

Aplicabilidade dos Dados Obtidos por Sistema LASER Batimétrico Aerotransportado à Cartografia Náutica: Estudo de Caso para o Arquipélago de Fernando de Noronha

Airborne LASER bathymetric data applicability to Nautical Cartography: Case study for Fernando de Noronha Archipelago

Guilherme Antonio Gomes do Nascimento¹  & Maurício Galo² 

¹Diretoria de Hidrografia e Navegação, Niterói, RJ, Brasil

²Universidade Estadual Paulista, Departamento de Cartografia, Presidente Prudente, SP, Brasil

E-mails: guilhermenascimento@hotmail.com; mauricio.galo@unesp.br

Resumo

Um Levantamento Hidrográfico (LH) tem como principal meta a obtenção de dados para a edição e atualização de documentos náuticos, estes, voltados à segurança das atividades de navegação. A fim de padronizar parâmetros de incerteza das cartas náuticas, a Organização Hidrográfica Internacional (OHI) define níveis mínimos de confiança para diferentes ordens. Um desses parâmetros é a Incerteza Vertical Total máxima permitida. Ao influenciar no calado máximo para a navegação em segurança, a profundidade impacta nas limitações de transações comerciais em terminais portuários. Como complemento à tradicional técnica de levantamento por meio de um ecobatímetro acoplado a embarcações, há a opção de se realizar um LH com o emprego da tecnologia LiDAR (Light Detection And Ranging) a partir de aeronaves, por meio de um aerolevante batimétrico por LiDAR (ALB – Airborne LASER Bathymetry), que podem operar com pulsos LASER tanto somente na região verde do espectro eletromagnético, como conjuntamente com emissões na região do infravermelho próximo. Considerando este contexto, este trabalho analisou as diferenças entre informações obtidas por estas duas técnicas, com vistas à avaliação do potencial de aplicação da ALB na atualização de cartas náuticas. Foram utilizados dados levantados no Arquipélago de Fernando de Noronha – PE coletados em 2011, sendo empregadas como referência, informações obtidas no mesmo ano por ecobatímetro multifeixe. As análises permitiram estimar o comportamento das discrepâncias de profundidades entre os dois sistemas em diferentes profundidades, relevo e tipos de fundo marinho da região de interesse. Pode ser observada a impossibilidade de mapear áreas com profundidade acima de 50 m, bem como aquelas em zonas de arrebentação. Contudo, a sobreposição de até quatro faixas de voo indicou a possibilidade de ampliar a capacidade de detalhamento do fundo marinho. Por fim, a incerteza amostral obtida adequou o LH à ordem 1A, segundo parâmetros da OHI.

Palavras-chave: Light Detection And Ranging (LiDAR); Levantamento Hidrográfico; Incerteza Vertical

Abstract

A Hydrographic Survey (HS) has as main goal to obtain data for editing and updating nautical documents, these, focused on the safety of navigation. In order to establish a standard of uncertainty parameters for nautical charts, the International Hydrographic Organization (IHO) defines minimum levels of confidence for different orders. Depth information influences the maximum operational draft for a vessel to safely travel in a region, causing impact on port operations and limiting the commercial transactions. As a complement to the traditional survey technique conducted with a boat-coupled echosounder, there is the option of performing a HS using LiDAR (Light Detection And Ranging) technology from aircraft, through LiDAR aerial bathymetry (ALB - Airborne LASER Bathymetry) system, which can operate with LASER pulses both only in the green region of the electromagnetic spectrum, as in conjunction with pulses in near-infrared region. Considering these points, this work analyzed the differences between the information obtained by these two techniques, with an aim to evaluate the ALB's potential of application to update nautical charts. Data were acquired in the Fernando de Noronha Archipelago in 2011, while the reference dataset was obtained in the same year by a multibeam echosounder campaign. The evaluations allowed to estimate the dynamic of the depth discrepancies between the two systems in different depths, relief and seafloor composition in the area of interest. The impossibility of mapping areas deeper than 50 m was observed, as well as those in breaking zones. However, the overlap of up to four flight strips indicated the possibility of expanding the seabed description. The sample uncertainty obtained showed an outcome that fitted the HS to order 1A, according to IHO parameters.

Keywords: Light Detection And Ranging (LiDAR); Hydrographic Survey; Vertical Uncertainty

1 Introdução

Conforme definido por Miguens (1996), uma carta se trata de um documento representativo da superfície utilizado para a navegação ou outra atividade técnica ou científica. Com o objetivo primordial de prover segurança às atividades de navegação, as cartas náuticas são um dos produtos originados em um Levantamento Hidrográfico (LH).

A qualidade atingida em um LH indica o quanto é confiável a utilização da carta náutica de uma região. Tal consideração gera efeitos de diferentes naturezas, além da segurança da navegação, podendo-se citar o aspecto econômico. Os riscos à navegação impactam os valores de seguro às cargas transportadas e, por conseguinte, o seu custeio final. Soma-se ainda a relevância desses documentos no gerenciamento de zonas costeiras, assim como na construção de novos terminais portuários, em obras de dragagens, controle de erosões e em ações relacionadas à sustentabilidade das atividades dessas áreas (Organização Hidrográfica Internacional 2010).

