



IBP1101_07
**AS INOVAÇÕES DO LASER AEROTRANSPORTADO: SUAS
VANTAGENS PARA MAPEAMENTO DE DUTOS**
Silas Sallem Filho

Copyright 2007, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP

Este Trabalho Técnico foi preparado para apresentação na *Rio Pipeline Conference & Exposition 2007*, realizada no período de 2 a 4 de outubro de 2007, no Rio de Janeiro. Este Trabalho Técnico foi selecionado para apresentação pelo Comitê Técnico do evento, seguindo as informações contidas na sinopse submetida pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho Técnico, como apresentado, não foi revisado pelo IBP. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, seus Associados e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho Técnico seja publicado nos Anais da *Rio Pipeline Conference & Exposition 2007*.

Resumo

Esta pesquisa tem por objeto apresentar os resultados dos sistemas de perfilamento a LASER aerotransportado em experiências práticas para mapeamento de dutos. Para embasar as reflexões pretendidas, o trabalho desenvolve-se em dois momentos que se relacionam – o conceitual e o empírico. Num primeiro momento é feita uma revisão do referencial conceitual que compreende a criação dos primeiros equipamentos LASER comerciais até às vantagens advindas das inovações tecnológicas, para mapeamento de dutos. Num segundo momento, apresenta-se um panorama de experiências técnicas no mapeamento de dutos, que constata inovações advindas das novas tecnologias dos sistemas a LASER, tais como: as melhorias no delineamento do terreno, através da grande quantidade de pontos emitidos pelo sistema; o aumento significativo da largura das faixas de vôo LASER em função dos equipamentos permitirem maior altura de vôo; o ganho de qualidade horizontal, na medição das coordenadas planimétricas e o ganho de qualidade das imagens obtidas a partir dos pontos do levantamento LASER. Por fim, constata-se a agilidade apresentada pelo mercado de LASER aerotransportado.

Abstract

This paper intends to present the results of airborne LASER scanner systems surveys in practical experiences for pipeline mapping. To support the reflections presented, the paper describes two situations that are straightforward related - the conceptual and the empiric. The first discussion is a revision of the conceptual referential that starts with the creation of the first commercial LASER equipments, going through the advantages of technological innovations, for right-of-way mapping. The second issue shows up a panorama of technical experiences in pipeline mapping that presents innovations of LASER systems' new technologies such as: improvements in terrain scanning because large amount of points emitted; a significant increase on swath caused by flight height; best horizontal accuracy when measuring coordinates and quality increasing of images obtained from LASER points. Finally, is verified the quickness presented by the market of airborne LASER.

1. Introdução

O tema proposto para este artigo deriva de práticas de mapeamento de dutos que utilizam os sistemas de perfilamento a LASER aerotransportado, e tem como principal objetivo apresentar resultados advindos destas experiências.

Para tanto, é estabelecido um roteiro metodológico que se desdobra em dois momentos. O primeiro se destina aos conceitos e fundamentos relacionados aos sistemas de perfilamento a LASER aerotransportado.

O segundo momento consiste na apresentação de experiências práticas realizadas em mapeamento de dutos, as quais nos revelam inovações advindas das novas tecnologias dos sistemas a LASER, tais como: melhor qualidade das imagens geradas a partir dos pontos do levantamento LASER, maior densidade de pontos com melhor definição do terreno, aumento da largura das faixas de vôo LASER, compensação de movimento da aeronave (*roll stabilization*), melhor qualidade horizontal dos pontos LASER (1:5.000 de H; 1:10.000 de H).

2. Sistema de Perfilamento a LASER

O Sistema de Perfilamento a LASER (ALS - *Airborne LASER Scanning*) é um sistema que adquire dados digitais de elevação do terreno com precisão equivalente ao GPS, mas de forma muito mais eficaz, pois o sensor principal do sistema está localizado em uma aeronave cujo deslocamento, sobre uma área de interesse, é extremamente rápido quando comparado com os levantamentos convencionais (*in loco*).

