O NÍVEL MÉDIO DO MAR: UMA REALIDADE FÍSICA OU UM CRITÉRIO DE ENGENHARIA?

CLAUDIO F. NEVES
Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica – COPPE / UFRJ; Doutor em Engenharia Oceanográfica Costeira;
neves@peno.coppe.ufrj.br

RESUMO

O monitoramento permanente das marés para fins de navegação levou à constatação da existência de flutuações do nível médio do mar. O artigo discute os possíveis entendimentos que se pode ter sobre este conceito e sugere que o "nível médio do mar" seja obtido por meio de filtragens (no domínio do tempo ou da freqüência) dos registros maregráficos, quando o usuário estabelece o período de oscilações a serem filtradas. São apresentados exemplos de medições no Brasil e nos Estados Unidos em longo prazo e são evidenciadas as causas meteorológicas para flutuações do nível do mar em escalas intra-anual (sazonal) e interanual (decenal). O artigo finaliza propondo a curva de permanência do nível médio do mar como um critério de engenharia.

PALAVRAS-CHAVE: maré, nível médio do mar, engenharia costeira, gerenciamento costeiro.

1 – INTRODUÇÂO

A idéia de um nível do mar estático ou imutável esteve presente na consciência das pessoas, técnicas ou não, até as três últimas décadas do século XX. Os mitos cósmicos de várias sociedades e culturas colocam o mar ou a terra em posições fixas, exceto em eventos importantes associados a alguma transgressão moral de grandes proporções, quando o mar invade a terra para expurgar o mal e reiniciar uma nova vida.

As oscilações do nível do mar são também atribuídas a eventos mitológicos ou são observadas sistematicamente, como faziam os chineses desde milênios ou, em nossa cultura, os navegadores europeus. A associação entre as oscilações periódicas das marés e as fases da Lua, bem como a relação causal entre os dois fenômenos, torna-se evidente para a cultura científica européia. Galileu (1564-1642) atribuiu a maré aos movimentos da Terra, Descartes (1596-1650) supôs a existência de uma matéria invisível que pressionava o mar e Kepler (1571-1630) afirmava que "Se a Terra cessasse de atrair suas águas, toda a água do mar se elevaria e fluiria para a Lua". Newton (1642-1727), com seu princípio da gravitação, desvela a possibilidade de ações à distância, e em 1687 explica os ciclos de maré através da atração do Sol e da Lua, o que é conhecido como a Teoria Estática das Marés. Laplace (1749-1827) reúne seus conhecimentos de astronomia à mecânica dos fluidos e cria sua Teoria Dinâmica das Marés, relacionando o nível do mar com a declinação da Lua e movimento dos astros; a maré seria então uma onda forçada e o nível do mar pode ser explicado pela superposição linear de vários harmônicos.

A previsão de marés desenvolve-se no século XX, tornando-se tão precisa quanto um mecanismo de relojoaria. Essas oscilações, porém, ocorriam em torno de um nível médio, estático, determinável empiricamente a partir da instalação de marégrafos durante um prazo podia variar desde alguns anos até duas décadas. Esse conceito está implícito em várias ações da sociedade ao ocupar a zona costeira, na legislação brasileira ao estabelecer os "terrenos de marinha", que remonta a princípios de direito ibéricos e romanos, ou na implantação de referências geodésicas para *datum* vertical. No caso brasileiro, o *datum* Imbituba é estabelecido pelo IBGE a partir de observações feitas durante nove anos pelo US Geodetic Survey na década de 50.

A construção do canal do Panamá evidencia um fato curioso: os níveis dos dois oceanos não eram os mesmos. Seria o nível médio uma característica fixa para cada oceano? Ou mar? Ou uma pequena reentrância costeira?

As obras de engenharia civil em regiões costeiras, especialmente de saneamento, exigem a medição de nível do mar. A tradição holandesa para recuperação de áreas litorâneas é o exemplo maior que se pode citar. A cidade de Paraty era periodicamente lavada pelas águas da maré alta. O engenheiro Saturnino de Britto instala um marégrafo em Atafona, quando projeta os sistemas de diques e canais de drenagem para a baixada campista, no Norte fluminense. Infelizmente, a urbanização moderna de muitas áreas costeiras não levou em conta tais considerações.

A notícia de que o nível do mar estava se elevando – e o que é pior, a uma taxa que poderia se acelerar no futuro – aparece na década de 70-80 como um evento que punha por terra uma percepção imobilista do nível do mar. Poucos lugares do mundo dispunham de séries confiáveis e suficientemente longas de registros maregráficos, que permitissem uma análise científica sólida e uma previsão confiável. Sem dúvida incentivadas pelos holandeses, as investigações sobre o nível médio do mar passaram a ocupar lugar de destaque no cenário científico de engenharia costeira ao longo dos anos 80-90.

As conseqüências dessa elevação do nível médio do mar eram múltiplas: erosão costeira, intrusão salina em aqüíferos e estuários, inundações de regiões litorâneas, comprometimento das redes de drenagem e de saneamento. Espalham-se marégrafos por todo o planeta, e uma descoberta inquietante é a de que, em determinados locais, o nível médio do mar estava abaixando, como conseqüência da expansão mecânica das rochas, aliviadas da carga de espessas camadas de gelo após o fim da última era glacial. A observação dos oceanos por satélite, iniciadas pelo Seasat, traz novas descobertas e o início da topografia da superfície do mar

por sensoriamento remoto mostra claramente grandes variações em escalas de centenas de quilômetros: o nível médio dos mares não é estático nem uniforme. Começa a era das incertezas em relação ao assunto.

De um lado situa-se um grupo interessado nas variações seculares do nível médio do mar, especialmente associadas ao efeito estufa – com suas implicações sócio-econômicas evidentes. Por exemplo, as inundações de planícies costeiras na China ou em Bangladesh trariam impactos sociais muito graves. De outro lado, onde prefiro me colocar, situam-se aqueles interessados nas variações relativas do nível médio do mar na escala de décadas, posto que é inútil ficar parado discutindo se existe subsidência continental ou elevação e deixar de observar o nível do mar – especialmente em locais como o Brasil onde são poucas as informações maregráficas de qualidade, com controle geodésico.

O conceito de média torna-se agora importante. Seria a média aritmética das medições horárias de nível do mar? Ou seria a média mensal, acompanhada ao longo de vários anos? Talvez uma estatística de valores médios diários? Qual a informação necessária e útil para os tomadores de decisão sobre o gerenciamento de zonas costeiras? Como os engenheiros utilizariam ou utilizarão a informação sobre o nível do mar: o valor máximo, o mínimo, o médio?

Análises de registros maregráficos coletados na Ilha Fiscal pela Diretoria de Hidrografia e Navegação, no porto de Imbetiba e na praia de Copacabana pela Fundação IBGE, na enseada de Piraquara por Furnas Centrais Elétricas e pela Eletronuclear, no porto do Forno, enseada dos Anjos, pelo Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira, e em Cananéia, pelo Instituto Oceanográfico da USP, indicam a ocorrência de várias oscilações do nível do mar, associadas quase certamente a eventos meteorológicos e oceanográficos de mesoescala. Essas variações na costa sudeste brasileira têm períodos que podem variar desde cinco dias até seis meses e apresentam tendências ou oscilações decenais. Por que então não se define uma estatística de variação do nível médio do mar e incorpora-se essa componente probabilística aos projetos de engenharia costeira e portuária? Responder a essa pergunta é o objeto do presente artigo, bem como indicar os esforços que se estão fazendo para prever a variabilidade do nível do mar (excluída a maré astronômica, muito bem prevista por programas de computador, como o PACMARE de Franco, o sistema da Comissão Oceanográfica Internacional [COI] e outros disponíveis na *web*).

2 – MEDIÇÔES, ANÁLISE E PREVISÕES DE MARÈ

As medições de maré no Brasil foram preferencialmente motivadas pela navegação e confecção de cartas náuticas ou levantamentos batimétricos, seguindo-se de usos para o projeto de obras civis marítimas e, em menor escala, para fins de obras de saneamento geral de baixadas litorâneas. A Tabela 1, obtida a partir de informações contidas no Banco Nacional de Dados Oceanográficos da Diretoria de Hidrografia e Navegação, confirma que quase 40% das observações foram coletadas há mais de 30 anos e 65% das campanhas tiveram duração igual ou inferior a 40 dias.

