchente a partir da Barra do Ribeira. A Barra de Cananéia, por ser uma embocadura de maior seção transversal, apresenta condições mais favoráveis de troca das águas entre o sistema lagunar interior e o mar e, em consequência, a salinidade é mais elevada e o seu decaimento rumo ao interior do sistema é mais reduzido, denotando maior influência das condições marítimas.

O modelo unidimensional, na forma como foi aplicado, funciona bem nos trechos mais próximos à embocadura marítima, sendo mais falho à medida que se dirige o cálculo para as áreas interiores.

Os resultados obtidos no sul do Mar de Cananéia são coerentes com os resultados referentes às condições de salinidade obtidos por DAEE (1980) com o Valo Grande aberto e fechado e MIRANDA ET AL (1997) com o Valo Grande fechado e com maior vazão percolando pelo mesmo.

Os coeficientes de difusão aparente reduzidos aos de dispersão longitudinal apresentam valores relativamente baixos devido às pequenas vazões de água doce consideradas, podendo ser considerados coerentes em comparação com os de outras áreas estuarinas do mundo (FISCHER ET ALII, 1979).

A operação do vertedor da barragem do Valo Grande mostra um maior efeito na redução da salinidade nos períodos de quadratura, sendo os efeitos muito menos sentidos no Mar de Cananéia, enquanto no Mar Pequeno de Iguape as reduções são drasticamente marcantes. Assim, estima-se que a frequência de penetração de águas doces do Rio Ribeira do Iguape no Mar de Cananéia, que com o Valo Grande aberto ocorriam na coincidência de curtos períodos chuvosos com fortes cheias do rio, sejam em muito reduzidas, o que certamente contribuirá na preservação do ecossistema ao sul da Pedra do Tombo, particularmente da Baía de Trapandé e do Mar de Cubatão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

FISCHER, H. B., LIST, E. J., KOH, R. C. Y., IMBERGER, J. & BROOKS, N. H. - *Mixing in inland and coastal waters*. Academic Press, New York, 1979.

FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA - *Valo Grande - Estudo de salinidade.* Relatório Parcial I, 1990.

_____- *Caracterização hidrodinâmica da região estuarino-lagunar de Cananéia-Iguape - Calibração do modelo HCMU*. Relatório Parcial, 1991.

GEOBRÁS - *Complexo Valo Grande - Mar Pequeno - Rio Ribeira de Iguape*. Relatório para o Serviço do Vale do Ribeira - DAEE, São Paulo, 1966.

IPPEN, A. T. ed. - *Estuarine and coastline hydrodynamics.* Mc Graw Hill Books Company Inc., New York, 1966.

MARINHA DO BRASIL/DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO - *Tábuas das marés de 1983, 1984 e 1985.*

MIRANDA, L. B., MESQUITA, A. R. & FRANÇA, C. A. S. - "Estudo da circulação e dos processos de mistura no extremo sul do Mar de Cananéia: condições de dezembro de 1991". *Boletim do Instituto Oceanográfico,* São Paulo, 43 (2), 1995.

MIRANDA, L. B., & CASTRO FILHO, B. M. - "On the salt transport in the Cananéia Sea during a spring tide experiment". *Revista Brasileira de oceanografia,* 44 (2), 1996.

MIRANDA, L. B., & CASTRO FILHO, B. M. - "Classificação do Mar de Cananéia e estimativa do fluxo de sal". *Anais do VII COLACMAR*, Santos, 1997.

SÃO PAULO (ESTADO)/ CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA DAEE - EPUSP - *Mar Pequeno de Iguape - Cananéia - Estudos em andamento.* Relatórios Parciais de Atividades, São Paulo, 1984 e 1985.

_____ / DIRETORIA DE OBRAS GERAIS DAEE - *Observações sobre o barramento do canal do Valo Grande - Reflexos na ecologia da região lagunar de Iguape-Cananéia.* Relatório, São Paulo, 1980.

FIGURA 1 - PLANTA DE SITUAÇÃO DO COMPLEXO ESTUARINO LAGUNAR DE IGUAPE - CANANÉIA