Por meio da publicação S-44 (Organização Hidrográfica Internacional 2008), são sugeridos pela Organização Hidrográfica Internacional (OHI) os índices mínimos de incerteza, recobrimento de áreas e identificação de feições. Tais parâmetros são considerados para a classificação de LH nas ordens Especial, 1A, 1B e 2.

A busca pela descrição de um ambiente em constante modificação exige a evolução de técnicas e equipamentos, de modo a tornar a complexa tarefa de um LH mais eficiente. A forma mais disseminada de obtenção de profundidade e feições do solo marinho é aquela que emprega ecobatímetros acoplados a embarcações. Todavia, sua execução traz desafios, como a navegação em áreas rasas sujeitas à presença de pedras submersas, faixas de arrebentação e por vezes, o deslocamento em regiões ainda não cartografadas. Ademais, há a menor eficiência desse modal em regiões de baixa profundidade, onde o alcance lateral da varredura de um ecobatímetro multifeixe decresce sensivelmente (Larocque & West 1999).

De maneira a complementar as capacidades de um ecobatímetro, há a opção do levantamento batimétrico por meio da tecnologia LiDAR (*Light Detection And Ranging*) a partir plataformas embarcadas em aeronaves realizaram estudos acerca de tal aspecto, ao empregarem dados coletados por LiDAR para mapear trechos rasos no Alasca (EUA). Além da possibilidade do feixe LiDAR permitir o alcance em áreas críticas, tem-se uma varredura capaz de cobrir extensas áreas em menor tempo. Por outro lado, a turbidez da lâmina d'água pode impedir a penetração do feixe em áreas mais profundas. Dessa forma, o aerolevanteamento batimétrico por LiDAR (*ALB – Airborne LASER Bathymetry*), pode gerar economia de

recursos materiais e humanos, como demonstraram as análises feitas por Costa et al. (2009) na costa de Porto Rico.

Dado o exposto, o objetivo deste trabalho foi verificar a possibilidade de utilização de informações obtidas por LASER batimétrico aerotransportado para a atualização de cartas náuticas, a partir de uma plataforma de coleta alternativa à sondagem com ecobatímetro multifeixe. Esta análise foi realizada na região da Enseada de Santo Antônio, em parte da região delimitada pela Carta Náutica no. 52, no Arquipélago de Fernando de Noronha – PE, Brasil.

2 Materiais e Métodos

Este trabalho foi composto pela análise da capacidade de cobertura do solo marinho, verificação da precisão relativa dos dados obtidos por ALB e pelo cálculo da acurácia das profundidades adquiridas, por meio da comparação com sondagens realizadas com ecobatímetro multifeixe.

2.1 Área de Estudo

A área coberta pelo aerolevanteamento LiDAR abrange todo o Arquipélago de Fernando de Noronha e se encontra ilustrada na Figura 1A. O objetivo inicial da coleta por LASER foi o de gerar profundidades elipsoidais. A posterior aplicação do datum vertical da carta náutica gerou informações de profundidades referenciadas ao Nível de Redução. O trecho considerado neste estudo correspondeu à região de aproximação à enseada de Santo Antônio, coincidente à planta batimétrica constante no Banco de Dados Oceanográficos (BNDO) da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), obtidos por sistema de batimetria multifeixe (MBES) e mostrada na Figura 1B.

A região de pesquisa possui águas propícias ao aerolevanteamento por LASER batimétrico. Seu baixo nível de turbidez favorece a penetração dos feixes luminosos, estes, muito impactados pela claridade do ambiente abaixo d'água (Guenther & Goodman 1978).

2.2 Aerolevanteamento Topobatimétrico

As informações LiDAR topográficas e batimétricas foram coletadas pela Companhia de Pesquisa de Recursos Mineralógicos (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais 2014), sobre todo o Arquipélago, com um total de 112 km², incluindo-se a região costeira submersa até a profundidade aproximada de 55 m.

Nesse levantamento, foi empregado o sistema SHOALS-1000T, instalado em uma aeronave Beechcraft King Air A90, com as devidas medições de distância entre os sensores.