TABELA 1 – Caracterização das campanhas de medição maregráfica no Brasil

Há quantos anos?	Duração (dias)						Totais
	< 20	20 - 40	40 - 90	90 - 240	240 - 400	> 400	
menos de 5	0	9	1	0	1	0	**11**
5 a 15	1	17	8	1	5	2	**34**
15 a 20	0	17	5	3	7	1	**33**
20 a 25	5	26	0	5	7	3	**46**
25 a 30	4	34	1	0	0	0	**39**
mais de 30	9	68	0	0	20	1	**98**
Totais	**19**	**171**	**15**	**9**	**40**	**7**	**261**

Fonte: SALLES, F. J. P.; BENTES, F. C. M.; SANTOS, J. A. *Catálogo de Estações Maregráficas.* FEMAR, 2000.

A análise de dados maregráficos foi iniciada por J. Lubock, que fez as primeiras previsões para quatro portos ingleses em 1833. Porém, foi Lord Kelvin que, através do método de decomposição harmônica, desenvolveu a primeira máquina de previsão de marés, que foi utilizada em vários países, inclusive no Brasil, onde hoje se encontra no Observatório Nacional (Figura 1).

J. C. Adams (1819-1892) e G. H. Darwin (1845-1912) propõem o desenvolvimento quase harmônico do potencial gerador de marés em funções trigonométricas do tempo (1883). Entretanto, foi A. T. Doodson (1890-1968) que, em 1921, propôs o primeiro desenvolvimento verdadeiramente harmônico do potencial gerador.

O tema das variações do nível do mar continua fascinando pesquisadores, pois o desenvolvimento harmônico não é capaz de explicar completamente o fenômeno observado, além de trazer um vínculo com a mecânica celeste, tema há muitos séculos motivador de vários desenvolvimentos matemáticos e científicos.

R. A. Harris (1863-1918) e S. S. Hough (1870-1923) estudam a ressonância das bacias oceânicas e H. Poincaré (1854-1912) propõe soluções analíticas para oceanos separados por continentes.

No Brasil, Alberto dos Santos Franco, considerado o patrono da análise de marés e da aplicação das técnicas espectrais ao estudo de ondas e marés, na década de 40 elabora uma previsão harmônica com nove componentes. P. Schureman (1957) aprimorou o método de Doodson, mas seria o trabalho pioneiro de W. H. Munk e D. E. Cartwright (1966) que definitivamente estabeleceria um marco no estudo da análise e da previsão de marés.

O método utilizado atualmente pela Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil para fazer a previsão de marés foi inicialmente desenvolvido por Franco [1], que continuou a atualizar continuamente o algoritmo de modo a já poder efetuar análises de 19 anos ou mais. Esse sistema pode ser executado em PC (Sistema PACMARÉ), compondo-se de vários módulos, a saber:

- Análise harmônica
  - de elevações (ANAHAMA)
  - de correntes (ANHACOR)
- Análise cruzada (ANACRUZ)
- Previsão de extremos
- Previsão de níveis horários
- Edição de constantes harmônicas (HARM)
- Determinação do nível médio do mar (NIMED)
- Análise refinada (ANHAREF)
- Análise de séries extremamente longas (LONGSERIE)
- Verificação de dados (VERALT)
- Geração de tabela para componentes de águas rasas (AGRASA)

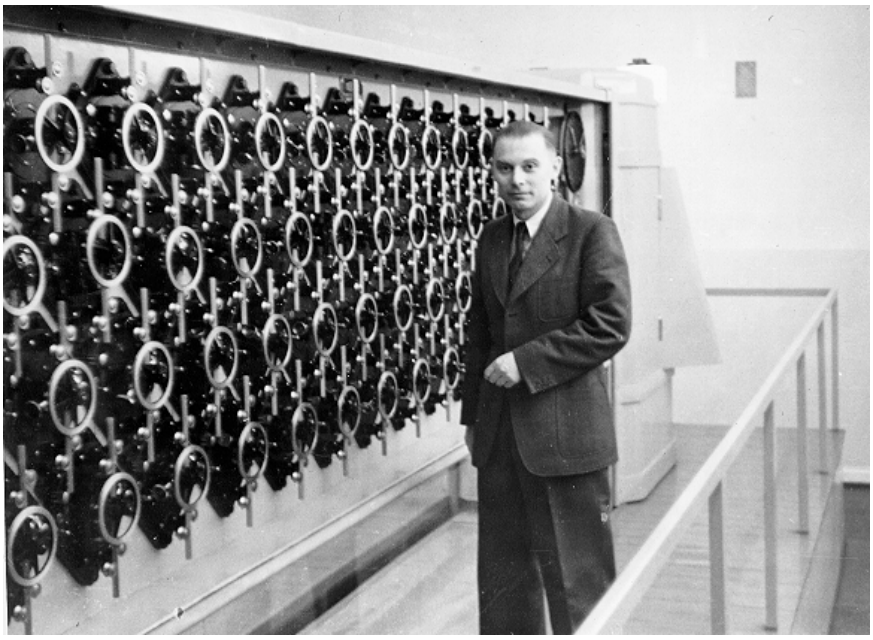

FIGURA 1 – Máquina de previsão de marés (Observatório Nacional)

3 – VARIAÇÕES DO NÍVEL DO MAR

3.1 – Variações sazonais

Observações efetuadas ao longo de 20 ou mais anos permitem várias interpretações e avaliações. Por exemplo, no caso de longas séries temporais, quando se tomam as médias aritméticas do nível do mar para cada mês do ano e a seguir calcula-se a média mensal desses valores médios ao longo os diversos anos, identifica-se nítida variação do "nível médio do mar". A Figura 2 mostra o resultado deste tipo de análise para a estação de Cananéia, mantida pelo Instituto Oceanográfico da USP, em que se pode ver a diferença de aproximadamente 10 cm entre o nível médio do mar nos meses de abril e de setembro, podendo atingir até 35 cm em outras localidades. Essa sazonalidade associa-se às diferenças climáticas resultante de sistemas meteorológicos (vento, pressão atmosférica) atuando sobre a superfície do mar.

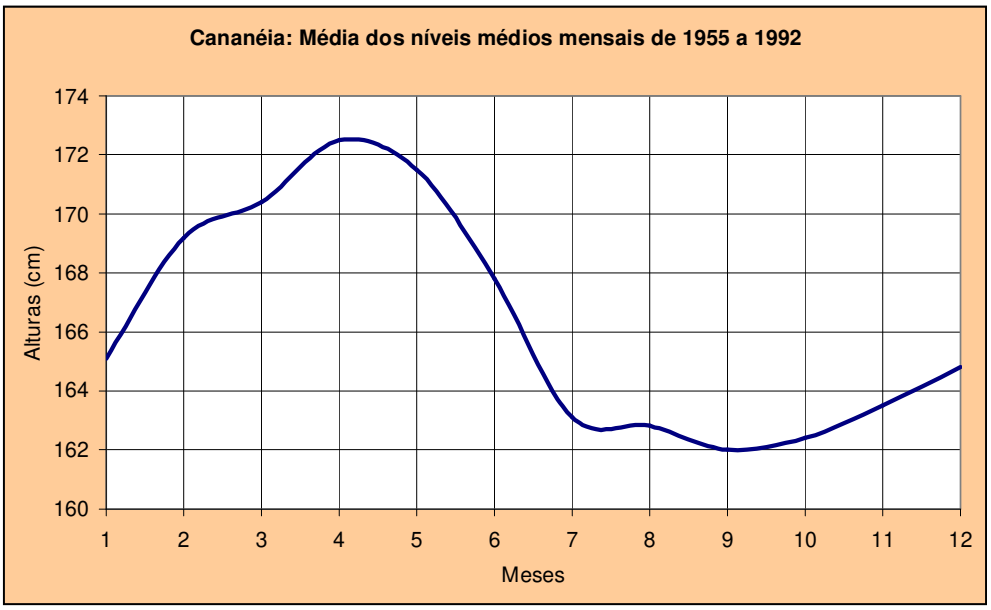

FIGURA 2 – Nível médio mensal do mar em Cananéia (Fonte: A. S. Franco, A. R. Mesquita e J. Harari, IOUSP, comunicação pessoal).

Essa associação com a meteorologia traz então um grau de incerteza à previsão do nível do mar, cunhando-se os termos "maré astronômica" e "maré meteorológica" para fazer distinção entre uma parcela previsível (associada aos movimentos do sistema Terra-Lua-Sol) e uma parcela estocástica (associada aos efeitos da interação oceano-atmosfera).

3.2 – Variações anuais

Ao se considerarem valores médios mensais para o nível do mar ao longo dos anos, ou valores médios anuais, igualmente se verificam oscilações. Existem aqui, mescladas, tanto as componentes resultantes de mudanças na órbita do planeta e outros ciclos astronômicos de longo prazo, quanto as flutuações climáticas interanuais, e, por esse motivo, isolar os dois fenômenos não é tarefa fácil. A Figura 3 mostra a curva de nível médio mensal para o porto de Santos ao longo de 17 anos. Nesse intervalo de tempo, não se pode identificar qualquer tendência de elevação ou rebaixamento do nível médio do mar. Ao se registrarem os valores médios mensais ao longo de um intervalo de tempo maior, como no caso da Ilha Fiscal, na baía de Guanabara (Figura 4), é evidente que os ciclos anuais se manifestam, e suas causas ainda não são completamente explicadas.