O Perfilamento a LASER desenvolveu-se a partir da necessidade de usuários de modelos digitais de elevação (DEM - *Digital Elevation Model*) em casos onde os métodos convencionais não eram suficientes. As experiências iniciais com esta metodologia datam de 1993, realizadas por um grupo de pesquisa alemão da Deutsche Forschungsgemeinschaft que mais tarde, levaram à criação da TopScan GmbH. Em conjunto com a empresa canadense Optech Inc., a TopScan GmbH desenvolveu um método de Perfilamento a LASER considerado como o primeiro projeto demonstrativo da técnica (1993) – Figura 1.



Figura 1. Primeiro Sistema de Perfilamento a LASER comercial – (Fonte: catálogos da Optech Inc.)



Figura 2 ALS50 II MPI – Multi Pulso (Fonte: catálogos da Leica Geosystems Inc.)

Até a metade dos anos 90, havia apenas uma empresa comercializando sistemas de Perfilamento a LASER e as empresas especializadas nesta tecnologia eram poucas. Em um dos últimos levantamentos de mercado realizados, constataram-se mais de 5 (cinco) fabricantes de sistemas de Perfilamento a LASER que produzem sistemas completos ou os componentes principais deste conjunto e que operam em países como Estados Unidos, Japão, Alemanha, Rússia, Canadá, África do Sul, Austrália, Holanda, Itália, Inglaterra, Noruega e Brasil. Na Figura 2 podemos visualizar o equipamento fabricado pela Leica Geosystems Inc. no ano de 2007– ALS50 II MPI, este equipamento opera com 150 kHz e utiliza tecnologia de multi pulso.

2.2. Características Técnicas do Perfilador a LASER ALS50-II

O Perfilador a LASER Aerotransportado ALS50-II da Leica Geosystems Inc. é um escaner LASER compacto, projetado para a aquisição aérea de dados topográficos e de intensidade de retorno. A tecnologia (LIDAR - *Light Detecting & Ranging*) usada no ALS50-II permite executar um levantamento aéreo mais rápido enquanto aumenta o detalhe de seus resultados.

O sistema é composto basicamente por um multisensor, projetado para obter registros contínuos de coordenadas espaciais que servirão de elementos primários para modelagem do terreno em um mapa topográfico derivado destas informações. Neste sensor está alojado um LASER próximo do infravermelho, sistema de referência inercial, parte ótica e eletrônica do receptor e um *rack* de controle que abriga os componentes do computador.

Um LASER de alta precisão é direcionado para o solo por uma abertura no chão da aeronave, os pulsos varrem a superfície do terreno e registram a distância até o solo para cada feixe emitido.

A varredura permite a cobertura de uma faixa transversal à direção de voo com um ângulo especificado pelo operador, enquanto o movimento da aeronave permite a cobertura na direção de voo.

O tempo gasto para o feixe sair do receptor e refletir no solo é medido e, baseado na velocidade conhecida de luz, pode ser determinada a distância do sensor até o solo. Esta operação pode ser visualizada na Figura 3.

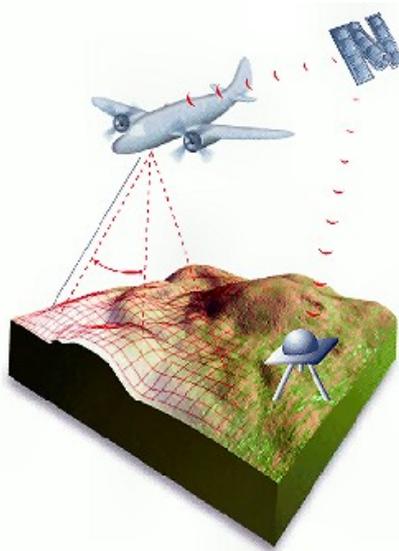


Figura 3. Esquema de levantamento LASER (Fonte: Leica Geosystems Inc.)

Este sistema pode emitir até 150.000 pulsos LASER por segundo e rastrear em um ângulo de abertura máximo de 75°. A alta taxa de pulsos do ALS50-II permite mapear a superfície terrestre com uma densidade significativa de pontos. Sua ótica permite uma abertura de varredura maior quando em vôos mais altos, permitindo ainda a penetração até o terreno mesmo em vales estreitos ou áreas urbanas densas.

