

APLICAÇÃO DE REDUÇÕES BATIMÉTRICAS GPS EM LEVANTAMENTOS HIDROGRÁFICOS¹

The application of GPS bathymetric tidal reduction in hydrographic surveys

ALEXANDRE MOREIRA RAMOS²
CLÁUDIA PEREIRA KRUEGER¹

¹Universidade Federal do Paraná - UFPR
Setor de Ciências da Terra
Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas - CPGCG, Curitiba - PR
ckrueger@ufpr.br

²Centro de Hidrografia da Marinha – CHM
Superintendência de Segurança da Navegação
Divisão de Levantamentos - Seção de Geodésia, Niterói – RJ
moreira.ramos@chm.mar.mil.br

RESUMO

É cada vez maior a necessidade de integração de dados batimétricos com informações altimétricas em terra. Sob esta ótica são apresentadas soluções para a adoção de um Referencial Vertical Global, estável o suficiente para suplantiar os problemas decorrentes da variação espacial e temporal dos *data* batimétricos. O advento das técnicas e sistemas GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) tem contribuído diretamente neste sentido, apresentando uma melhoria constante das acurácias de suas soluções de posição, abrindo a possibilidade de controle vertical de levantamentos hidrográficos através de métodos GPS de alta precisão. Acompanhando esta tendência mundial, foi realizado um teste de aplicação da metodologia de reduções batimétricas GPS, pela primeira vez no Brasil, na Baía de Guanabara (RJ). São discutidas as principais vantagens do controle vertical por GPS, tais como a eliminação dos erros verticais decorrentes das variações dinâmicas de calado e efeito *heave*, assim como sua aplicação em levantamentos hidrográficos, à luz das recomendações internacionais de qualidade, e a

¹ Uma versão prévia deste trabalho foi apresentada no II Simpósio Brasileiro de Geomática e V Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas.

possibilidade da eliminação das observações maregráficas convencionais durante os levantamentos.

Palavras-chave: Batimetria; Marés; Sistemas GPS RTK.

ABSTRACT

The need of integration between bathymetric data and vertical ashore information is increasing. From this perspective, several solutions are presented for the adoption of a Global Vertical Reference, stable enough to overcome the problems arising from the spatial and temporal variation of the Chart *data*. The advent of GNSS (Global Navigation Satellite Systems) technology has directly contributed to this effect, showing an improvement in the accuracy of their position solutions, thus opening the possibility for vertical control of hydrographic surveys by using high precision GPS methods. Following this global trend, a test application of the tidal reduction through GPS was performed for the first time in Brazil, in Guanabara Bay (RJ). This work discusses the main advantages of GPS for vertical control, such as the elimination of errors arising from the vertical dynamic changes of draft and heave effect, and its application in survey, in accordance with the international quality, and the possibility of removing ashore tide gauges during conventional surveys

Keywords: Bathymetry; Tides; GPS RTK Systems.

1. INTRODUÇÃO

O referencial vertical das cartas náuticas (*Chart Datum*), Nível de Redução (NR), deve ser coerente com as características físicas de cada região, tendo como premissa principal garantir a segurança da navegação. Isto significa que as profundidades representadas em uma carta náutica são os valores mínimos encontrados na área, sob condições meteorológicas normais. Desta forma o Nível de Redução apresenta variações espaciais e temporais em relação ao Datum Vertical “terrestre”.

Em 2002 foi criado o Grupo de Trabalho 4.2 “*Vertical Reference Frames*”, dentro da Comissão 4 (*Hydrography*) da FIG (*Fédération Internationale des Géomètres*), que vem desenvolvendo juntamente com a Comissão 5 (*Positioning and Measurements*) pesquisas para o estabelecimento de uma superfície de referência vertical global para Hidrografia (VRSH - *Vertical Reference Surface for Hydrography*), através de modelos de separação entre os diversos *data* locais e um datum vertical global para Hidrografia (ADAMS, 2005). Este objetivo se coaduna com o desenvolvimento de um Sistema de Referência Vertical Global conduzido pela IC-P1.2 (*Inter-Commission Project*) da IAG (*International Association of Geodesy*).

Os modelos de separação definem o comportamento dos diversos níveis de redução em relação a um referencial único e estável. A FIG sugere a adoção do elipsóide GRS80, orientado em relação ao ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*) a uma determinada época (FIG, 2006). Dentre as principais

vantagens dos modelos de separação estão: aperfeiçoamento de estudos relacionados aos fenômenos costeiros, tais como inundações decorrentes da ação de furacões e tsunamis, otimização do gerenciamento de zonas costeiras e definição de limites marítimos.

Definida a relação entre o nível de redução local e um elipsóide de referência, torna-se factível o emprego de sistemas GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) de alta precisão para o controle vertical de levantamentos hidrográficos. Desta forma, observações maregráficas costeiras e algumas correções verticais aplicadas ao transdutor dos ecobatímetros, tornam-se dispensáveis. Isto é possível a partir do correto alinhamento e sincronismo entre os sensores empregados (posicionamento, acústicos e inerciais) nos levantamentos. Atualmente esta integração é executada através dos programas hidrográficos de aquisição automática, que envolvem a etapa de planejamento, aquisição dos dados, processamento e elaboração de produtos (mapas, modelos 3D etc).

Objetivo

O principal objetivo deste trabalho é apresentar os primeiros resultados de um levantamento hidrográfico, onde foram aplicadas técnicas GPS de alta precisão para controle vertical. Estes resultados foram analisados à luz do Erro Total Propagado (ETP) a partir das diferenças observadas na comparação entre as sondagens regular e de verificação, segundo os padrões recomendados pela IHO (*International Hydrographic Organization*). O programa SIRBAT/GPS (Sistema de Reduções Batimétricas por GPS), desenvolvido durante esta pesquisa, permite o acompanhamento sistemático de todas as etapas do controle vertical por GPS, uma vez que os sistemas de aquisição automática comerciais não disponibilizam recursos científicos adequados.

Área de Estudo

O levantamento hidrográfico foi conduzido na Baía de Guanabara, Rio de Janeiro (RJ), tendo sido empregadas as estações maregráficas de Ilha Fiscal e Ponta da Armação para controle de qualidade dos resultados, obtidos pelos sistemas RTK (*Real Time Kinematic*) Trimble 7400 e NovAtel FlexPak, além do sistema C-Nav 2050M RTG (*Real Time GIPSY*), empregado pela primeira vez em levantamentos hidrográficos no Brasil para controle vertical.