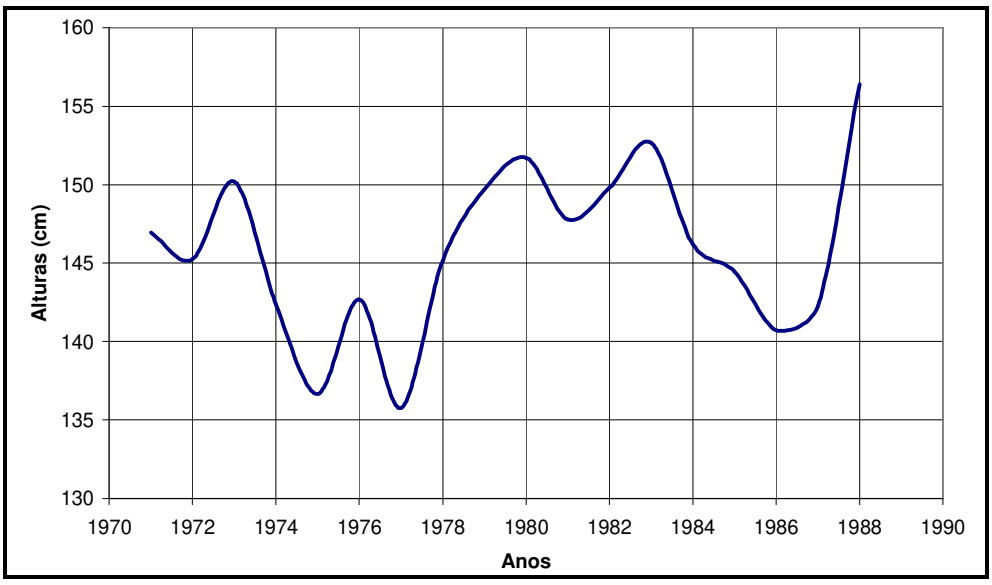

FIGURA 3 – Nível médio mensal do mar em Santos. Fonte: A. S. Franco, A. R. Mesquita e J. Harari, IOUSP, comunicação pessoal)

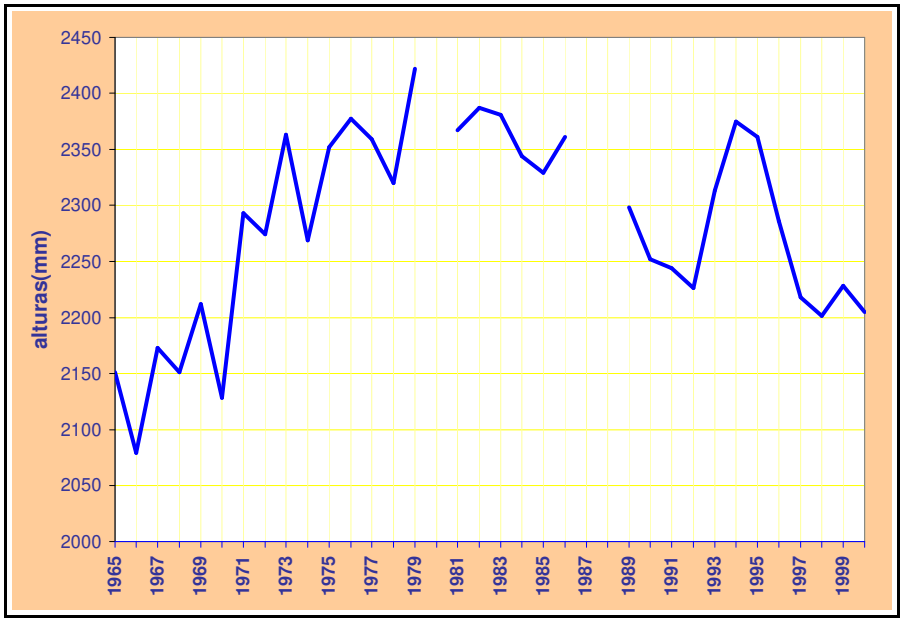

FIGURA 4 – Nível médio anual do mar na Ilha Fiscal (Fonte: Silva [7] e G. N. Silva, DHN, comunicação pessoal)

3.3 – Variações e tendências de longo prazo

Pirazzoli [6] estudou as variações de longo prazo em marégrafos localizados em todo o mundo, cujos dados estavam disponíveis no Permanent Mean Sea Level Institute, em Londres. Uma das conclusões importantes de seu trabalho foi a constatação da presença consistente de periodicidades em torno de 20 anos, o que torna inviável obter tendências de longo prazo a partir de séries temporais com duração inferior a 50 anos. De fato, a Figura 5 ilustra as semelhanças e as diferenças entre as séries de níveis médios mensais obtidos a partir de registros maregráficos filtrados (ou seja, a maré astronômica foi retirada de todas as séries temporais) nos portos de Santos e Cananéia (São Paulo, Brasil) e Charleston (Carolina do Sul, EUA). Neste, de 1920 a 2000 há uma variação de aproximadamente 30 cm, obtendo-se uma taxa de elevação igual a $8{,}86^{*}\ 10^{-4}$ cm/dia ou 32 cm /século.

No estudo de Pirazzoli, contudo, há locais onde o nível do mar está descendo em relação ao continente, como mostra a Figura 6. Em portos do Alasca, a taxa de rebaixamento do nível do mar atinge 60 cm em 50 anos, por efeito da expansão mecânica das rochas após o degelo que se seguiu à última Era Glacial. Fenômeno semelhante é observado em pontos da costa da Noruega.

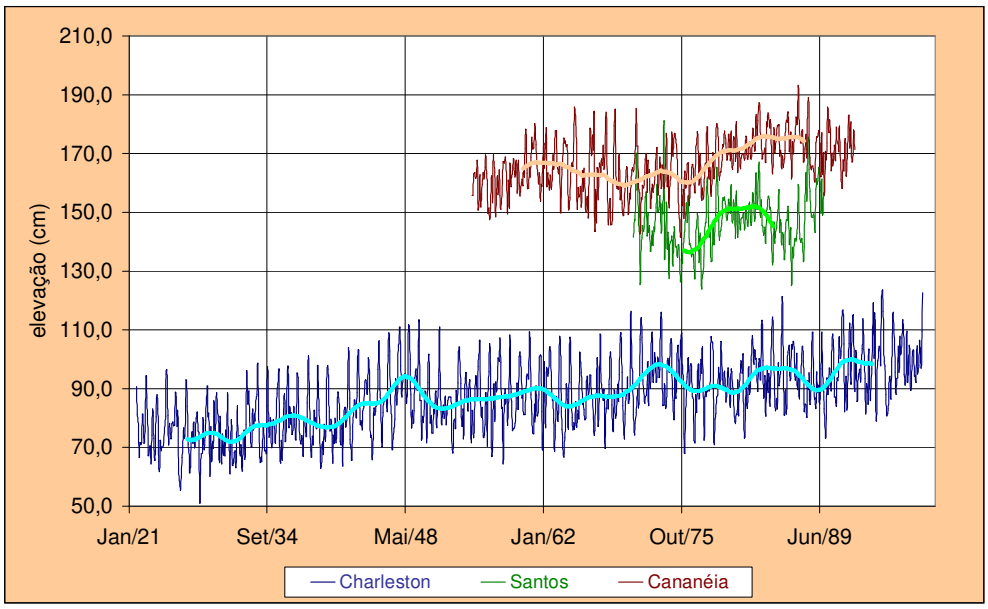

FIGURA 5 – Nível médio mensal do mar em Cananéia, Santos e Charleston (USA) (Fonte: B. Kjerve, A. S. Franco, A. R. Mesquita e J. Harari, comunicação pessoal)

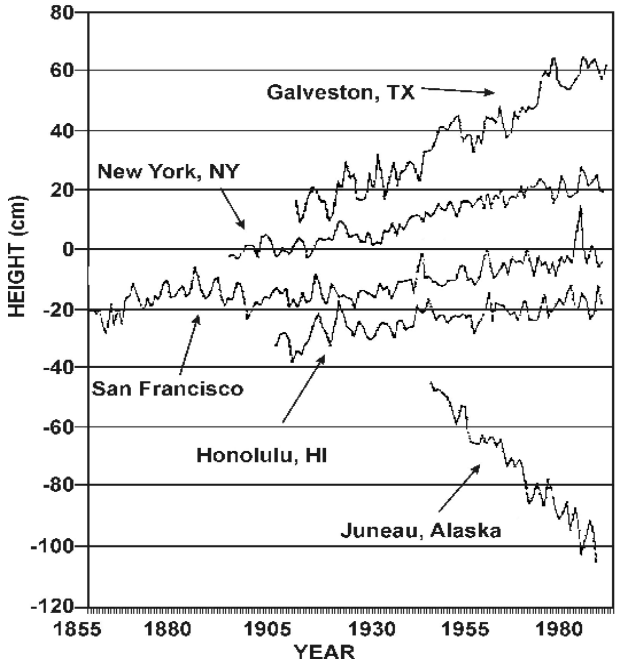

FIGURA 6 – Variações do nível médio do mar em pontos selecionados da América do Norte (Fonte: Pirazolli [6])