Estes equipamentos podem operar de 200m a 6.000m acima do nível de solo. Isto equivale a uma faixa de cobertura com largura máxima de 300m a 9.000m. Os pulsos emitidos podem gerar imagens detalhadas de intensidade mesmo à noite, com neblina ou em outra condição de iluminação que normalmente degradam as fotografias.

Os movimentos da aeronave são registrados por um sistema de referência inercial para pós-processamento.

Um receptor de GPS na aeronave registra a sua posição em intervalos fixos. Outro receptor baseado no solo provê a correção diferencial para uma estimativa de posição mais precisa. Por meio de pós-processamento, as medidas LASER com seus respectivos ângulos, dados de GPS e dados de navegação inercial são combinados para determinar a posição dos pontos varridos na superfície terrestre com precisão.

2.3. Fluxograma de Operação e Processamento do ALS50-II

O Sistema de Perfílamento a LASER ALS50-II é um produto resultante da integração de componentes essenciais para o seu funcionamento. Os equipamentos e programas que formam o ALS são divididos em componentes que estão a bordo da aeronave e aqueles que estão no terreno em tempo real de execução do levantamento ou para pós-processamento. Abaixo, podemos observar um diagrama de funcionamento do ALS – Figura 4.

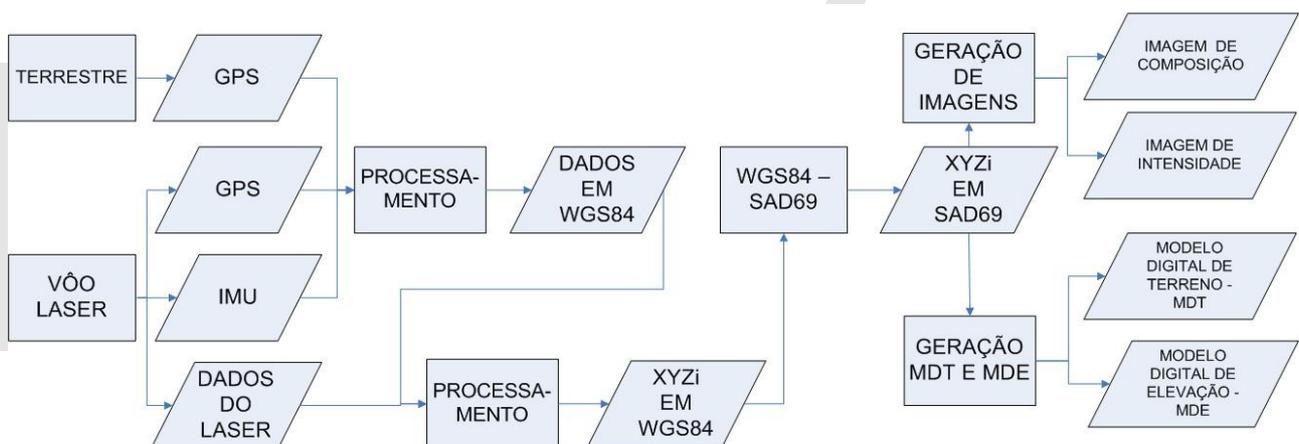


Figura 4. Diagrama de Funcionamento do ALS (fonte: Esteio S.A.)

A bordo de uma aeronave, preparada para este tipo de serviço, os componentes principais são:

- Sensor LASER composto pelo gerador do pulso LASER, ótica de transmissão e recepção do raio, detector de sinal, amplificador e outros componentes eletrônicos;
- Sistema de Medição Inercial (IMU - *Inertial Measurement Unit*);
- Receptor GPS e seus respectivos componentes;
- Computador de bordo e respectivos programas para controlar a aquisição dos dados;
- Unidades de armazenamento dos dados brutos do LASER, do GPS e da Navegação Inercial;
- Receptor GPS para navegação da aeronave.

No solo e em tempo real, o componente principal é o receptor GPS de base, cujo rastreamento será usado na correção diferencial dos pontos medidos pelo LASER. De acordo com as características de extensão e forma da superfície que está sendo mapeada, é necessário mais de uma estação GPS de base.

Completam, o sistema os programas para descarga dos dados brutos do LASER, do GPS e da Medição Inercial e os programas de pós-processamento destes dados para obtenção de produtos derivados do levantamento como: MDE, MDT ou curvas de nível.