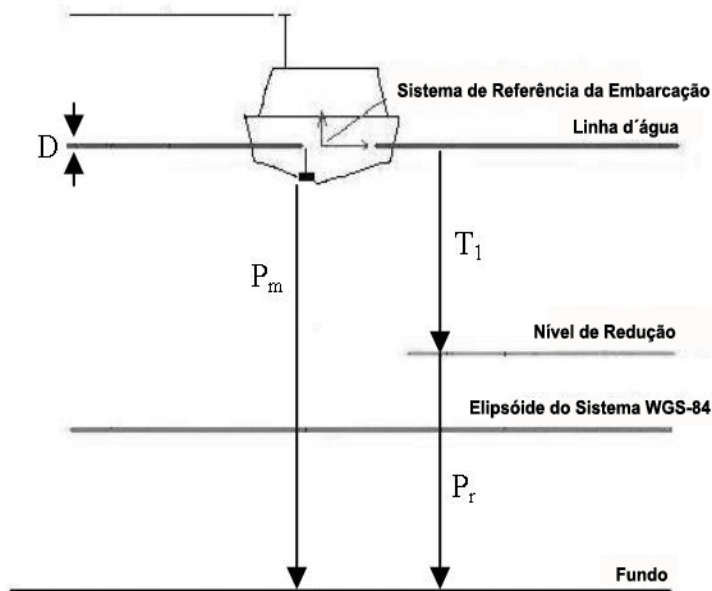
2. REDUÇÕES BATIMÉTRICAS

Profundidade é o valor real da distância vertical entre um determinado nível da água e o fundo do mar (IHO, 1994). No caso das Cartas Náuticas, este nível da água é denominado Nível de Redução (NR). No Brasil o NR é materializado pelo plano MLWS (*Mean Low Water Spring*), obtido a partir da análise harmônica de registros temporais da variação do nível do mar em uma determinada estação maregráfica. A sondagem corresponde a uma medida, geralmente tomada por algum

método acústico, do valor da profundidade. Portanto, devem ser acrescidas à sondagem correções (instrumentais, de posição do transdutor, atitude da embarcação e ambientais) a fim de se obter a profundidade local com o menor erro possível, denominada **profundidade reduzida**. As reduções batimétricas correspondem às correções ambientais dos efeitos de marés, com a finalidade de referir as sondagens ao NR (DHN, 1998). As correções de marés convencionais, doravante denominadas T_1 , correspondem à variação temporal da coluna d'água sobre o nível de redução, tomadas a partir de uma estação maregráfica de referência.

O método convencional de redução batimétrica é apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Correções de Marés Convencionais (T_1).



A profundidade reduzida (P_r) resulta da aplicação da correção de maré T_1 à sondagem P_m , ambas tomadas no mesmo instante t , de acordo com a expressão:

$$P_r = P_m(t) - T_1(t) + D \quad (1)$$

Acrescenta-se, ainda, o valor D correspondente ao calado² da embarcação de sondagem e suas respectivas variações dinâmicas. Estas variações ocorrem em

² Calado é a distância vertical entre a superfície da água instantânea e a parte mais baixa da embarcação no ponto de medida observado (FONSECA, 2002).

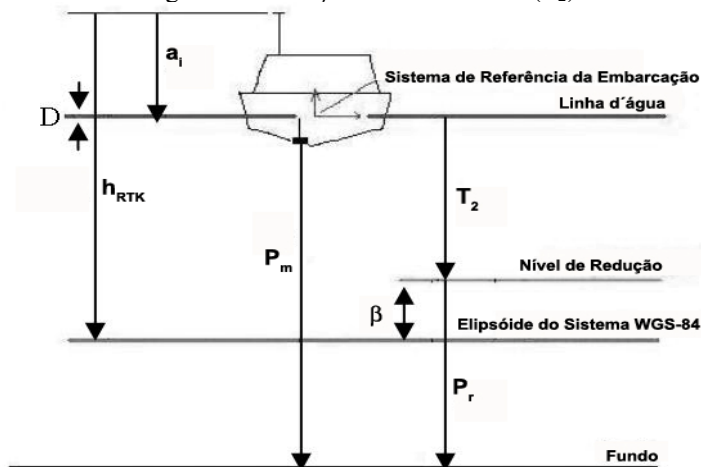
função de alterações nas condições de carregamento da embarcação e das interações hidrodinâmicas entre a água e o casco durante o seu deslocamento. As sondagens também são alteradas pela ação das ondas do mar, que provocam um movimento vertical na embarcação, denominado efeito *heave*.

As maiores fontes de erros presentes na profundidade reduzida são oriundas do processo de redução de marés e correções de atitude. Isto ocorre muitas vezes porque estes efeitos, sobretudo o efeito *heave*, são medidos de forma independente, o que gera imprecisão na etapa de pós-processamento, uma vez que, na prática, estes efeitos estão combinados no nível do mar para um determinado instante (SCARFE, 2002). Tipicamente os erros em função das correções de marés chegam a 10 cm, para levantamentos de Ordem Especial, e de 20 a 30 cm em levantamentos de Primeira Ordem (NORDEN et al., 2005). Já o efeito *heave* poderá provocar oscilações que variam de 5 a 20 cm (FERNANDES, 2005).

REMONDI et al. (1992) dizia que as correções de marés em tempo real empregando solução de ambigüidades OTF (*On-the-Fly*) eram possíveis. Medidas de marés pela técnica RTK também foram investigadas por KIELLAND e HAGGLUND (1995) e DE LOACH (1995). ASHKENAZI et al. (1990) também investigaram o uso do GPS para observação de maré, porém no contexto de estações maregráficas de longo período.

A Figura 2 é uma representação geométrica de reduções batimétricas obtidas a partir de correções de marés GPS, doravante denominadas T_2 . As correções T_2 são oriundas da variação das altitudes elipsoidais da antena GPS da embarcação (h_{RTK}). Estas variações estão correlacionadas aos movimentos verticais percebidos durante a sondagem, sobretudo os efeitos de maré e *heave*.

Figura 2 - Correções de Marés GPS (T_2).



Pelo método GPS a profundidade reduzida é dada por:

$$P_r = P_m(t) - T_2(t) + D \quad (2)$$

sendo:

$$T_2(t) = h_{RTK}(t) - \beta - a_i + D \quad (3)$$

Substituindo-se (3) em (2), ou seja, calculando-se as profundidades reduzidas a partir das correções de marés GPS, os termos associados ao calado e suas variações dinâmicas são cancelados. Logo o efeito *heave* é anulado pela aplicação de reduções batimétricas por GPS.

Da expressão (3), observa-se que o cálculo das correções de marés GPS (T_2) pressupõe o conhecimento de dois parâmetros: altura da antena GPS (a_i) em relação ao referencial da embarcação, normalmente a linha d'água estática; e a separação vertical (β) entre o NR e o elipsóide associado ao sistema WGS-84.

A separação vertical entre o NR local e o elipsóide de referência é o que garante a aplicação das correções de marés GPS, dispensando o uso de estações maregráficas na costa (IHO, 2005). Os erros cotidianos³, em função da divisão em subáreas de redução, são substituídos por erros associados com a determinação do relacionamento entre o elipsóide de referência e o NR local, ao longo da área (WONG et al., 2000). A separação entre WGS-84 G1150 e NR tem sido refinada em todo o mundo, gerando modelos locais de separação similares aos modelos geoidais (CLARKE et al., 2005).