4 – DESAFIOS PARA A MEDIÇÃO DE LONGO PRAZO

A medição maregráfica de longo prazo, que tem como objetivo caracterizar as variações de nível médio do mar, é fundamentalmente distinta da medição que tem por objetivo o apoio à navegação nos portos. Em primeiro lugar, é uma atividade em *rede*, e essa palavra deve ser entendida de modo muito abrangente. Deve existir uma *rede de equipamentos* que dê suporte ao marégrafo principal, posto que, no caso de interrupção de operação, um marégrafo secundário em local adequadamente próximo (por exemplo, até 100 km de distância) poderia fornecer informações sobre o nível médio, que por sua vez poderiam ser correlacionadas ao nível do mar na estação principal. Deve existir uma *rede de instituições*, posto que não se trata apenas de instalar um marégrafo, mas de manter permanentemente sua operação, a análise dos dados, a divulgação das informações e o controle geodésico. Como as instituições e a tecnologia evoluem no tempo, as tarefas isoladas podem ser transferidas para outros agentes, sem prejuízo do monitoramento de longo prazo. Deve haver uma *rede de informações* que contemple o processamento de dados, a divulgação de informações e o interesse dos usuários, bem como a comunicação interna entre os membros envolvidos na medição.

Em segundo lugar, a distribuição de tarefas e a identificação das responsabilidades é ponto essencial para se quantificar os custos de operação da rede. Uma das tarefas que não pode ser esquecida é a de avaliar internamente o monitoramento: todos os parceiros da rede estão cumprindo suas tarefas? As informações estão chegando aos usuários no tempo esperado? Os dados estão sendo medidos, analisados e interpretados corretamente? Portanto, a avaliação deve ser incorporada como mais uma tarefa, de modo a garantir a confiabilidade dos dados ao longo dos anos. Outra tarefa que é negligenciada no caso da operação maregráfica de curta duração é o controle geodésico. No caso da medição de longo prazo, é indispensável estabelecer pelo menos três pontos de amarração geodésica (nos Estados Unidos a NOAA recomenda seis pontos), cujo controle com a rede de nivelamento referenciada ao *datum* de Imbituba deve ser feito idealmente a cada cinco anos, além de controle topográfico local a cada ano, para identificar eventuais recalques ou mudanças de posição do marco geodésico (e.g., influência de raízes de árvores).

Em terceiro lugar, é preciso que os usos da informação maregráfica de longo prazo sejam claros e que os usuários sejam identificados. Somente assim consegue-se manter uma operação de geração a geração. O efeito estufa com certeza está despertando o interesse da população, devido a uma divulgação excessivamente "catastrofista" na mídia. Seria desejável que os planejadores de redes de drenagem e de saneamento, os planejadores urbanos e os projetistas de obras costeiras, cujas obras com certeza durarão séculos, levassem em conta as informações já disponíveis, estabelecessem cotas de segurança ou incluíssem coeficientes de segurança que contemplassem variações de longo prazo do nível do mar. O porto de Suape, por exemplo, no projeto de sua obra de expansão, incluiu a taxa de elevação do nível médio do mar (25 cm/século) no estabelecimento da cota de coroamento do cais.

Em quarto lugar, é preciso ter em mente que o fenômeno observado – variação do nível médio do mar – ocorre em escalas espaciais muito grandes e em escalas temporais muito longas. Mesmo as flutuações de nível

médio associadas a eventos meteorológicos ocorrem ao longo de 3 a 5 dias e os sistemas meteorológicos que atuam (ciclones) possuem dimensões de poucas centenas de quilômetros. De fato, comparações entre o nível médio do mar observado em Macaé, Arraial do Cabo, Rio de Janeiro (Ilha Fiscal e praia de Copacabana) e Angra dos Reis (Piraquara) mostraram grande coerência entre si (Kalil [3]). A seleção dos pontos de medição deve ser muito criteriosa, no sentido de escolher locais onde se tenha garantia de operação de marégrafos ao longo dos anos (ou seja, que o local não seja sujeito à erosão ou vulnerável à expansão urbana), pois um marégrafo permanente não é como uma escultura que pode transferida de praça a cada novo prefeito que é eleito.

Em quinto lugar, três qualidades são necessárias por parte dos integrantes da rede maregráfica de longo prazo: flexibilidade, criatividade e inovação. As regras de funcionamento estabelecidas precisam ser claras e bem-compreendidas, mas não podem ser rígidas, pois o tempo e as circunstâncias variam. As decisões por consenso mostram-se bem mais adaptáveis ao longo do tempo do que aquelas tomadas por "votação democrática" ou imposição arbitrária, posto que se trata de assunto técnico de interesse da sociedade. Sem criatividade para resolver problemas que se colocam ao longo dos anos na operação de uma rede, dificilmente se consegue manter uma organização complexa, com vários atores e com recursos geralmente limitados. A inovação tecnológica seria uma combinação dessas duas qualidades com a atualização necessária. Por exemplo, um problema corrente na operação maregráfica é a deterioração das réguas, fabricadas em madeira ou em alumínio, e a sua fixação e posicionamento em caso de substituição; um modelo em PVC que desliza em trilho foi construído para a Rede Maregráfica Fluminense, a partir de uma idéia inovadora apresentada pelo IBGE.

Como conclusão, deve ser enfatizado que a manutenção de qualquer programa de monitoramento ambiental só é sustentável se houver verdadeiro comprometimento e preocupação de diversos agentes da sociedade e a compreensão de que o interesse pela manutenção de um ponto de observação isolado dificilmente sobrevive ao tempo. Ou seja, é uma questão de *educação*.

5 – REDES MAREGRÁFICAS

5.1 – Marégrafos nos portos e Rede PORTOBRAS

A medição maregráfica no Brasil iniciou como atividade de apoio à navegação nos portos. Através do Departamento Nacional de Portos e Vias Navegáveis (DNPVN) e da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), foram instalados marégrafos, que fornecem informações sobre amplitude de marés, previsão de níveis máximos e mínimos e estabelecimento de cotas de referência. Cada marégrafo é isolado dos demais e os valores fornecidos de nível do mar não são referidos a um *datum* vertical nacional. Com a criação da Portobras, o Instituto de Pesquisas Hidroviárias (INPH) ficou responsável pela instalação e manutenção de todos os equipamentos instalados nos portos.

Existem então pelo menos três referências de nível nas regiões costeiras: o *datum* Imbituba (IBGE) para as obras civis em terra, o *datum* da carta náutica da DHN para o relevo do fundo e o *datum* Portobras para o porto e obras de engenharia costeira. Não é difícil de concluir-se que se estabelece a grande confusão de informações e ocorre perda de tempo na conversão de valores. Somente em 1990, por um convênio entre o IBGE e a Portobras, as cotas das réguas dos marégrafos de alguns portos selecionados foram referidas ao *datum* Imbituba; com a extinção da empresa por decreto presidencial, o INPH também cessou de manter os marégrafos e a medição permanente de nível do mar foi interrompida em toda a costa brasileira.

5.2 – Rede do IAGS e Rede Maregráfica Permanente para Geodésia (RMPG)

No início dos anos 50, o IAGS implantou marégrafos em Belém, Salinópolis, Fortaleza, Recife, Salvador, Canavieiras (BA), Rio de Janeiro (Fortaleza de Santa Cruz) e Imbituba (SC) (Figura 7), que tinham como propósito caracterizar as flutuações do nível do mar no Atlântico Sul de acordo com rígidos critérios de controle de operação. Como resultado dessas ações, foi instituído o *Datum* Altimétrico Brasileiro como o nível médio do mar em Imbituba entre os anos de 1949 e 1957. A Figura 8 apresenta médias móveis de nove anos para todas as estações do IAGS. Olhando em retrospectiva, é interessante observar que, em Imbituba, as variações foram da ordem de 15 mm no período de 1949 a 1969. Por outro lado, os dados da Fortaleza de Santa Cruz, localizada na embocadura da baía de Guanabara, indicam a partir de 1960 uma elevação de 50 mm, o que em termos geodésicos é exagerado; tal observação é coerente com os resultados apresentados por Silva [7] na Ilha Fiscal, localizada no interior da baía de Guanabara, mostrados na Figura 4.