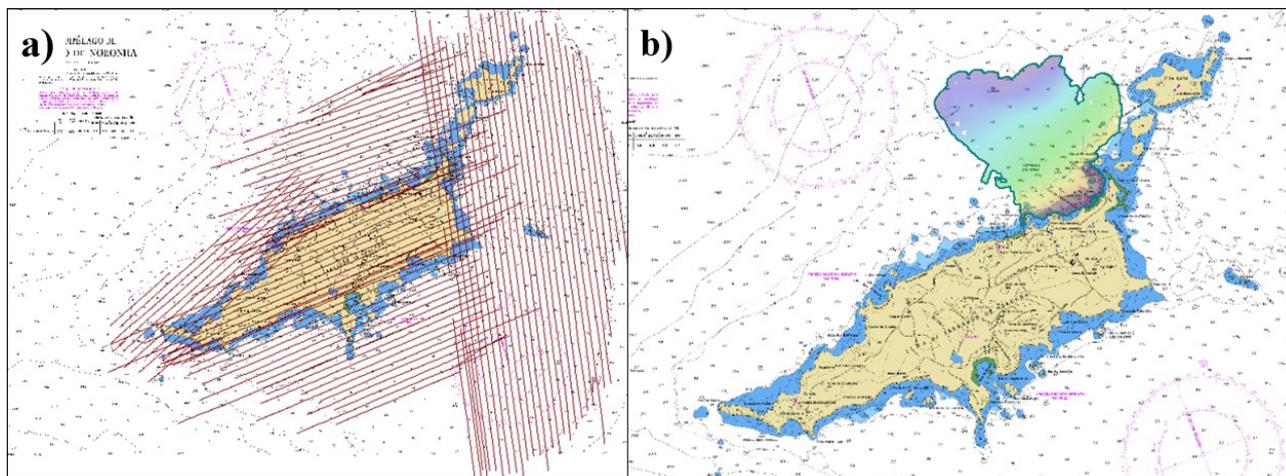


Figura 1 A: Traçados das faixas de voo do aerolevanteamento LiDAR; B: Área coberta pelo levantamento batimétrico multifeixe.

O levantamento foi planejado de modo a garantir pelo menos uma varredura sobre a área de interesse, com sobreposição lateral de 30 m entre as faixas. A altura de voo prevista foi de 400 m e a velocidade média, de 160 nós (296 km/h). O espaçamento dos dados previsto pela empresa contratante (CPRM) foi de 5 x 5 m.

A taxa de aquisição dos pontos tanto no modo topográfico quanto no hidrográfico (dados de batimetria) foi de 1 kHz. As emissões LASER se deram nas frequências de 1064 nm (infravermelho) e 532 nm (verde). O sistema SHOALS também utilizou a recepção do sinal resultante do espalhamento inelástico dos pulsos emitidos. Essa onda de retorno, com comprimento de 645 nm (vermelho), pode ser detectada pelo canal Raman (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais 2014).

O posicionamento em tempo real foi feito em referência ao ITRF05 (International Terrestrial Reference Frame), com coordenadas geodésicas e emprego do elipsoide GRS-80 (Geodetic Reference System). Usou-se o sistema geodésico WGS-84 e as coordenadas finais fornecidas foram apresentadas no sistema de projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), fuso 25S.

Quanto aos rastreios de controle realizados em terra, foi ocupada uma estação próxima ao aeroporto do Arquipélago. Os dados brutos foram processados pelo serviço online AUSPOS, mantido pelo Governo da Austrália.

As informações de navegação foram processadas no software Applanix POSpac 5.3. As soluções direta e inversa foram comparadas até que apresentassem discrepância menor do que 0,10 m (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais 2014).

2.3 Levantamento Batimétrico por MBES

As informações de profundidade de referência foram obtidas em um levantamento hidrográfico realizado entre 21 de maio e 01 de junho de 2011, por uma equipe do Navio-Hidrográfico Sirius, unidade da DHN. Os dados foram processados por aquela equipe e posteriormente verificados por analistas do Centro de Hidrografia da Marinha. A área da pesquisa se encontra exibida na Figura 1B.

Utilizou-se nesse LH, o ecobatímetro Kongsberg EM3000 com emissão de pulsos na frequência de 300 KHz, varredura de 130° de largura transversal e 1,5° de abertura longitudinal à trajetória da plataforma de coleta.

A varredura buscou atender aos critérios das Normas da Autoridade Marítima N° 25, para a classificação de LH como Ordem Especial ou 1A, e foi conduzida de modo a obter duas passagens por toda a área do levantamento, ou seja, cobertura de 200% (Diretoria de Hidrografia e Navegação 2017).

2.4 Processamento dos Dados

Os dados de ALB em coordenadas cartesianas foram transformados para a projeção UTM e projetados sobre a região pesquisada por MBES. A partir daí, foi possível selecionar os pontos da nuvem LiDAR pertencentes à região coincidente aos dois sistemas de coleta.

Para a geração de superfícies de interpolação, as informações LiDAR foram importadas no software Caris Base Editor 4.4. Ambas as grades foram criadas

2.6.2. Análise Comparativa e Remoção de Outliers

Na análise comparativa entre os dados LiDAR e MBES, ambas as nuvens foram interpoladas com células de 5 m. A subtração das profundidades forneceu as discrepâncias verticais entre os dados. Com base nelas, conduziu-se a identificação e remoção de outliers dos dados ALB.

Conforme Carrilho & Galo (2017), ao se considerar um limiar baseado em um determinado número de vezes o desvio-padrão da amostra, chega-se a uma técnica de exclusão de elevações espúrias sem a necessidade de informações externas aos dados.

De maneira a confirmar a distribuição das medições, foi feito o teste de normalidade a partir das discrepâncias entre as medições obtidas pelos sistemas LiDAR e MBES. A verificação se deu pela comparação entre quantis amostrais x_i , versus quantis teóricos esperados q_i , de acordo com Johnson & Wichern (2007) e expresso na Equação 1.

$$r_Q = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(q_i - \bar{q})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^2}}$$

Para grandes amostras, como neste caso, o teste proposto indica a aceitação da hipótese de normalidade de um conjunto de n amostras, quando r_Q se aproxima de 1 (Verrill & Johnson 1988; Johnson & Wichern 2007).