Para esta pesquisa a separação vertical foi considerada constante, já que o NR não apresentava uma variação significativa (< 5 cm) na área teste onde foi realizado o levantamento hidrográfico. Assim sendo a separação vertical pode ser calculada em cada estação maregráfica a partir da altitude elipsoidal (h) de uma de suas referências de nível (RN), pela expressão:

$$\beta = h - (r + d) + (S_0 - Z_0) \quad (4)$$

onde:

r - comprimento da régua maregráfica;

d - desnível entre a régua e a RN, determinado por nivelamento geométrico;

S_0 - altura do NMM (Nível Médio do Mar) na estação maregráfica; e

Z_0 - altura do NR abaixo do NMM na estação maregráfica.

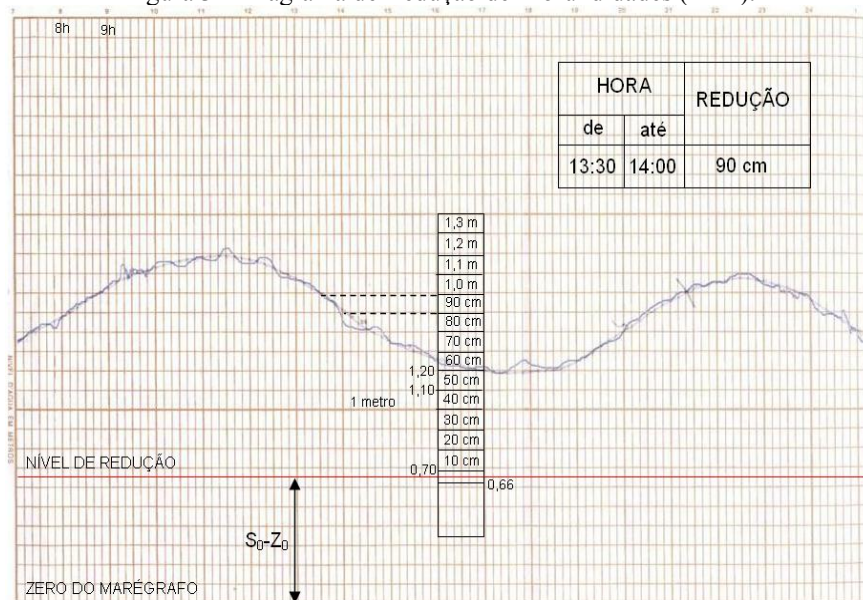
Os valores de S_0 e Z_0 são calculados a partir da análise harmônica de séries temporais de observação de nível do mar, com uma duração mínima de 32 dias.

³ Diferenças de fase e amplitude verificadas entre a maré na área do levantamento e aquela observada na estação maregráfica de referência.

Diagramas de Redução de Profundidade (DRP)

Em processos clássicos de redução batimétrica, o intervalo de amostragem das profundidades medidas pelo ecobatímetro é da ordem de segundos, enquanto o intervalo de amostragem necessário para registrar variações perceptíveis na altura da maré é da ordem de dezena de minutos. Sendo assim, agrupam-se as correções de sondagem em torno de valores médios, para um determinado intervalo de tempo, de acordo com a precisão necessária para cada tipo de levantamento. Os intervalos são definidos em função da forma da curva de maré observada. Desta forma são gerados os Diagramas de Redução de Profundidades (DRP), conforme ilustra a Figura 3, ao final de cada dia de sondagem, a partir das leituras coletadas na estação maregráfica. A Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) adota um critério que despreza as frações correspondentes até 1/4 da unidade de correção utilizada, de modo que o erro máximo da redução não seja superior ao decímetro (DHN, 1998).

Figura 3 – Diagrama de Redução de Profundidades (DRP).



Os erros de arredondamentos, inseridos pelos DRP, são eliminados da profundidade reduzida calculada a partir de reduções batimétricas GPS, uma vez que as correções T_2 são calculadas por modelos matemáticos para o instante exato em que foi observada a sondagem.

Resumindo, as precisões das correções de maré podem ser melhoradas com a aplicação de métodos de posicionamento GPS de alta precisão, em tempo real (sistemas RTK) ou pós-processados. As altas taxas de gravação das altitudes

elipsoidais permitem discriminar melhor a tendência de variação do nível do mar (USACE, 2004). Desta forma, há uma redução dos erros de arredondamento do DRP (Diagrama de Redução de Profundidades) e cotidais, já que as altitudes elipsoidais representam a oscilação de maré no local exato do levantamento. São eliminados os erros decorrentes das variações verticais sofridas pela embarcação durante a sondagem.

3. APLICAÇÃO DAS REDUÇÕES BATIMÉTRICAS GPS

Para análise das reduções batimétricas GPS foi selecionada uma área teste na Baía de Guanabara entre as estações maregráficas da Ponta da Armação e Ilha Fiscal (Figura 4). A área dispõe de linhas de sondagem regular e linhas de verificação cruzando-se ortogonalmente, de modo a simplificar a estimativa do Erro Total Propagado (ETP). Este erro é a principal estatística para validação da metodologia proposta, devendo-se estar de acordo com os padrões de qualidade recomendados pela IHO, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 – Máximo Erro Total Propagado de acordo com a classificação dos Levantamentos Hidrográficos.

	Classificação dos Levantamentos Hidrográficos			
	Especial	1a	1b	2
Descrição das Áreas	<i>Áreas onde a folga abaixo da quilha é mínima.</i>	<i>Áreas com profundidades inferiores a 100m, onde a folga abaixo da quilha é menos significativa, porém poderão existir feições submersas significativas</i>	<i>Áreas com profundidades inferiores a 100m onde a folga abaixo da quilha não representa uma limitação para o tráfego de navios esperado para a região</i>	<i>Áreas geralmente mais profundas que 100m onde uma descrição geral do fundo submarino é considerada suficiente.</i>
Máximo Erro Total Propagado o permitido	$a = 0,25 \text{ m}$ $b = 0,0075$	$a = 0,50 \text{ m}$ $b = 0,013$	$a = 0,50 \text{ m}$ $b = 0,013$	$a = 1,00 \text{ m}$ $b = 0,023$

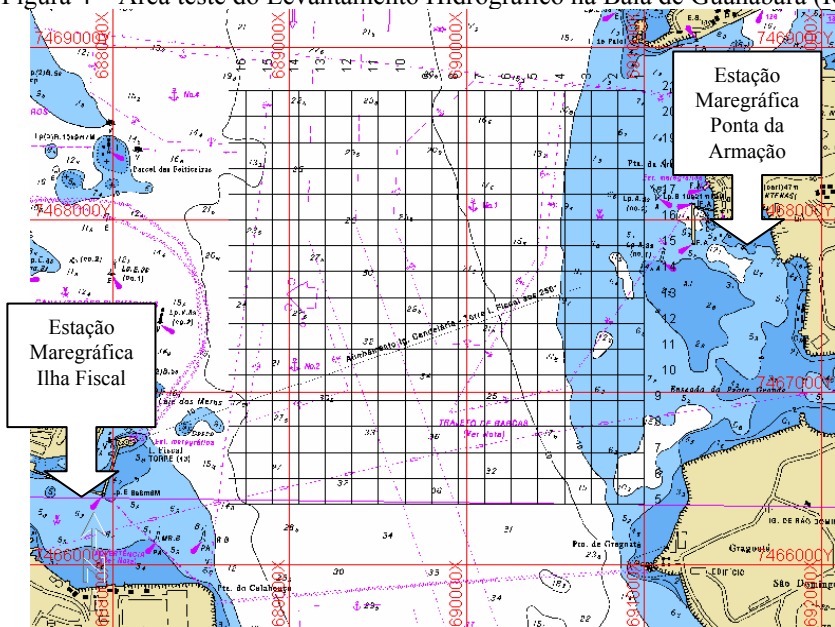
FONTE: IHO(2008)