O IBGE, como instituição formalmente responsável pelas atividades geodésicas no Brasil, mantém as redes que compõem o Sistema Geodésico Brasileiro, incluindo rede de marcos, serviço de levantamentos, sistemas de análise e banco de dados e sistemas de controle geométrico, com benefícios para mapeamento do território, obras de engenharia e desenvolvimento científico.

Historicamente, até a década de 90 o IBGE era usuário de informações maregráficas coletadas por outras instituições, e em 1993-1994 começou a operar em conjunto com a COPPE/UFRJ e com a Petrobrás, os

marégrafos de Copacabana (posto 6) e Imbetiba, respectivamente. Este era o início do que vem a ser atualmente a Rede Maregráfica Permanente para Geodésia (RMPG) com estações operacionais em Imbituba (SC), Imbetiba (RJ), Salvador (BA), Fortaleza (CE) e Santana (AP).

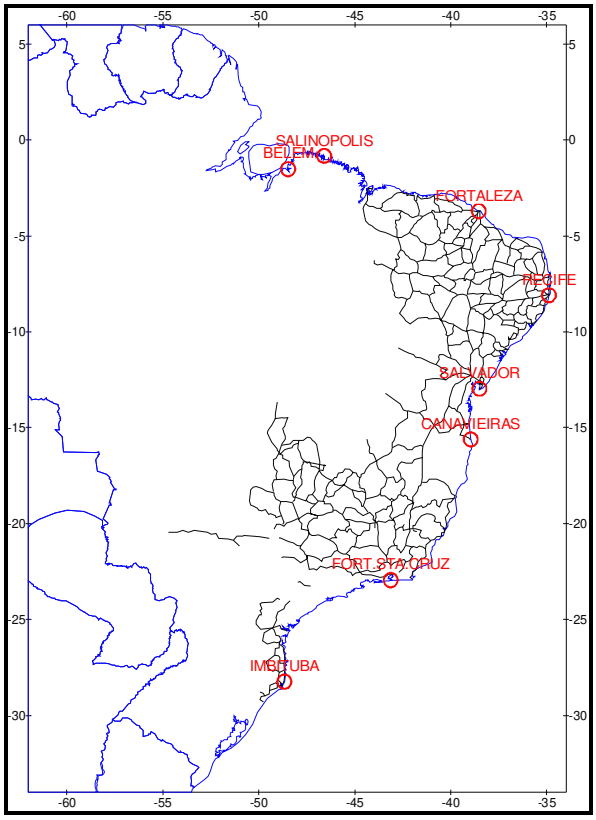

FIGURA 7 – Localização das estações maregráficas instaladas pelo IAGS (Belém, Salinópolis, Fortaleza, Recife, Salvador, Canavieiras, Rio de Janeiro e Imbituba) e distribuição de rede altimétrica.
(Fonte: R. T. Luz, IBGE, comunicação pessoal)

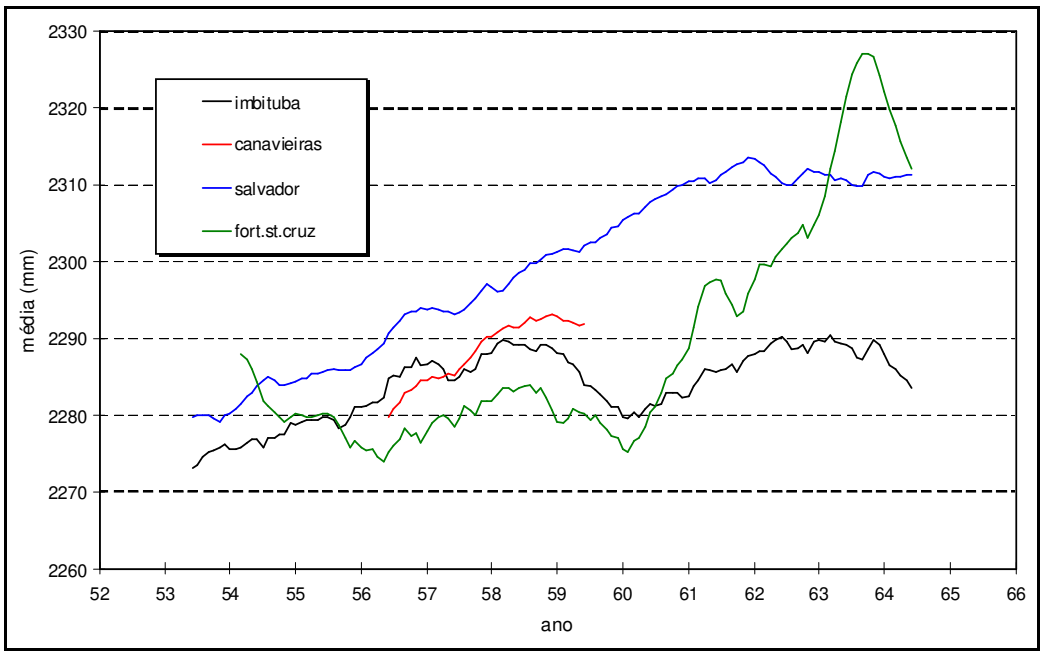

FIGURA 8 – Variação do nível médio anual do mar nas estações do IAGS.
(Fonte: R. T. Luz, IBGE, comunicação pessoal)

5.2 – Rede Maregráfica Fluminense (RMFlu)

Esta rede foi iniciada em 1995, com as discussões do Grupo de Trabalho sobre Nível do Mar, na Sociedade Brasileira de Cartografia, que propôs a realização de um projeto-piloto antes que se lançasse a proposta de uma Rede Maregráfica Brasileira. Dessa forma poderiam ser identificadas as dificuldades de operação de uma rede maregráfica, que pressupõe a divisão de responsabilidades, tarefas e encargos financeiros. A experiência tem sido bem-sucedida: desde 1996 os primeiros marégrafos estão funcionando, e a conclusão a que se chegou é que a dificuldade reside mais em aspectos humanos do que de equipamentos; existem recursos para se adquirir um marégrafo e iniciar sua operação, mas não há força de trabalho para transformar o dado bruto em informação, os usuários não estão presentes e, como conseqüência a operação do equipamento se deteriora.

Atualmente o monitoramento maregráfico continua sendo feito de forma cooperativa entre as seguintes instituições: COPPE/UFRJ, Fundação IBGE, Petrobrás, Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), Centro Hidrográfico da Marinha (CHM), Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM), Eletronuclear S. A., com apoio eventual da Sociedade Brasileira de Cartografia. A experiência tem sido estimuladora para que grupos cooperativos se formem em outros estados, envolvendo sempre alguma instituição acadêmica, órgão vinculado à Marinha (por exemplo, Capitania dos Portos), agência do IBGE e usuários diretos da informação maregráfica.

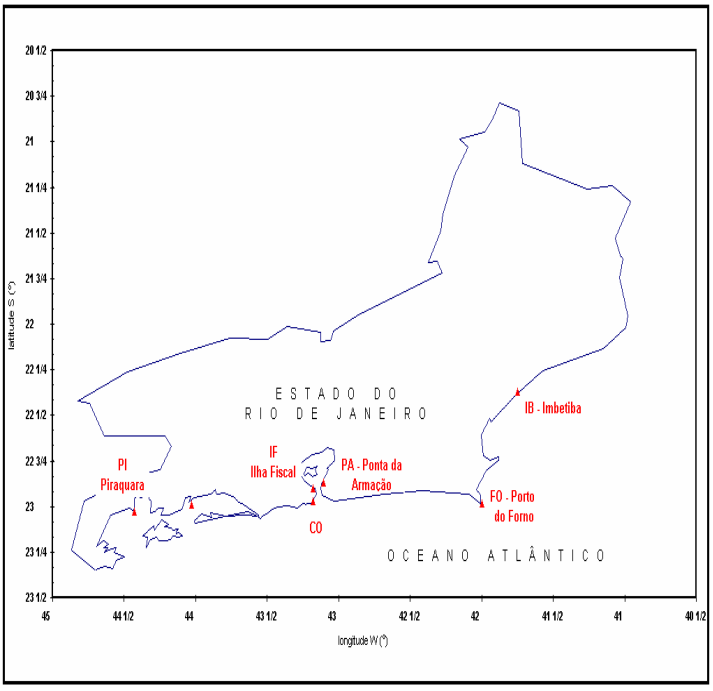

FIGURA 9 – Estações que compõem a Rede Maregráfica Fluminense (Imbetiba, Porto do Forno, Ponta da Armação, Ilha Fiscal e Piraquara)