Os dados coletados, chamados Dados Brutos (*Raw Data*), são as medidas LASER com seus respectivos atributos, dados do GPS aerotransportado e dados da navegação inercial.

Os equipamentos utilizados no pós-processamento consistem de computadores do tipo PC com boa capacidade de processamento. São requisitos importantes e que têm influência no processo, a velocidade do processador (recomenda-se o uso de duplo ou quádruplo processador), a quantidade de memória e a interface de disco rígido.

Com os dados referente à calibração e à montagem do sistema, ao posicionamento inercial e à medição LASER propriamente dita, é possível o cálculo de um conjunto de pontos perfilados.

Normalmente, o conjunto de pontos apresenta-se como uma "nuvem" cuja distribuição depende do padrão de varredura utilizado. Estes pontos podem ser classificados de acordo com a elevação, com a identificação de pontos sobre o terreno e pontos sobre vegetação ou edificações. Nesta etapa, utilizam-se algoritmos de filtragem, que se encontram em contínuo desenvolvimento.

2.4. Tolerâncias

Os sistemas de Perfilamento a LASER estão sendo continuamente estudados por sub-comitês da (ASPRS - *American Society of Photogrammetry & Remote Sensing*) para definição de normas específicas para calibração e tolerâncias de resultados encontrados, visando contribuir para minimizar as diferentes interpretações existentes em termos de padrões para sistemas LIDAR.

Os resultados obtidos pelos sistemas de Perfilamento a LASER são avaliados desde os primeiros testes de operação. A metodologia de avaliação consiste na comparação do modelo de elevação, derivado dos pontos medidos pelo sistema, com um modelo de elevação obtido por outros métodos, tais como: GPS, Fotogrametria ou outros pontos de controle. As diferenças encontradas em um processo comparativo, com origens sujeitas a erros, devem ser interpretadas de maneira especial.

Os fabricantes de sistemas de Perfilamento a LASER estabelecem como tolerâncias aceitáveis para a qualidade planimétrica dos pontos LASER, após processamento, valores na ordem de $1/5.000 \times H$ a $1/10.000 \times H$ (H é a altura de vôo). Assim, a qualidade planimétrica esperada para uma altura de vôo de 1.000 m seria de 0,20 a 0,10 m e para uma altura de vôo de 3.000 m, seria de 0,60 a 0,30 m, sendo tais valores válidos para 68% (1 sigma) dos pontos testados.

A qualidade vertical é dependente de inúmeros fatores, mas um dos preponderantes é a altura de vôo. Assim, para uma altura de vôo de 1.000 m podemos esperar uma qualidade menor que 0,15 m para cerca de 68% destes pontos. Para 90% dos pontos testados, a precisão vertical é menor que 0,30 m, segundo o fabricante. Neste estudo sobre as várias fontes de imprecisão e sua influência na qualidade dos pontos LASER, ignoram-se os erros de calibração e de pós-processamento GPS e IMU. Também se assume que o terreno perfilado é plano e que os ângulos posicionais são zero. Assim, as únicas variáveis que intervêm na qualidade do perfilamento são a altura de vôo e o ângulo de abertura do perfilamento.

3. Aplicações do Sistema de Perfilamento a LASER em Dutos

Os Modelos Digitais de Terreno, produzidos a partir da tecnologia LASER, são largamente utilizados no planejamento e projeto de construção de dutos, resultando em uma economia considerável, quando comparado com técnicas convencionais de levantamento de dados altimétricos.

Os dados LASER se tornaram um componente integrante no planejamento e projeto, ao administrar avaliações de terra nua, estudos de gerenciamento de risco e levantamentos de faixas de domínio. Os dados podem mostrar detalhes como altura de árvores, mapas precisos de corredores lineares e contornos de edificações em áreas de risco.

Em conjunto com o sensor digital, que opera comprimentos de onda padrão para cor, os sistemas LASER são ideais para aplicações de corredor. Com a imagem incorporada, um registro aéreo do terreno pode indicar uso de terra e qualquer obstáculo para construção. Ao longo de faixas de domínio existentes, pode ser usado para mostrar crescimento de vegetação, cadastro de propriedades e invasões.