O ETP máximo é dado pela expressão (5), a partir das constantes **a**, associada às incertezas independentes da profundidade, e **b**, que representa a parte das incertezas que variam de acordo com a profundidade **d**.

$$ETP_{\max} = \sqrt{a^2 + (b.d)^2} \quad (5)$$

Por se tratar da entrada do Porto do Rio de Janeiro, onde a Folga Abaixo da Quilha (FAQ⁴) é significativa em relação às dimensões dos navios que ali transitam, são considerados os parâmetros de levantamentos hidrográficos de ordem Especial.

Figura 4 – Área teste do Levantamento Hidrográfico na Baía de Guanabara (RJ).



A metodologia aplicada a esta pesquisa segue a seguinte ordem:

- a) Cálculo da separação vertical entre o NR da área e o elipsóide de referência associado ao sistema WGS-84 G1150, conforme descrito na seção 2;
- b) Cálculo da altura da antena GPS (Sistemas RTK e RTG) em relação à linha d'água média da embarcação de sondagem, de acordo com o processo proposto por Goldan (1994);
- c) Cálculo das correções de marés GPS a partir das altitudes elipsoidais geradas por soluções de posição RTK fixas (ambigüidades inteiras calculadas) e diferenciais RTG (correções para as órbitas e relógios dos satélites GPS);

⁴ Espaço mínimo entre a quilha (parte mais baixa do navio) e o fundo submarino. Dependendo das características da região são admissíveis valores de FAQ de até 50cm.

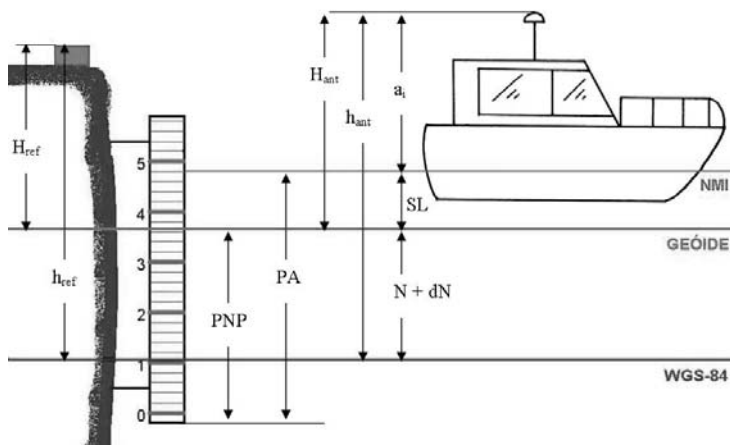
- d) Análise de qualidade das correções de marés GPS, obtidas pela tendência da variação temporal das altitudes elipsoidais das antenas GPS, instaladas a bordo da embarcação de sondagem;
- e) Aplicação das correções de marés (convencionais e GPS) às sondagens para a obtenção das profundidades reduzidas; e
- f) Estimativa da qualidade das profundidades reduzidas (ETP), através do processo de análise das linhas de verificação.

Cálculo da altura da antena GPS

O fator mais importante na observação de maré baseada em navios é a determinação precisa da altura da antena em relação à linha d'água da embarcação, segundo Alkan e Palancioglu (1999). Este valor deve ser determinado com uma incerteza compatível com a precisão disponibilizada pelos sistemas GPS precisos (aproximadamente 10cm). Para tal é necessária a imobilização completa do navio, preferencialmente em um dique seco.

Jubanski (2005) apresenta uma alternativa para o cálculo da altura da antena em situações onde a embarcação encontra-se docada. Entretanto, mesmo estando na água, a altura da antena GPS (a_i) pode ser estimada por meio do método descrito por Goldan (1994), cuja geometria é detalhada na Figura 5.

Figura 5 - Método de Goldan (1994) para cálculo da altura da antena GPS em relação à linha d'água da embarcação.



A embarcação deve ser posicionada próxima a uma estação maregráfica, onde sejam conhecidas as altitudes ortométrica (H_{ref}) e elipsoidal (h_{ref}) de pelo menos uma de suas referências de nível. A altura da antena GPS é calculada pela média

dos valores dados pela expressão (5), a partir de observações maregráficas (PA) e de altitudes elipsoidais (h_{ant}) coletadas durante um período de pelo menos uma hora.

$$a_i = h_{ant} - h_{ref} + H_{ref} - PA + PNP \quad (6)$$

Na expressão (5), PNP representa a altura do zero da régua em relação ao geóide, determinado a partir de nivelamento geométrico.

Uma das desvantagens do método de Goldan (1994) é que a altura da antena é calculada em relação a uma linha d'água média da embarcação de sondagem. Desta forma, os resultados são diretamente proporcionais às condições de carregamento da embarcação (RAMOS, 2007).

Para este cálculo foram utilizadas observações de nível do mar na estação maregráfica da Ponta da Armação, e altitudes elipsoidais coletadas a uma taxa de 1 segundo, a partir de soluções RTK com valores de ambigüidades inteiras fixas (receptores Trimble 7400 e NovAtel FlexPak), ou soluções calculadas por meio de correções RTG de dupla frequência (receptor C-Nav 2050M).

Cálculo das correções de marés GPS (T_2)

As correções de marés GPS são calculadas a partir das melhores soluções de posição disponibilizadas pelos sistemas empregados. Nos sistemas GPS RTK são consideradas apenas as altitudes elipsoidais contidas nas soluções fixas, ou seja, onde os inteiros das ambigüidades foram determinados. Para o sistema C-Nav RTG, foram adotadas as soluções diferenciais, obtidas pela aplicação de correções para as órbitas e relógios dos satélites, entre outras. Maiores informações sobre o sistema C-Nav podem ser encontradas em Dixon (2006), Wang et. al. (2005) e Bisnath et.al. (2003).