Ações IBGE:

- Nivelamento geométrico entre Angra dos Reis, Rio de Janeiro, Niterói, Arraial do Cabo e Macaé
- Instalação de três marégrafos em Imbetiba: convencional, Digilevel, pressão
- Novo formato de tubulão (terminação em cone de PVC, orifício no vértice do cone)
- Régua de PVC com marcação em resina, posicionada em trilho, de fácil remoção para limpeza
- Digitalização dos registros em 10 minutos, uso de *scanner*
- Apoio da Petrobras (Macaé) para operação

Ações Diretoria de Hidrografia e Navegação e Centro Hidrográfico da Marinha

- Operação do marégrafo na Ilha Fiscal
- Instalações para testes com diferentes tipos de marégrafos na Ponta da Armação (convencional, Digilevel e outros)
- Imagem de maregramas por *scanner* e digitalização na tela de computador
- Novo formato de ficha caracterizadora de estação
- Recuperação de dados pretéritos da Ilha Fiscal para completar uma série de 1965 a 2001
- Oferta de cursos voltados para maregrafia

Ações Furnas Centrais Elétricas S. A. e Eletronuclear S. A.:

- Montagem da estação maregráfica
- Operação do marégrafo na enseada de Piraquara (Angra dos Reis)
- Manutenção do marégrafo convencional (registro de dois meses)
- Controle periódico do marégrafo
- Supervisão da estação para evitar vandalismo
- Proposta para assumir o controle da estação (Eletronuclear)

Ações IEAPM:

- Realização dos Seminários sobre Ondas e Marés
- Operação de marégrafo convencional (semanal)
- Desenvolvimento de aplicativos para digitalização de maregramas em computador
- Instalação de dois tubulões na estação para intercalibração

Ações COPPE/UFRJ:

- Desenvolvimento do Digilevel
- Sistema para digitalização de maregramas em computador: CAD (para maregramas bimensais) e *scanner* + Surfer (para maregramas diários)
- Estudos teóricos sobre o nível médio do mar: estatística, espectro e comparação entre as estações da RMFlu
- Digitalização, análise e previsão de maré para a estação Piraquara

Ações Sociedade Brasileira de Cartografia (SBC)

- Apoio à divulgação
- Organização de encontros
- Intercâmbio com outras associações
- Fórum para debate técnico

Ações futuras:

- Avaliação do questionário do CHM
- Comparação de resultados entre diferentes tipos de marégrafos
- Atividades para alunos de Iniciação Científica junto ao IBGE, DHN e Eletronuclear
- Instalação de marégrafo na região de Atafona
- Tratamento de dados da Ilha Fiscal (série longa)
- Elaboração de página na Internet
- Digitalização dos dados do Porto do Forno
- Conclusão do nivelamento da RMFlu (travessia da Baía de Guanabara)
- Treinamento para uso do Digiscan (CHM)
- Verificação da tábua de marés de Piraquara
- Estabelecer rotina para verificação de operação do Digilevel e Squitter
- Automatização do sistema de verificação de dados maregráficos
- Participação nas reuniões da SBC

5.3 – Rede GLOSS (Programa "Global Ocean Observing System")

O Programa GOOS, patrocinado pela Comissão Oceanográfica Intergovernamental, órgão vinculado à UNESCO, é a reunião de todas as ações governamentais no âmbito da Organização das Nações Unidas que têm por objetivo o melhor conhecimento dos oceanos.

A Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil, instituição responsável indicada pelo Governo Brasileiro perante a COI, propôs uma rede de sete estações, das quais Cananéia (SP) e Ilha Fiscal (RJ) são as que têm registros mais extensos. No momento, esse programa de ações para a formação da Rede GLOSS está sendo revisto.

6 – O QUE É O NÍVEL MÉDIO DO MAR?

A definição precisa do termo *nível médio do mar* é ponto crucial para o devido entendimento e tomada de decisão.

Em primeiro lugar, é preciso distinguir entre os níveis *absoluto* e *relativo* do mar. Para fins de engenharia, a posição relativa do mar e do continente é a informação mais relevante, pois, mesmo que em termos absolutos o nível do mar estivesse se elevando, caso em dado local o continente estivesse se elevando a uma taxa mais rápida, seria observado um rebaixamento do nível do mar. O contrário também acontece, no caso de regiões deltaicas, onde o adensamento gradual de solos coesivos provoca elevação aparente do nível do mar a taxas muito mais altas que em outros locais.

Em segundo lugar, é preciso caracterizar o período em que se vai estabelecer o valor médio. A rigor, o nível instantâneo que se observa no mar é resultado da superposição de vários fenômenos: componentes astronômicas de maré de longo prazo (período de meses até 19 anos), ondas de plataforma (períodos da ordem de dias a meses), a maré astronômica (período aproximado de 12 horas), eventuais *seiches* (período aproximado de poucas dezenas de minutos a uma hora), ondas curtas de gravidade (período de cinco a 20 segundos) até ondas de capilaridade (da ordem de um segundo). O equipamento registrador de nível do mar filtra as flutuações de períodos mais curtos; alternativamente, sistemas eletrônicos podem filtrar digitalmente flutuações dentro de faixas de freqüências selecionadas. Portanto, é necessário qualificar o período em que se deseja promediar o nível do mar em função da utilização que se tenha.

Em terceiro lugar, é preciso determinar o método de promediação do nível do mar. A média aritmética de 15, 25, 49 ou 73 valores horários não é a forma mais eficiente para se calcular o nível médio, embora utilizada em alguns modelos numéricos, pois introduz oscilações indesejadas, como pode ser visto na Figura 10.

Ao contrário, quando se utiliza o método de filtragem de Thompsom no domínio do tempo (Silva [7], Kalil [3], Uaissone [9]), a curva de resposta de freqüências produz resultados melhores para se estudar a tendência de variação do nível do mar, retirando todas as freqüências abaixo de 36 horas. A Figura 11 apresenta a resposta do filtro que tem sido utilizado na estação Piraquara, da Rede Maregráfica Fluminense, comparando-o com o filtro de Godin, muito utilizado em estudos oceanográficos. As técnicas de filtragem no domínio da freqüência também são muito utilizadas em estudos de oscilações do nível do mar, quando se deseja retirar as componentes da maré astronômica.

Conclui-se, portanto, que o mais adequado seria falar de *nível do mar filtrado*, caracterizado pelas componentes de baixa freqüência.

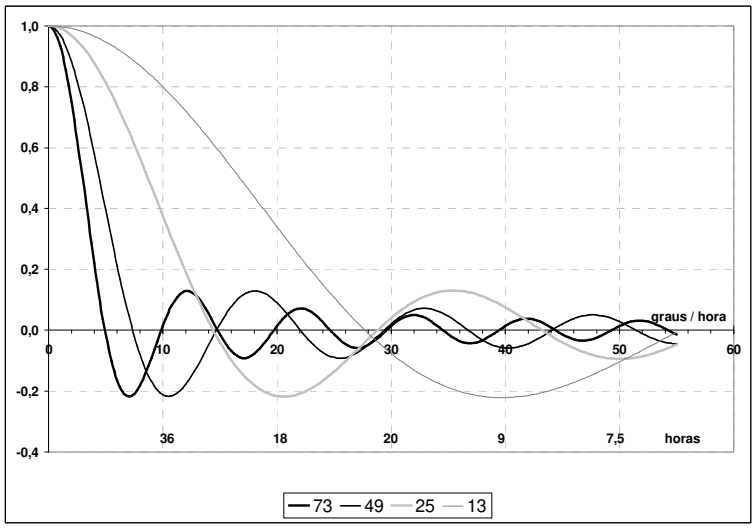

FIGURA 10 – Curvas de resposta para média aritmética de 73, 49, 25 e 13 horas

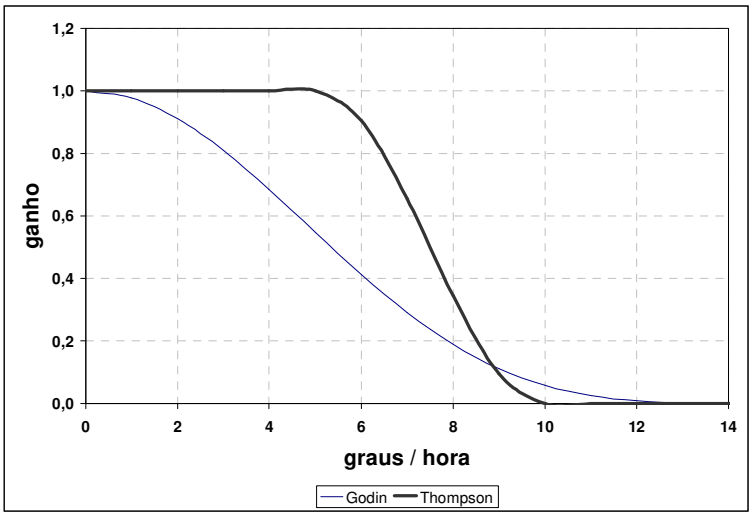

FIGURA 11 – Curva de resposta de freqüência para os filtros passa-baixa de Godin e de Thompsom

As técnicas espectrais para estudar o nível do mar proporcionam a vantagem de se poder caracterizar as diversas escalas de tempo (freqüências de movimento) presentes. A Figura 12 apresenta o registro de nível do mar em Piraquara e o resultado após filtragem (Uaissone [9]). Verifica-se que as oscilações do nível "médio" do mar podem ser tão grandes quanto as da maré astronômica.