2.6.3. Cálculo Analítico da Incerteza Amostral

Após a identificação e eliminação de *outliers*, a análise da incerteza vertical amostral seguiu a metodologia desenvolvida por Lockhart et al. (2008). Conforme destacam esses autores, a variância da profundidade aferida pode ser utilizada como uma estimativa analítica da incerteza vertical amostral obtida a partir do sistema LiDAR. Para tal, as amostras de profundidade foram agrupadas em faixas por valores, de 2 em 2 m, a partir de 1 m de profundidade.

Em uma rotina criada nos *softwares* MATLAB R2015a/GNU Octave, traçou-se raios de busca horizontal de 1 até 10 m centrados em cada amostra, dentro de cada um dos intervalos de profundidade. O grupo de sondagens detectadas em um determinado raio teve a variância da profundidade estimada, possibilitando o cálculo da variância média geral. A Figura 3 exemplifica este procedimento para três raios de busca, em amostras de uma hipotética faixa de profundidades, cada um centrado em uma amostra diferente.

Em seguida, as médias de variâncias para cada intervalo de profundidades foram consideradas para o

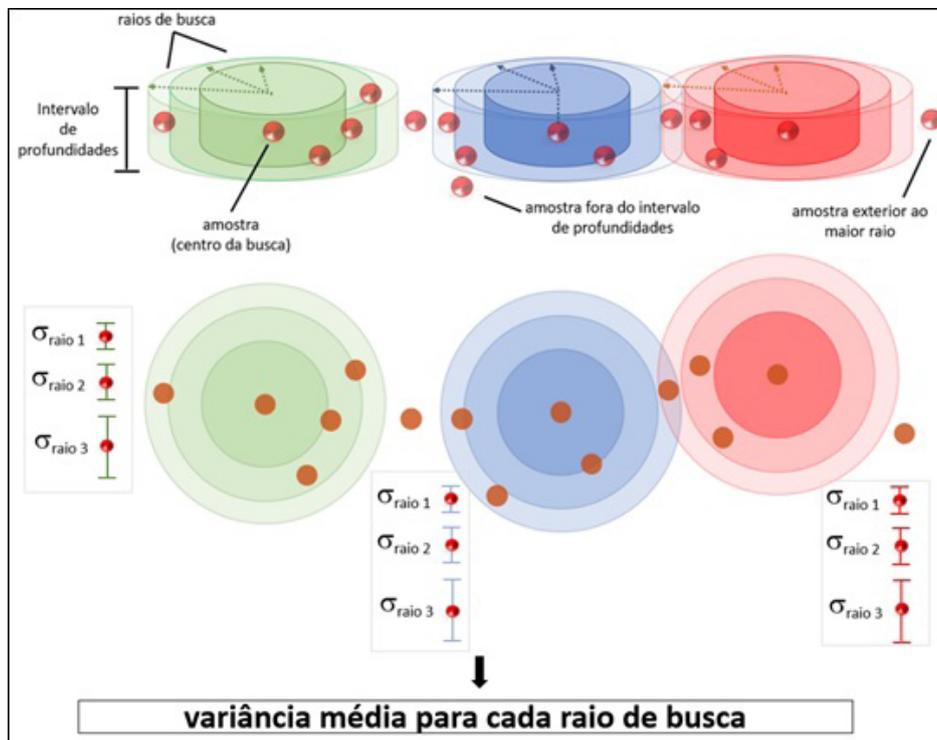


Figura 3 Visualização do cálculo analítico da incerteza vertical amostral dos pontos LiDAR.

traçado de variogramas e linhas de tendência, por meio do *software* Excel.

2.7 Análise da Correlação das Discrepâncias Verticais com o Relevo Marinho

Para a análise da correlação entre as discrepâncias verticais com o relevo marinho, ou mais especificamente com a inclinação do relevo marinho, estabeleceu-se inicialmente o gradiente do terreno referente à localização de cada amostra LiDAR.

Para tal, a nuvem MBES foi segregada por regiões coincidentes às das faixas de ALB com uso do *software* CARIS Base Editor e então interpolada em células de 3 x 3 m. Esta dimensão foi aquela que apresentou ausência de feriados nos dados MBES. Em seguida, obteve-se a projeção desses pontos no plano XY, para a criação das redes irregulares de triângulos (TIN) correspondentes a cada faixa ALB. Dada uma faixa de voo, sobre a superfície TIN de dados MBES, foi projetada a nuvem de pontos obtidos por LiDAR.

A identificação sobre qual triângulo cada medição ALB foi projetada foi feita com base no cálculo da área

de um triângulo, a partir do Teorema de Heron. Dado um ponto (P) qualquer e um triângulo (T), ao ligar P a cada um dos vértices de T, gera-se três novos triângulos. Se esse ponto estiver no interior de T ou sobre um dos seus lados, a soma dessas três novas áreas será igual à área do triângulo T, caso contrário, o ponto P não fará parte de T.

Identificados os vértices MBES que contêm P, pode-se novamente considerar suas coordenadas verticais e então, determinar o vetor \vec{V} normal a cada célula TIN, como ilustrado na Figura 4.