A precisão das altitudes elipsoidais, durante a execução do levantamento hidrográfico, foi estimada de acordo com Remondi et.al. (2000), pela diferença entre duas épocas consecutivas (1 segundo). As altitudes são ajustadas pelo método dos Mínimos Múltiplos Quadrados (MMQ), adotando-se o modelo estocástico paramétrico e o modelo matemático definido pela Equação Harmônica da Maré simplificada (RAMOS e KRUEGER, 2006), dada pela expressão (7). Sendo j a quantidade de componentes harmônicas principais (M_2 , S_2 , N_2 , K_2 , K_1 , O_1 , P_1) empregadas no cálculo do nível de redução, de acordo com os critérios de Courtier (1938) e Balay (1952).

$$Y(t) = S_0 + \sum_{k=1}^j [a_k \cdot \cos(\omega_k \cdot t) + b_k \cdot \sin(\omega_k \cdot t)] \quad (7)$$

Os parâmetros a serem determinados são os coeficientes a_k e b_k , e o valor do nível médio do mar (NMM) aproximado S_0 . Apesar de S_0 ser uma das constantes da estação maregráfica, seu valor corresponde a uma época diferente da realidade do

levantamento hidrográfico. As frequências angulares ω_k são constantes associadas às componentes harmônicas da estação maregráfica. Foram adotadas as constantes harmônicas da estação maregráfica da Ponta da Armação, apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Constantes Harmônicas Principais (estação maregráfica da Ponta da Armação).

Componente	Frequência (ω°/h)	Amplitude (cm)	Resíduo (cm)	Fase (Graus)
M_2	28.9841042	33.35	0.19	83.45
S_2	30.0000000	18.53	0.19	88.87
N_2	28.4397297	4.09	0.19	125.09
K_2	30.0821381	5.68	0,19	82.26
O_1	13.9430351	10.92	0,19	87.15
K_1	15.0410690	5.99	0,19	144.43
P_1	14.9589310	2.27	0,19	130.26

O uso de modelos matemáticos permite a criação de arquivos ASCII, cujas correções podem ser geradas para o mesmo instante da aquisição das sondagens. Isto elimina as incertezas nas profundidades reduzidas decorrentes dos erros de arredondamentos dos DRP. Os arquivos de correções GPS também podem ser empregados por programas comerciais de processamento de dados batimétricos.

Análise das linhas de verificação

A determinação da acurácia de dados batimétricos não é tão trivial quanto em levantamentos topográficos ou fotogramétricos, onde é possível uma redundância de dados muito maior, além da disponibilidade dos valores “verdadeiros” que podem ser obtidos por outros métodos mais precisos. Diante da dificuldade de obtenção de medidas redundantes no mar, são realizadas linhas de verificação que cruzam as linhas de sondagem regular ortogonalmente, a fim de se gerar um segundo conjunto de observações, a partir da mesma plataforma de instrumentos, em instantes distintos. Em torno destes cruzamentos, estabelece-se um raio de busca, no interior do qual todas as profundidades reduzidas deveriam ser iguais.

O bloco de sondagem foi elaborado de modo a maximizar a quantidade de cruzamentos. Desta forma, foram planejados 272 pontos de intersecção entre as linhas de sondagem nos sentido N-S e E-W, ao longo de aproximadamente 8 horas de levantamento. Para a análise, admitiu-se um raio de busca de 2 m, acurácia horizontal recomendada pela IHO para levantamentos de Ordem Especial.

Os índices estatísticos considerados são baseados na diferença máxima, média (σ_{BIAS}) e desvio padrão (σ_{ERRO}), entre as profundidades reduzidas das linhas de sondagem regular e de verificação. O ideal é que a diferença média seja a menor possível, o que significará que os erros sistemáticos são mínimos. Alguns serviços

hidrográficos admitem a inexistência de erros sistemáticos a partir de diferenças médias inferiores a 6 cm, porém na maioria das vezes os resultados obtidos encontram-se entre 3 cm e 1,5 cm. Contudo é necessário um número adequado de intersecções a fim de se garantir que esta média esteja dentro de um intervalo compatível, ao nível de confiança de 95%. Sendo assim, buscou-se um máximo de pontos de cruzamento, utilizando todas as sondagens, coletadas a uma taxa de 1 segundo, associadas a soluções de posição RTK fixas, ou RTG diferencial.

A estimativa do Erro Total Propagado (ETP) é dada pela expressão:

$$ETP = 1,96 \cdot \sqrt{\sigma_{BIAS}^2 + \sigma_{ERRO}^2} \quad (8)$$

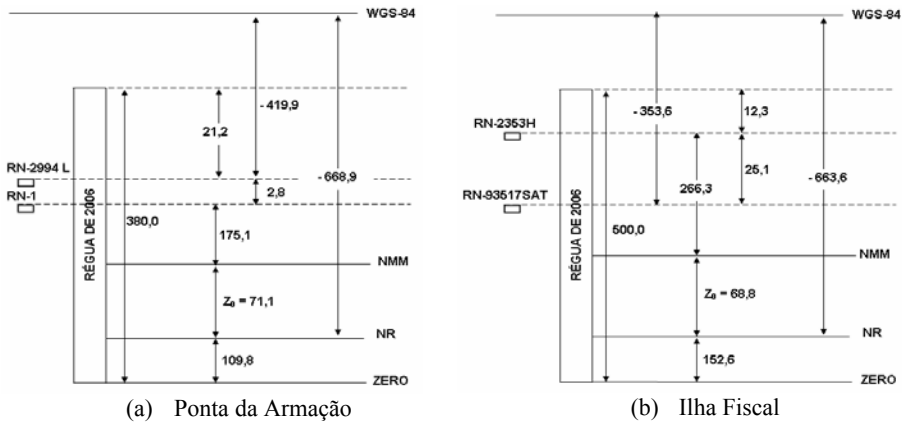
A validação da metodologia de reduções batimétricas GPS exige que o ETP das profundidades reduzidas, obtidas a partir de correções de marés GPS, sejam inferiores ao erro máximo permitido, de acordo com a classificação do levantamento hidrográfico (Tabela 1).

4. RESULTADOS

As separações verticais entre os Níveis de Redução e o elipsóide associado ao sistema WGS-84 G1150, em ambas as estações maregráficas, apresentaram uma diferença de 5,3cm. Enquanto os valores de Z_0 entre as estações era de apenas 2,3cm. Estas diferenças não são significativas em termos de reduções batimétricas, uma vez que a DHN estabelece um erro máximo de até 10cm (DHN, 1998). Considerando as características da circulação hidrodinâmica na Baía de Guanabara, a maior variação dos valores de Z_0 ocorre no sentido do escoamento, aproximadamente alinhado ao eixo Norte-Sul. Como as estações maregráficas estão dispostas muito próximas ao mesmo paralelo, são esperadas estas pequenas diferenças em Z_0 .

A Figura 6 é uma representação geométrica das separações verticais determinadas nas estações maregráficas. Na estação da Ponta da Armação foi utilizada a referência de nível RN-2994L, e na Ilha Fiscal, a RN-93517SAT, ambas pertencentes à RAAP (Rede Altimétrica de Alta Precisão) do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística).

Figura 6 – Separação vertical entre NR e elipsóide associado ao sistema WGS-84 G1150 nas estações maregráficas da Ponta da Armação (a) e Ilha Fiscal (b) em centímetros.