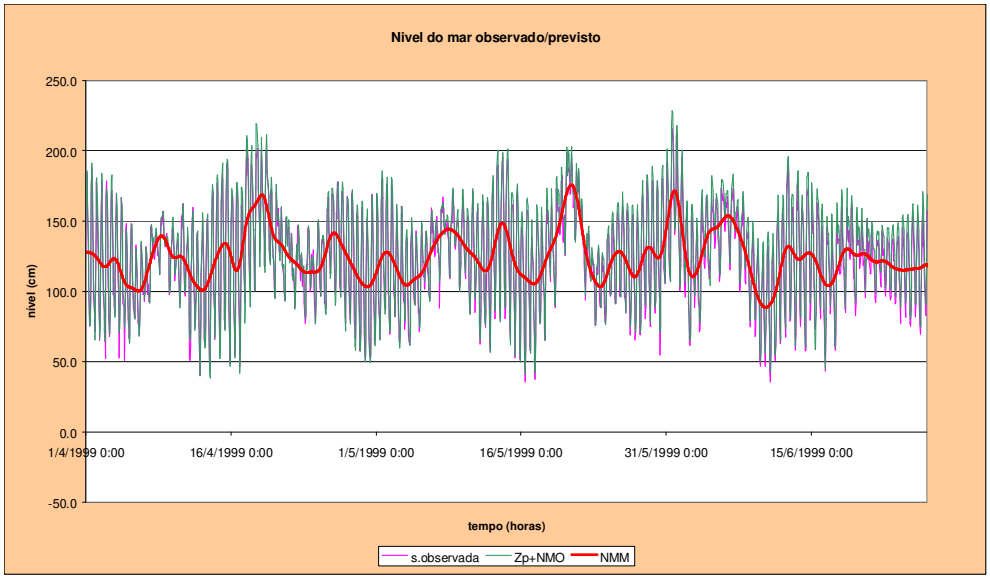

FIGURA 12 – Nível do mar observado, previsto (maré astronômica) e maré meteorológica em Piraquara, RJ, abril a junho de 1999. (Fonte: Uaissone [9])

A causa meteorológica das oscilações mostradas na Figura 12 está bem estabelecida na literatura, conforme revisão bibliográfica apresentada por Uaissone [9]. Para os anos de 1996 e 1999-2000, esse autor estudou as correlações entre o nível do mar em Piraquara e séries de velocidades de vento, pressão atmosférica e temperatura, obtidas a partir de dados de reanálise do NCEP, e encontrou elevados índices de coerência nas freqüências de 21 e 6 dias, como mostra a Figura 13. Esses resultados são encorajadores, pois permitem retirar uma parcela de aleatoriedade do nível médio do mar, posto que, se já existe alguma segurança para a previsão meteorológica, é possível estabelecer certo grau de previsibilidade para a maré meteorológica.

A análise da Figura 12 também permite especular sobre o que aconteceria se uma sondagem fosse feita em períodos de nível médio elevado como ocorrido por volta do dia 20 de maio de 1999 (raciocínio análogo vale para períodos em que o nível médio encontra-se rebaixado). Nesses dias, o nível estava 50 cm acima dos valores nas semanas adjacentes. Na baía de Guanabara, Silva [7] encontrou valores de até 90 cm de elevação do nível médio do mar. Isso evidencia a necessidade de se referenciar o nível do mar a um *datum* único de terra (e.g. *datum* Imbituba), bem como estudar as variações ao longo dos dias, meses e anos, estabelecendo parâmetros estatísticos.

Especificamente, o autor propõe que as *curvas de permanência de nível médio do mar* passem a ser utilizadas, como forma de associar um valor de probabilidade à ocorrência de um dado nível médio, incorporando essa informação ao projeto de engenharia. A Figura 14 apresenta um exemplo para Piraquara.

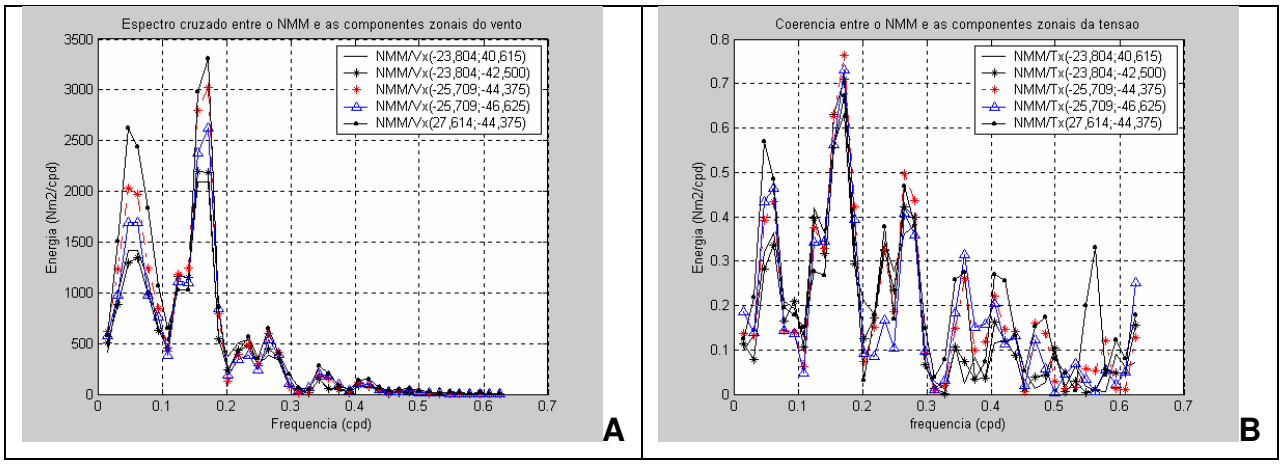

FIGURA 13 – (A) Espectro cruzado entre nível do mar e componente zonal de vento em Piraquara. (B) Coerência entre as mesmas séries temporais. (Fonte: Uaissone [9])

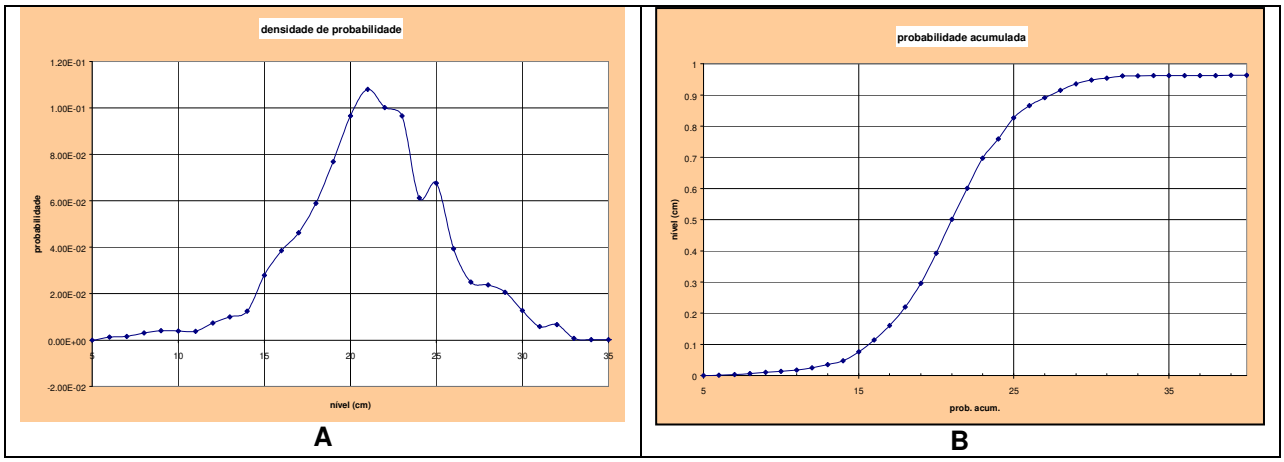

FIGURA 14 – (A) Curva de densidade de probabilidade e (B) de permanência de nível médio do mar em Piraquara (1999-2000). (Fonte: Uaissone [9])

7 – IMPACTOS DA VARIAÇÃO DO NÍVEL MÉDIO DO MAR

Quando se discute hoje em dia a elevação do nível médio do mar, a principal preocupação é, na verdade, a taxa com que essa variação vai ocorrer e se a tendência será linearmente crescente (ou decrescente) no tempo ou acelerada. Essa elevação, reflexo do amento do volume de água nos oceanos, é resultado principalmente da expansão térmica da água do mar e do derretimento das geleiras continentais. Acredita-se que ambos sejam fenômenos lentos, contudo o desprendimento abrupto de grandes blocos de gelo na Antártida tem levado os pesquisadores a considerar a ruptura brusca de geleiras deslizando para o mar como uma matéria de investigação.