Em seguida, a partir dos coeficientes do vetor \vec{V} , calculou-se o seu ângulo α em relação ao plano horizontal XY. A tangente do ângulo ϕ complementar a α foi considerado para definir a magnitude do gradiente da célula em relação ao eixo vertical. Este valor foi adotado a todos os pontos do triângulo, inclusive aos dados ALB localizados no seu interior.

A partir das informações de gradiente e das discrepâncias em profundidades para a nuvem LiDAR, já excluindo-se os outliers, analisou-se o grau de correlação entre esses parâmetros com base no coeficiente de correlação de Pearson, também definido conforme a Equação 1.

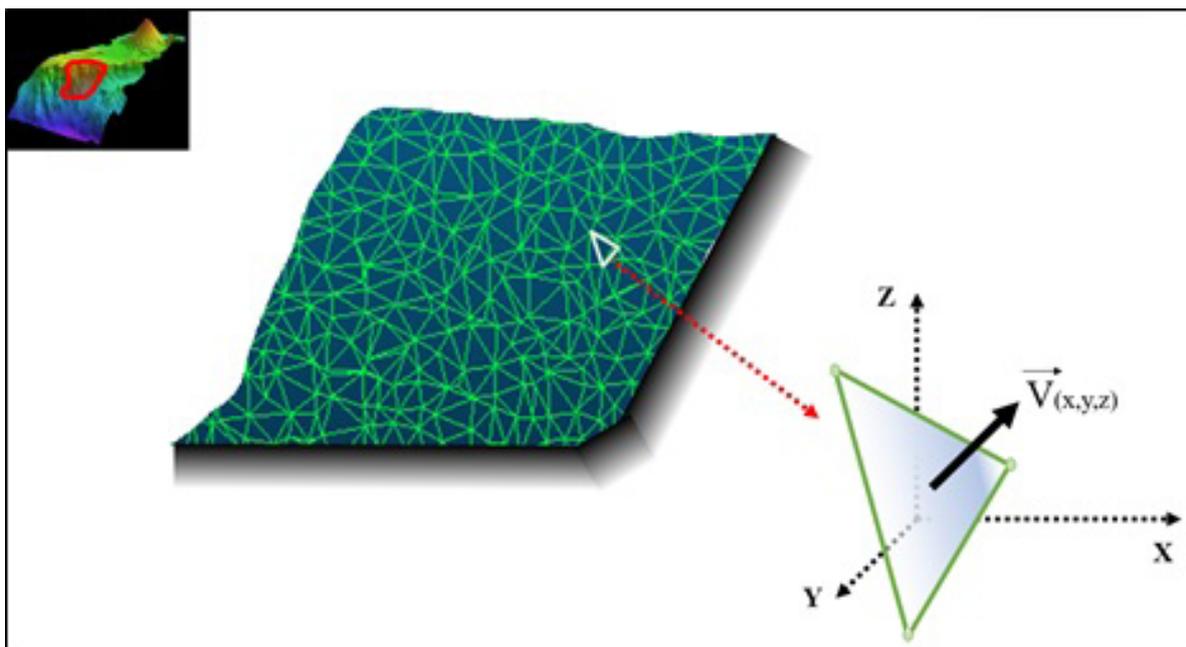


Figura 4 Ilustração de uma célula de superfície TIN e seu vetor normal \vec{V} .

3 Resultados e Discussão

A análise visual dos trechos com sobreposição de faixas, ou 200% de cobertura, indicou o alcance desse nível de mapeamento em uma área distribuída em 24 trechos de varredura, estes, empregados na avaliação da capacidade de cobertura do sistema ALB.

Em cada um desses trechos, verificou-se a quantidade de células vazias na área coberta pela faixa de voo em questão. O percentual de células sem dados válidos demonstrou que não foram satisfeitos os critérios para o alcance de uma Cobertura Completa, com a ocorrência de 8,73% de feriados.

A partir destes mesmos 24 trechos, extraiu-se a Tabela 1, com a relação das cinco porções com maiores percentuais de feriados. Tais trechos se localizaram nos dois extremos da área do aerolevanteamento.

Dois deles, 1 e 5, possuem profundidades médias próximas às de máximo alcance do sistema ALB utilizado, e os demais (19, 21 e 24), se localizam em área com ocorrência de arrebentação ou adjacente a ela, conforme informado pela carta náutica local. Estes fatores tem uma grande influência na capacidade de um sistema ALB em obter dados válidos, como afirmam Guenther & Goodman (1978) e observam Pe'eri et al. (2011).

Duas faixas adicionais ainda foram realizadas, sobrepostas ao trecho 21, o que possibilitou uma cobertura de 400% dessa porção. A inclusão dessas varreduras proporcionou uma melhor cobertura do solo marinho, com a ocorrência de somente 0,94% de feriados.

Após a verificação da cobertura completa, com base nas especificações da NOAA (4 x 4 m), estendeu-se a análise para interpolações de 5 x 5 m, espaçamento escolhido no planejamento do aerolevanteamento, e ainda para células de 6 x 6 m. A compilação dos três espaçamentos considerados é exposta na Tabela 2.