Os resultados das alturas das antenas GPS demonstram a deficiência do método de Goldan (1994), pois vinculam o resultado à condição de carregamento da embarcação durante o período das observações, conforme pode ser observado pela variabilidade das alturas registradas na Tabela 3.

Tabela 3 - Alturas das Antenas, em metros, calculadas pelo SIRBAT/GPS (método de Goldan, 1994) a partir do valor de separação vertical NR – Elipsóide WGS-84 obtido na Estação Maregráfica da Ponta da Armação (-6,689m).

Receptor	Dia	Altura m)	2σ (m)	Observ.	Período
RTK Trimble 7400	26/07	7,888	0,037	11	18h50 – 20h39
	27/07	7,748	0,052	19	17h20 – 20h29
	28/07	7,849	0,031	24	17h38 – 21h38
	28/07 ¹	7,699	0,049	47	08h45 – 16h37
RTG C-Nav 2050M	26/07	8,102	0,486	82	18h46 – 08h23
	27/07	8,070	0,573	84	17h22 – 08h02
	28/07	8,165	0,272	90	17h53 – 09h09
	28/07 ¹	8,174	0,257	47	08h45 – 16h36
RTK FlexPak	26/07	0,311	0,014	4	18h50 – 19h30
	27/07	0,160	0,152	82	17h30 – 07h10
	28/07	Soluções com ambigüidades fixas insuficientes para o cálculo			
	28/07 ¹	0,076	0,067	46	08h50 – 16h30

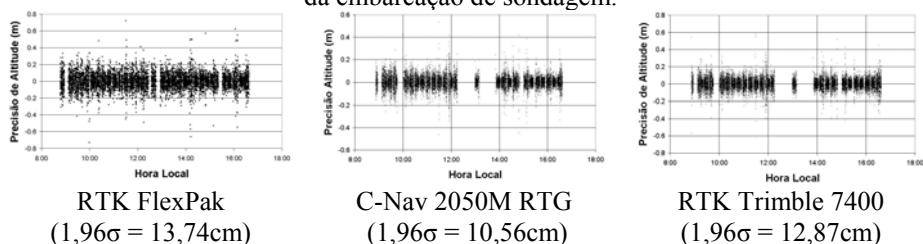
¹ alturas calculadas a partir da variação das altitudes elipsoidais observadas durante o levantamento batimétrico.

A situação descrita no parágrafo anterior é melhor identificada nos resultados obtidos pelo sistema RTK Trimble 7400. No dia 28/07, durante o período do levantamento (08h45 às 16h37), a embarcação encontrava-se carregada e com mais 15 pessoas a bordo, que devido ao seu porte, representava um acréscimo de calado e conseqüente diminuição de altura da antena. Esta variação de calado pode ser estimada em aproximadamente 18cm.

As alturas da antena do sistema C-Nav RTG não apresentam a mesma coerência dos sistemas RTK. Isto ocorre devido às diferenças no cálculo de suas soluções de posição, e por não terem sido aplicadas correções de marés terrestres. Os resultados do sistema RTK FlexPak sugere que a antena estaria muito próxima ao nível do mar. Verificou-se um erro durante a configuração da estação de referência, tendo sido inserido um valor incorreto para a altura da antena. Entretanto este erro tem comportamento sistemático e não interfere no cálculo das correções de marés GPS, conforme pode ser verificado na Tabela 4.

Todos os sistemas apresentaram uma precisão (ao nível de significância de 95%) adequada para o cálculo das correções de marés GPS, conforme pode ser observado na Figura 7.

Figura 7 – Estimativa de precisão das altitudes elipsoidais durante o deslocamento da embarcação de sondagem.

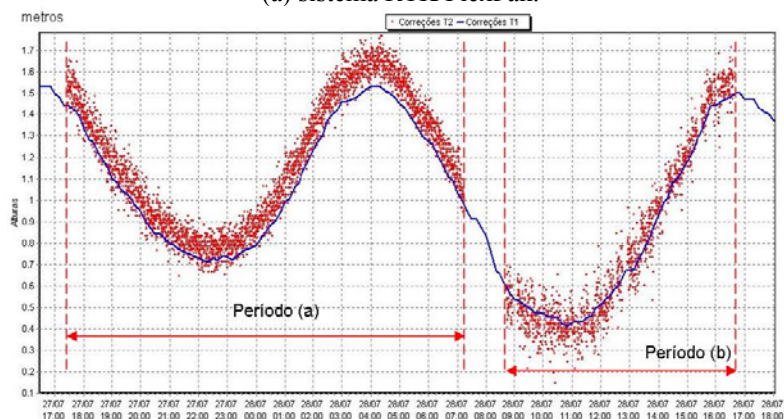


Os gráficos da Figura 8 apresentam o comportamento das correções de marés GPS dos sistemas RTK FlexPak (Figura 8a) e RTG C-Nav (Figura 8b). A linha cheia, em azul, representa as correções de marés convencionais observadas na estação maregráfica da Ponta da Armação. A Figura 8a apresenta duas situações distintas. No primeiro instante (a), a embarcação encontra-se atracada próxima a estação maregráfica, no período noturno e sem tripulação a bordo. O instante (b) corresponde ao período de realização do levantamento hidrográfico.

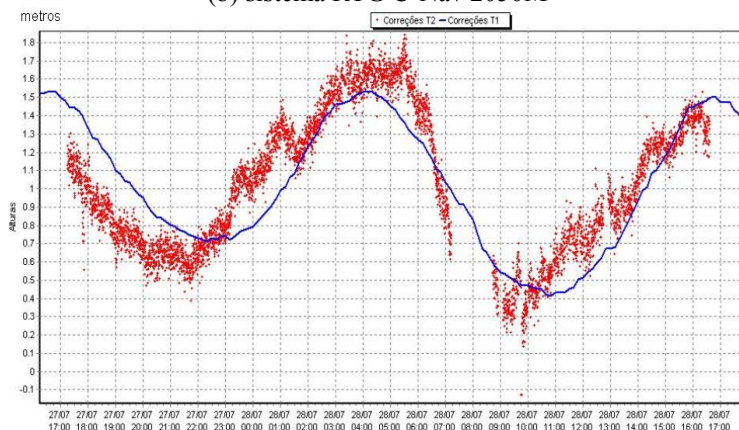
Na Figura 8a, percebe-se inicialmente uma maior variabilidade das altitudes elipsoidais durante o levantamento hidrográfico (período b), em função dos ruídos inseridos pelas interações hidrodinâmicas entre o casco e a superfície da água decorrente do movimento da embarcação, efeitos meteorológicos e variações de atitude. No período (a), a embarcação apresentava uma condição de carregamento diferente daquela encontrada durante o levantamento, resultando numa altura da antena GPS igual a 0,160 m, superior ao valor de 0,076 m, obtido durante o período

de sondagem (b). Como as correções GPS, para ambos os períodos (a e b) do gráfico da Figura 8a, foram geradas a partir da altura da antena obtida para a sondagem (0,076 m), nota-se um desvio sistemático entre as correções de marés GPS FlexPak no período (a) e as correções padrão fornecidas pelo marégrafo, o que já não ocorre durante a sondagem, período (b).