Os sinais de elevação do nível médio do mar em escala global são muito frágeis, posto que as perturbações locais de origem tectônica, meteorológica ou oceânica são muito mais fortes. No caso do Brasil, onde há evidências geológicas na Bahia e no Rio Grande do Sul de que o mar já atingiu elevações seis metros mais altas do que o nível atual, a discussão sobre “elevação” do nível do mar sempre ficou mascarada pela escala geológica do fenômeno. O enfoque deste artigo, porém, é outro: procura-se realçar que existem variações de nível marinho em várias escalas temporais, de semanas a um século, cada qual trazendo impactos para ecossistemas costeiros e para as atividades humanas nestes ambientes. Conhecer a exata variabilidade, por meio de registros maregráficos, oceanográficos e meteorológicos permanentes, permitirá à sociedade, aos tomadores de decisão e aos gestores públicos decidir qual a resposta mais adequada de mitigação dos problemas advindos, de adaptação de atividades para os novos cenários, ou simplesmente de abandono de áreas costeiras.

Muehe e Neves [4] elaboraram um diagnóstico de vulnerabilidade a uma variação de um metro do nível do mar ao longo da costa brasileira, subdividida em cinco segmentos (regiões Norte, Nordeste Setentrional, Nordeste, Sudeste e Sul), identificando as morfologias características em cada trecho e os efeitos da elevação do nível do mar. Foram também quantificadas as populações de cada município que compunha uma microrregião costeira, de acordo com a divisão censitária do IBGE em 1980 e 1991, obtendo-se resultados que contrapõem a idéia difundida de que a população brasileira se concentra na região costeira. Nos dois censos, apenas cerca de 20% da população residia de fato nos municípios costeiros; tal paradoxo é facilmente compreendido quando se consideram os estados de São Paulo e Paraná, cuja população em municípios costeiros é inferior a 10% da população estadual.

Ambientes naturais

- Manguezais (Amapá, Pernambuco, Paraná)
- Estuários (Ceará, Bahia Espírito Santo, Rio de Janeiro, Santa Catarina)
- Praias (Projeto Orla – mapa de vulnerabilidade costeira)
- Falésias (Rio Grande do Norte, Paraíba, Bahia, Espírito Santo)

Fenômenos naturais

- Aumento do número e da intensidade de tempestades
- Aumento da altura das ondas (em decorrência das tempestades)

Obras marítimas

- Portos e terminais (Macapá, Itaqui, Cabedelo, Vitória, Angra dos Reis, Paranaguá)
- Esforços de ondas sobre estruturas (proporcionais ao cubo da altura da onda) (Recife, Suape, Ilhéus, Praia Mole, Imbituba, Areia Branca, Sergipe, Pecém)
- Sedimentação em canais de acesso (Fortaleza, Paranaguá, São Francisco do Sul)
- Engordamentos artificiais

Impactos sobre a população

Habitantes / km	**1980**	**1991**
< 1000	3.824 km	3.328 km
1.000 – 5.000	2.683 km	2.867 km
5.000 – 10.000	385 km	512 km
> 10.000	560 km	745 km
Linha de costa total:	7.452 km	7.452 km

Verifica-se que aproximadamente 50% da linha de costa é virtualmente desabitada, enquanto a população concentra-se nas proximidades das grandes capitais litorâneas (Rio de Janeiro e as capitais da Região Nordeste). Espera-se portanto que os principais impactos com reflexos econômicos estejam restritos a tais regiões metropolitanas, onde as estratégias de proteção costeira devem ser mais utilizadas.

8 – CONCLUSÕES

A partir dos estudos apresentados, evidencia-se que o nível do mar é variável ao longo do tempo. Os estudos de engenharia impõem necessariamente algumas escalas de tempo (e.g. período de construção, dimensionamento de forçantes, vida útil da obra, duração do empreendimento) e é razoável supor que o engenheiro escolha em qual escala de tempo irá considerar o fenômeno de variação do nível do mar. Percebe-se assim que uma grandeza física, materializável na natureza, pode ser interpretada estatisticamente em termos de curvas de permanência de nível médio do mar.

Verifica-se também que falar exclusivamente em *elevação* do nível do mar, associado às questões de variabilidade climática, pode ser uma simplificação grave para projetos de engenharia, posto que as oscilações induzidas por fenômenos meteorológicos podem ser de magnitude comparável à maré astronômica local e certamente muito superiores à tendência secular (da ordem de 20 cm / século).

As observações maregráficas de longo prazo exigem um grau de confiabilidade e um controle de qualidade bastante mais severo do que as medições efetuadas para fins hidrográficos. Além disso, como precisam ter duração superior a 50 anos para que se possam extrair tendências de longo prazo, há que se manter registros de operação, informações sobre equipamentos, controle geodésico permanente e análise dos dados à medida que são gerados. Tais observações devem ser apoiadas em redes de equipamentos, pois, caso haja falha de um marégrafo, sempre é possível recuperar a tendência de variação do nível do mar de uma outra estação próxima, desde que ambas estejam sujeitas às mesmas condições oceanográficas. Pela dimensão continental do país, propõe-se que as redes estaduais sejam construídas aos poucos, como forma de se criar, a médio prazo, uma rede em escala nacional. Essas redes podem ter diferentes objetivos (e.g. controle de erosão, geodésia, monitoramento planetário) e por esse motivo sua operação deve ser compartilhada por várias instituições.

Finalmente, há que se fazer a distinção entre dados e informações maregráficas: dados são os registros obtidos e colecionados, às vezes sem tratamento, enquanto que as informações são os mesmos dados após tratamento, análise e divulgação aos usuários. No Brasil já se coletaram muitos dados, porém poucos são utilizáveis para fins de estudar as variações de longo prazo do nível do mar. Considerando a grande extensão costeira ainda parcamente desabitada, seria altamente recomendável que se iniciassem programas de obtenção de informações maregráficas e oceanográficas em geral de interesse para projetos de engenharia costeira. As gerações futuras agradeceriam.

REFERÊNCIAS

1. DEAN, R. G. et al. *Responding to changes in sea level. Engineering implications*. Committee on Engineering Implications of Changes in Relative Mean Sea Level. Washington: National Academy Press, 1987.
2. FRANCO, A. S. *Marés: fundamentos, análise e previsão*. Rio de Janeiro: Diretoria de Hodrografia e Navegação, 2000. (edição em português). São Paulo: Ed. FCTH, 1988 (edição em inglês).

3. KALIL, A. F. D. *Contribuições ao estudo do nível médio do mar no Estado do Rio de Janeiro*. Rio de Janeiro, 1999. Tese (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro. COPPE, Programa de Engenharia Oceânica.

4. MUEHE, D.; NEVES, C. F. The implications of sea-level rise on the Brazilian coast: a preliminary assessment. *Journal of Coastal Research*, SI-14, p. 54-78, 1995.

5. NEVES, C. F.; MUEHE, D. Potential impacts of sea-level rise on the Metropolitan Region of Recife, Brazil. *Journal of Coastal Research*, SI-14, p. 116-131, 1995.

6. PIRAZOLLI, P. A. Secular trends of relative sea-level (RSL) changes indicated by tide-gauge records. *Journal of Coastal Research*, SI-1, p. 1-26, 1986.

7. SILVA, G. N. *Variação do nível médio do mar*: causas, conseqüências e metodologia de análise. Rio de Janeiro, 1992. Tese [Mestrado] –Universidade Federal do Rio de Janeiro; COPPE, Programa de Engenharia Oceânica.

8. SILVA, G. N.; NEVES, C. F. Variação do nível médio do mar na Ilha Fiscal entre 1965 e 1986. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 9. *Anais...* Rio de Janeiro: ABRH, 1991. v. 3, p. 568-577.

9. UAISSONE, A. R. J. *Influência das forçantes atmosféricas em mesoescala sobre o nível médio do mar em Piraquara, RJ*. Rio de Janeiro, 2004. Tese (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro; COPPE, Programa de Engenharia Oceânica.