Dessa forma, depreende-se que ao se considerar o espaçamento de dados previsto no aerolevanteamento estudado de 5 m, uma vez cumprido o levantamento em duas passagens (ou com 200% de varredura), atinge-se uma equivalência à completa cobertura do solo. Pode-se afirmar o mesmo para a interpolação com células de 6 m, logo acima do espaçamento planejado. Ressalta-se, entretanto, que tais espaçamentos são maiores do que os de fato recomendados pelo NOAA.

A avaliação sob os parâmetros da Cobertura de Reconhecimento para as mesmas 24 regiões, apontou a não adequação aos critérios. A taxa de ocorrência de feriados analisada para cada faixa, se encontra na Tabela 3, agrupadas por tamanho das células.

Tabela 1 Lista dos trechos com maiores percentuais de feriados.

Trecho	Área	Ocorrência de Feriados	Profundidade Média
1	0,007 km ²	13,94%	46,63 m
5	0,019 km ²	12,47%	44,67 m
19	0,029 km ²	17,82%	12,22 m
21	0,018 km ²	17,48%	10,88 m
24	0,018 km ²	19,08%	7,45 m

Tabela 2 Percentual de células sem dados em trechos com sobreposição de duas faixas.

Ocorrências de Feriados com 200% de Varredura		
Células de 4 x 4 m	Células de 5 x 5 m	Células de 6 x 6 m
8,73 %	1,07 %	0,010 %

Tabela 3 Percentual individual de feriados em trechos em que houve sobreposição, para toda a área de trabalho.

Ocorrências de Feriados com 100% de Varredura		
Células de 4 x 4 m	Células de 5 x 5 m	Células de 6 x 6 m
39,09 %	8,10 %	7,20 %

Na análise comparativa entre dados LiDAR e MBES, a subtração das profundidades das células da grade LiDAR pelas dos dados MBES, para aproximadamente 223.557 pontos, gerou diferenças com uma média de -0,215 m. Essa discrepância denotou que as profundidades obtidas por ALB foram em média mais rasas, tal qual apurado por Costa et al. (2009), em um aerolevanteamento realizado no sudoeste de Porto Rico. Conforme destacado por esses autores, uma explicação plausível pode ser encontrada na determinação do pulso correspondente ao fundo marinho, por parte do sistema ALB.

No SHOALS-1000T, a detecção do sinal de resposta no comprimento de onda do verde ocorre em dois canais de recepção. Em ambos podem ser identificados até dois pontos da onda de retorno como candidatos para a definição do fundo marinho. O critério de seleção do pulso é definido previamente ao levantamento. A escolha do retorno pode se dar pelo sinal mais forte, último pulso ou primeiro pulso (Guenther et al. 1996), sendo que o sinal mais forte se refere ao pulso com a melhor relação sinal-ruído (SNR) entre os candidatos. Neste modo de operação, diminui-se

a probabilidade de identificar formações como rochas ou corais. O último pulso evita a falsa detecção de objetos ou seres vivos localizados entre a superfície e o solo marinho, mas está relacionado à mínima SNR entre os 4 potenciais candidatos. Já a seleção do primeiro sinal é aquela que melhor descreve as feições submarinas, e por isso, a que melhor atende ao propósito do aerolevantamento estudado. A escolha desse critério, portanto, considera um menor tempo de propagação do LASER sob a água e pode estar relacionada com a obtenção de profundidades por ALB consistentemente menores do que as coletadas por MBES, como indicado pelo resultado obtido.

O espectro de diferenças normalmente distribuídas, entre as informações ALB e MBES mostrou uma grande amplitude de valores de discrepâncias, acima de cinco vezes o desvio-padrão estimado de 0,395 m, o que indica a presença de outliers no conjunto de dados.

Com o emprego da abordagem de Galo & Carrilho (2017), foram classificados como outliers e eliminados, os valores de discrepâncias maiores do que 1,96 vezes o desvio-padrão aferido. A adoção desse limiar conferiu às profundidades mantidas um nível de significância de 5%, mesmo percentual considerado nas incertezas sugeridas em especificações da OHI. As Tabelas 4 e 5 exibem, respectivamente, a análise estatística do conjunto original das profundidades e a resultante após retirada dos dados espúrios.

A análise espacial das discrepâncias sobre a área de trabalho permitiu verificar uma concentração dos valores superiores a 1 m (em módulo), em regiões próximas às dos trechos com menor cobertura de varredura. Na Figura 5A,

Tabela 4 Análise das diferenças com todos os dados, incluindo os pontos espúrios.

Análise das Discrepância ALB x MBES (com outliers)	
Média das Diferenças	-0,215 m
Desvio-Padrão das Diferenças (σ)	0,395 m
Diferença Máxima	8,977 m
Diferença Mínima	-35,794 m
Número de Pontos	223557

Tabela 5 Análise das diferenças sem os pontos espúrios ($\mu \pm 1,96\sigma$).

Análise das Discrepância ALB x MBES (sem outliers)	
Média das Diferenças	-0,187 m
Desvio-Padrão das Diferenças (σ)	0,289 m
Diferença Máxima	0,559 m
Diferença Mínima	-0,988 m
Número de Pontos	210846
Pontos Excluídos	12711 (5,69%)

observa-se a localização desses trechos, enquanto na Figura 5B, a distribuição dos pontos em questão.