Figura 8 - Correções de marés T_2 geradas a partir de diferentes sistemas GPS
(a) sistema RTK FlexPak.



(b) sistema RTG C-Nav 2050M



O sistema RTG C-Nav possui uma boa precisão vertical (Figura 8), contudo o efeito das marés terrestres sobre o marégrafo não é percebido no receptor móvel, ocasionando algumas diferenças em fase e amplitude entre a tendência da variabilidade de suas altitudes elipsoidais em relação ao comportamento do nível do mar instantâneo descrito pelo marégrafo, conforme pode ser observado na Figura

8b. Observam-se também falhas de continuidade na variação das altitudes elipsoidais. Isto pode ser atribuído a um período de convergência de aproximadamente 30 minutos (BISNATH et al. 2003), ou seja, o tempo necessário para se obter soluções de posição precisas, a partir do instante em que se liga o receptor, ou quando é perdido o sinal INMARSAT de correção.

A Tabela 4 apresenta os testes de qualidade para as correções de marés GPS, para cada sistema de posicionamento utilizado. Nota-se que a ausência das correções de marés terrestres, e os problemas de convergência das soluções do sistema C-Nav RTG comprometeram a qualidade de seus resultados. Enquanto os sistemas RTK apresentaram uma qualidade adequada aos padrões recomendados para levantamentos de ordem Especial. Até mesmo o problema verificado na configuração da estação de referência do sistema RTK FlexPak não comprometeu a qualidade das suas correções de marés.

Tabela 4 - Exatidão das Correções de Marés GPS em função da altura da antena GPS, tomando-se como referência o mareógrafo da Ponta da Armação.

Receptor	Dia	Altura (m)	Diferenças (m)		Acurácia (m)	Correlação
			Média	Máxima		
RTK Trimble 7400	26/07	7,888	0,003	0,020	0,0223	0,9750
	27/07	7,748	0,000	0,033	0,0259	0,9910
	28/07	7,849	0,001	0,032	0,0168	0,9970
	28/07 ¹	7,699	0,000	0,052	0,0248	0,9986
RTG C-Nav 2050M	26/07	8,102	-0,007	0,387	0,2305	0,8360
	27/07	8,070	-0,016	0,373	0,2426	0,7569
	28/07	8,165	-0,004	0,229	0,1296	0,9052
	28/07 ¹	8,174	0,000	0,188	0,1284	0,9361
RTK FlexPak	26/07	0,311	-0,021	0,082	0,0891	0,9988
	27/07	0,160	0,000	0,157	0,0758	0,9655
	28/07 ¹	0,076	0,000	0,062	0,0333	0,9987

NOTA:

(1) valores determinados para o período do levantamento hidrográfico.

As correções de marés GPS de melhor qualidade são aquelas calculadas a partir das alturas das antenas GPS determinadas durante o período da sondagem, uma vez que refletem as reais condições de carregamento da embarcação. Isto pode ser percebido pela ausência de erros sistemáticos (diferenças médias iguais a zero) e pela melhor acurácia, tomada em relação às correções de marés convencionais (estações mareográficas).

Na análise das linhas de verificação foram obtidas 1100 diferenças entre profundidades reduzidas nas linhas de sondagem regular e de verificação, contribuindo para melhorar o intervalo de confiança da média dos erros calculados.

O erro máximo permitido para levantamentos de ordem Especial foi de 0,305m e de 0,586m, para levantamentos de ordem 1a, considerando-se uma profundidade média de 22,94m na área teste.

A Tabela 5 apresenta um sumário para os ETP calculados a partir de correções de marés convencionais, estação maregráfica da Ponta da Armação, e correções de marés GPS, fornecidas por cada sistema de posicionamento empregado.

Tabela 5 – ETP (RMS 95%) para as profundidades reduzidas.

Receptor	Correção	Tamanho da Amostra	Bias (m) Diferença média	Desvio Padrão (95%)	Diferença Máxima (m)	RMS (95%)
RTK Trimble 7400	<i>Estação Maregráfica</i>	1164	-0,007	0,249	0,83	0,250
	<i>GPS (MMQ)</i>	1164	0,029	0,253	0,87	0,259
RTG C-Nav 2050M	<i>Estação Maregráfica</i>	1197	-0,014	0,246	0,81	0,248
	<i>GPS (MMQ)</i>	1190	-0,051	0,450	0,84	0,460
RTK FlexPak	<i>Estação Maregráfica</i>	1121	-0,015	0,728	3,27	0,728
	<i>GPS (MMQ)</i>	1113	0,044	0,733	3,35	0,738

Considerando o erro máximo permitido para a área de sondagem, apenas o sistema RTK Trimble 7400 atenderia aos padrões para levantamentos de ordem Especial. As correções de marés GPS fornecidas pelo sistema C-Nav RTG atenderiam a levantamentos de ordem 1a. O emprego deste sistema para reduções batimétricas depende da aplicação de correções de marés terrestres e filtros especiais, a fim de reduzir a grande variabilidade de suas soluções de posição. O alto desvio padrão verificado nos resultados do sistema RTK FlexPak indicam problemas de alinhamento entre a antena GPS e o ecobatímetro. Tanto os resultados convencionais, quanto aqueles obtidos pela aplicação da metodologia GPS, foram semelhantes, indicando que o problema não está vinculado às correções de marés GPS.

5. CONCLUSÕES

As perspectivas de aplicação da metodologia GPS para controle vertical em levantamentos hidrográficos, têm crescido sobremaneira, a medida que as técnicas de posicionamento GNSS incorporam cada vez mais precisão, como as redes de estações de referência, através dos conceitos de estações de referência virtuais (VRS - *Virtual Reference Station*) e MAC (*Master Auxiliary Concept*), que constituem a

base dos padrões RTCM⁵ 3.0 (2004) e RTCM 3.1 (2006). Entretanto, para que sua aplicação atenda aos requisitos internacionais de qualidade estabelecidos pela IHO (Tabela 1), alguns pontos devem ser melhor avaliados, tais como: qualidade dos marégrafos de referência, desenvolvimento de modelos hidrodinâmicos adequados e alinhamento preciso entre os sensores de posicionamento e de profundidade.

Todos os testes de qualidade das correções de marés GPS foram baseados em registros analógicos de estações maregráficas. Estas comparações poderão não ser muito representativas, dadas as grandes imprecisões destes tipos de marégrafos. Recomenda-se em futuras comparações o emprego de métodos mais precisos de observação do nível do mar, tais como marégrafos que empreguem o princípio RADAR.

A principal contribuição do SIRBAT/GPS é a possibilidade de, pela primeira vez, ter-se acesso às estimativas de qualidade de um levantamento batimétrico, de forma clara e objetiva. Em todas as etapas de geração das correções de marés, através de métodos GPS diferenciais precisos, buscou-se estimar a qualidade dos dados fornecidos pelo programa, pela comparação com os processos convencionais. Contudo a redução batimétrica convencional ainda incorpora muitas incertezas, muitas destas não mensuráveis e estimadas simplesmente pela experiência em campo.