Para a estimativa da incerteza vertical amostral dos dados LiDAR, variogramas foram gerados a partir dos conjuntos das médias de variâncias para cada intervalo de profundidades. Em todos os casos, escolheu-se a linha

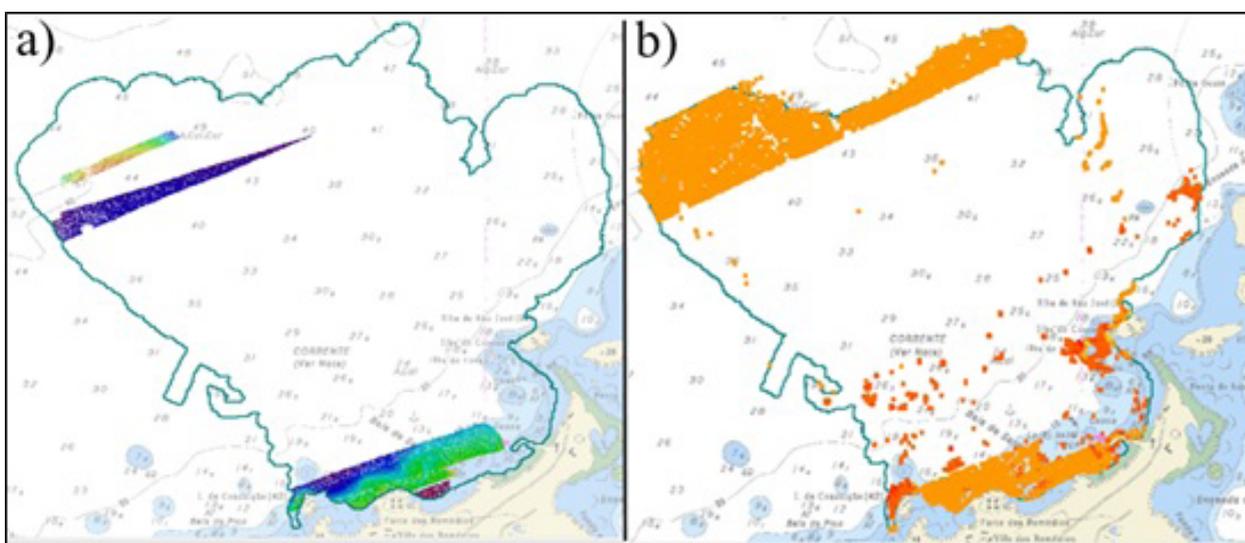


Figura 5 A: Trechos de pior cobertura do solo marinho; B: Regiões com discrepância maiores que 1 m e menores que -1 m, em laranja.

polinomial cuja ordem melhor se ajustou aos dados da amostra. Para determinar a variância amostral de cada intervalo de valores, considerou-se o valor de interseção das linhas de tendência com o eixo das ordenadas.

Na avaliação da incerteza amostral quanto ao atendimento à tolerância da ordem 1A, definida pela S-44 (Organização Hidrográfica Internacional 2008), foi utilizada a raiz quadrada da variância média, comparada à incerteza máxima especificada pela OHI. Em todos os trechos, a ordem foi alcançada.

Conforme Lockhart et al. (2008), a estimação da incerteza pela metodologia utilizada considera as condições ambientais do levantamento, as quais poderão variar com alterações de local, parâmetros de turbidez da coluna d'água e de reflectância do solo marinho.

Enquanto a definição de ordens de levantamentos da OHI se baseia na incerteza total propagada, referente somente aos sensores empregados, a incerteza amostral engloba contribuições tanto dos equipamentos, quanto das condições do ambiente de operação.

Com base no coeficiente de correlação de Pearson, foi possível verificar que não houve significativa correlação entre o perfil do relevo marinho e as diferenças entre as profundidades LiDAR e MBES. A análise do coeficiente de correlação para cinco regiões com discrepâncias em valor absoluto maiores que 1 m resultaram em um coeficiente de correlação médio da ordem de $r=0,329$, indicando a baixa correlação mencionada.

Diferentes resultados foram alcançados por Costa et al. (2009). Seus estudos resultaram em maiores discrepâncias em relação aos dados de MBES, para trechos com mais de 25% de variação da profundidade. Os autores citam como motivador desse resultado, o maior *footprint* do sistema LiDAR em relação ao MBES. Todavia, ainda que os dados tenham sido obtidos com espaçamentos de 4 x 4 m e 5 x 5 m, as faixas de voo executadas naquela pesquisa não descreveram uma trajetória paralela às linhas isobatimétricas da região e consideraram informações de ALB até a profundidade de 35 m. Já os dados do presente trabalho, seguiram a mesma orientação das linhas de profundidade locais e alcançaram 48,59 m, próximo da máxima teórica do sistema de varredura a LASER empregado.

Pe'eri et al. (2011), por sua vez, coletaram dados LiDAR em levantamentos com espaçamento de 3 x 3 m em duas varreduras sobrepostas (200% de recobrimento) e com 4 x 4 m de espaçamento, com 100% de cobertura. Ao compará-los com profundidades de referência obtidas com MBES, concluíram que a eficiência da detecção

do fundo por ALB não possui correlação relevante com valores absolutos de inclinação do solo marinho, como neste trabalho. Suas constatações sugerem o meio ambiente de propagação ao longo da coluna d'água, como sendo um fator preponderante na capacidade do mapeamento LiDAR, especialmente em águas com menos de 7 m de profundidade.

4 Conclusão

Embora os dados utilizados neste trabalho tenham sido obtidos por um aerolevante voltado à identificação de feições submersas e não para a atualização de documentos náuticos, a análise dos dados sob critérios aceitos pela OHI, DHN e NOAA fornece orientações para trabalhos futuros que busquem a aplicações à cartografia náutica.

À luz dos parâmetros adotados pelo NOAA, pode-se concluir que com a dupla varredura (200% de recobrimento), com espaçamento de 5 x 5 m, não é possível garantir a cobertura total do solo mapeado. Contudo, com uma maior sobreposição de faixas, os requisitos necessários poderão ser cumpridos, como pode ser observado a partir dos resultados obtidos em um trecho com 400% de recobrimento.

As características das regiões onde houve maiores dificuldades para a obtenção de dados válidos, mostram que em um levantamento hidrográfico realizado a partir de um sistema ALB, deve-se dispender especial atenção às regiões próximas ao alcance máximo do sistema e em áreas de arrebentação. O planejamento para essas regiões deve contemplar um número maior de faixas e se possível, considerar uma maior potência na emissão do sinal.

5 Referências

- Carrilho, A.C. & Galo, M. 2017, 'Remoção de Pontos Espúrios em Dados LiDAR Aerotransportado a Partir da Análise Estatística das Altitudes', Anais do IV Simpósio Brasileiro de Geomática, pp. 323–7.
- Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais 2014, Relatório Final do Levantamento e Processamento dos Dados de Relevo, com Aplicação da Tecnologia a Laser Aerotransportada (Área Emersa e Submersa), Fernando de Noronha.
- Costa, B.M., Battista, T.A. & Pittman, S.J. 2009, 'Comparative evaluation of airborne LiDAR and ship-based multibeam SoNAR bathymetry and intensity for mapping coral reef ecosystems', Remote Sensing of Environment, vol. 113, pp. 1082–100.
- Diretoria de Hidrografia e Navegação 2017, Normas da Autoridade Marítima para Levantamentos Hidrográficos, DHN (ed.), DHN, Brasil.

- Guenther, G. & Goodman, L. 1978, 'Laser Applications for Near-Shore Nautical Charting', SPIE Ocean Optics V, vol. 160, pp. 174–83.
- Guenther, G.C., Thomas, R.W.L. & Larocque, P.E. 1996, 'Design Considerations for Achieving High Accuracy with the SHOALS Bathymetric LiDAR System', SPIE, vol. 2964, pp. 54–71.
- Johnson, R.A. & Wichern, D.W. 2007, Applied Multivariate Statistical Analysis, 6th edn, Pearson Education, Upper Saddle River.
- Larocque, P.E. & West, G.R. 1999, 'Airborne Laser Hydrography : An Introduction History of Airborne Laser Hydrography', IHB Workshop on Hydrographic Activities in the ROPME sea area and Red Sea, Kuwait, p. 16.
- Lockhart, C., Lockhart, D. & Martinez, J. 2008, 'Total Propagated Uncertainty (TPU) for Hydrographic LiDAR to Aid Objective Comparison to Acoustic Datasets', International Hydrographic Review, vol. 9, no. 2, pp. 19–27.
- Miguens, A.P. 1996, 'Projeções Cartográficas; A Carta Náutica', Navegação: A Ciência e a Arte, Diretoria de Hidrografia e Navegação, Niterói, p. 17.
- National Oceanic and Atmospheric Administration 2017, Hydrographic Surveys Specifications and Deliverables, NOAA (ed.), NOAA, United States of America.
- Organização Hidrográfica Internacional 2008, Especificações da OHI para Levantamentos Hidrográficos - S-44, OHI (ed.), OHI, Monaco.
- Organização Hidrográfica Internacional 2010, Manual de Hidrografia - Publicação C-13, OHI (ed.), vol. 1, OHI, Monaco.
- Pe'eri, S., Morgan, L., Philpot, W. & Armstrong, A. 2011, 'Land-Water Interface Resolved from Airborne LIDAR Bathymetry (ALB) Waveform', Journal of Coastal Research, no. 62, pp. 75–85.
- Verrill, S. & Johnson, R.A. 1988, 'Tables and large-sample distribution theory for censored-data correlation statistics for testing normality', Journal of the American Statistical Association, vol. 83, no. 404, pp. 1192–7.

Recebido em: 15/08/2020

Aprovado em: 12/08/2021

Como citar:

Nascimento, G.A.G. & Galo, M. 2021, Aplicabilidade dos Dados Obtidos por Sistema LASER Batimétrico Aerotransportado à Cartografia Náutica: Estudo de Caso para o Arquipélago de Fernando de Noronha. *Anuário do Instituto de Geociências*, vol. 44: 37487. https://doi.org/10.11137/1982-3908_2021_44_37487