É preciso aperfeiçoar a metodologia de cálculo da separação vertical entre o nível de redução local e o elipsóide associado ao sistema WGS-84 G1150. Encontra-se em estudo o desenvolvimento de modelos de separação vertical a partir de modelagem numérica hidrodinâmica da região de interesse. Os resultados destes modelos associados aos sistemas de posicionamento por ponto preciso com correções globais (C-Nav, SeaSTAR etc), permitirá sua aplicação em extensas áreas, onde é inviável a instalação e manutenção de quaisquer estações de referência.

É fundamental a determinação precisa do alinhamento entre os sensores de posicionamento e de profundidade em diques secos, tomando-se um referencial fixo à embarcação de sondagem. O método de Goldan (1994) para determinação da altura das antenas GPS deverá ser empregado apenas em último caso.

AGRADECIMENTOS

Os autores desejam expressar seus agradecimentos às empresas C&C Technologies do Brasil e SightGPS pelo empréstimo dos sistemas RTG C-Nav 2050M e RTK FlexPak, respectivamente, ao Centro de Sinalização Náutica e Reparos Almirante Moraes Rego (CAMR) e a toda a tripulação da Lancha Balizadora “SO Oliveira”.

⁵ O padrão RTCM (*Radio Technical Commission for Maritime Services*) é empregado internacionalmente em sistemas globais de navegação satélite diferencial e de cartas náuticas eletrônicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMS, R., TS 40.2 *A Vertical Reference Surface for Hydrography - Status Report 2005*, FIG_Working Week 2005 and GSDI-8, Cairo, 2005, 6 p.
- ALKAN, R.M.; PALANCIOGLU, H.M. *Determination of Mean Sea Level with GPS on Vessel*. In: Institute of Navigation GPS 99, Nashville, 1999. p. 1323-1330.
- ASHKENAZI, V., G. A. BASKER AND T. F. BAKER. *Monitoring Mean Sea Level with GPS*. The Hydrographic Society SP.26, HYDRO 90, Proceedings of 7th Biennial Symposium of the Hydrographic Society, Southampton, 1990.
- BALAY, M.A., *La cote du plan*, Revue Hydrographic Internationale. v. XXIV, n. 2, p. 109, 1952.
- BISNATH, S.; WELLS, D.; DODD, D. *Evaluation of commercial carrier phased-based WADGPS services for marine applications*. In: Institute of Navigation GPS/GNSS 2003, Portland, 2003.
- CLARKE, J.E.H., DARE, P., BEAUDOIN, J., BARTLETT, J. *A stable vertical reference for bathymetric surveying and tidal analysis in the high Arctic*. U.S. Hydrographic Conference, US HYDRO 2005, 2005, San Diego.
- COURTIER, A. *Marées*, Service Hydrographique de la Marine, Paris, 1938.
- DE LOACH, S. R. *GPS Tides and Datums*. The Hydrographic Journal no.75, Janeiro, pp. 3-7, 1995.
- DIXON, K. *StarfireTM: A Global SBAS for Sub-Decimeter Precise Point Positioning*. ION GNSS Proceedings of 19th International Technical Meeting of the Satellite Division, Fort Worth, 2006, p. 2286-2296.
- DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO (DHN), *INSTRUÇÃO TÉCNICA H-01 – Critérios para correções a serem efetuadas nas sondagens para representação nas FB*. Rio de Janeiro: Base de Hidrografia da Marinha em Niterói, 1998
- Fédération Internationale des Géomètres (FIG), *FIG Guide on Development of a Vertical Reference Surface for Hydrography*. Copenhagen, Dinamarca, 2006, 30 p.
- FONSECA, M.M. *Arte Naval Volume I*, 6. ed. Rio de Janeiro: Serviço de Documentação da Marinha, 2002, 518p.
- GOLDAN, H.-J., *Tide Observations with Kinematic GPS on Ships*. In: International Symposium on Marine Positioning INSMAP 94, 1994, Hannover. Proceedings INSMAP 94. Rockville: PIP PRINTING, 1994. 595 p. p.585-595.
- International Hydrographic Organization (IHO). *IHO Standards for Hydrographic Surveys. Special Publication n. 44*. 5.ed. Principado de Monaco: International Hydrographic Bureau, 2008, 26 p.
- _____. *Hydrographic Dictionary, Special Publication n. 32*. 5.ed. Principado de Monaco: International Hydrographic Bureau, 1994, 281 p.
- _____. *Manual on Hydrography*. Principado de Monaco: International Hydrographic Bureau, 2005, 482 p.

- JUBANSKI, J.J. *Desenvolvimento e avaliação de um sistema de voo apoiado por GPS para aerotriangulação por feixes de raios*, 106f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) - Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.
- KIELLAND, P.; HAGGLUND, J. *The Use of DGPS to Measure the Heave Motion of Hydrographic Survey Vessels*. International Hydrographic Review, Monaco, LXXII(1) pp. 83-99, 1995.
- NORDEN, M.F., ARROYO-SUAREZ, E.N., NAJJAR, A.S. *Hydrographic Surveys to IHO Standards without shore station using Real-Time Gipsy (RTG) Global Positioning System*, U.S. Hydrographic Conference, US HYDRO 2005, San Diego, 2005.
- RAMOS, A.M.; KRUEGER, C.P. *Observações maregráficas empregando a técnica GPS RTK em apoio a levantamentos para atualização de Cartas Náuticas*. COBRAC 2006 - Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário, Florianópolis, 2006. Anais, 10 p.
- RAMOS, A. M., *Aplicação, investigação e análise da metodologia de reduções batimétricas através do método GPS diferencial preciso*, 221f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) - Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.
- REMONDI, B.W., FRODGE, S.L., SHANNON, LAPUCHA, D., BARKER, R., *Results of Real-Time Testing of GPS Carrier Phase Ambiguity Resolution On-The-Fly*, ION GPS 92 Proceedings of Sixth International Technical Meeting of The Satellite Division of Institute of Navigation, Albuquerque, 1992, p. 1053-1061.
- REMONDI, B.W., HUFF, L.C., *GPS Expedition to Tangier Island*. In: Institute of Navigation National Technical Meeting 2000, Anaheim, 2000. Proceedings... p. 323-332
- SCARFE, B., *Measuring Water Level Corrections (WLC) using RTK GPS*, The Hydrographic Journal, nº 104, Abril 2002.
- US ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE), *EM 1110-2-1003 Engineering and Design Hydrographic Surveying. Change 1*. Department of the Army, Washington, 2004.
- WONG, C., RILEY, J.L., MARTIN, D., HUFF, L.C., HALL, L., GILL, S., FOOTE, R., CARLSON, E. *NOS RTK Team Final Report*, Office of Coast Survey, Center for Operational Oceanographic Products and Services, Office of National Geodetic Survey, p.27, 2000.

(Recebido em novembro de 2008. Aceito em setembro de 2009.)