As medidas de terreno são críticas para avaliar a viabilidade de construção em uma variedade de terrenos como vales, planícies com ondulações, terrenos fortemente arborizados, desertos, montanhas, colinas, terrenos rochosos ou áreas com pântanos, corpos de água como lagoas, grotas ou rios.

Para planejar a construção de polidutos, estudar faixas existentes ou a cartografia de locais de exploração em larga escala, as empresas de petróleo, precisam de conhecimento preciso da topografia, lançando mão de tecnologias avançadas, como os Sistemas de Perfilamento a LASER.

Para exemplificar esta situação e demonstrar as inovações tecnológicas dos sistemas LASER, são utilizados os mapeamentos de dois trechos de dutos distintos, pertencentes à PETROBRAS (Petróleo Brasileiro S.A.), com características de relevo e densidade de pontos no terreno semelhantes.

O primeiro – GASCAV (Cabiúnas-RJ à Vitória-ES) – teve seu levantamento LASER realizado em 2004, com o equipamento ALTM 2025 da Optech, e o segundo – GASDUC (Cabiúnas-RJ à REDUC-RJ) – foi mapeado em 2007, com o equipamento ALS50-II da Leica.

Ao se comparar os resultados dos mapeamentos obtidos nos levantamentos dos dois trechos, executados por equipamentos de tecnologias e épocas de fabricação diferentes, percebe-se as seguintes vantagens do sistema ALS50-II:

- Aumento da largura das faixas de vôo LASER;
- Compensação de movimento da aeronave (*roll stabilization*);
- Melhor qualidade horizontal dos pontos LASER (1:5.000 de H; 1:10.000 de H);

Os vôos do GASDUC e GASCAV foram programados para que a quantidade de pulsos emitidos pelos sistemas fosse similar (0,3 pontos por metro quadrado) e seus parâmetros estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros dos projetos GASCAV e GASDUC.

Projeto	Equipamento	Pontos por m ²	Largura da Faixa (m)	FOV (°)	Altitude (m)
GASCAV	ALTM 2025	0,3	900	32	1600
GASDUC	ALS50-II	0,3	1900	36	3000

Em relação ao aumento da largura das faixas e compensação de movimento da aeronave, a vantagem do sistema mais moderno é confirmada na Tabela 1, onde a largura da faixa voada é superior, mantendo-se a mesma densidade de pontos por metro quadrado.

A estabilização do vôo ao longo da faixa é outra vantagem apresentada pelo ALS50-II onde a compensação de movimento da aeronave (*roll stabilization*) faz com que o vôo mantenha um movimento linear. A comparação da linearidade da faixa de vôo realizada pelos dois equipamentos é apresentada nas Figuras 9 e 10.

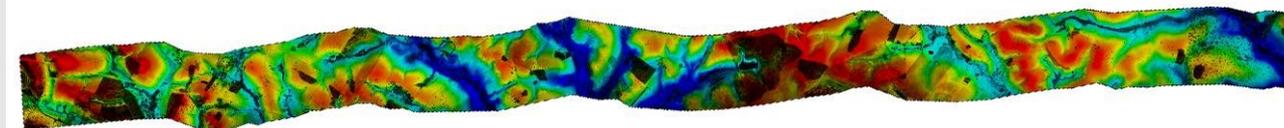


Figura 9. Faixa de vôo GASCAV - 2004 (Fonte: Esteio S.A.).

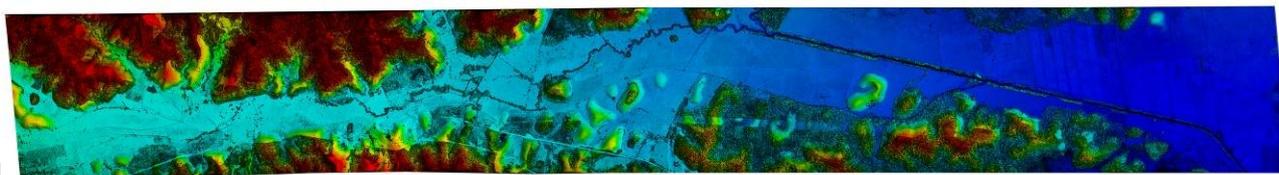


Figura 10. Faixa de vôo GASDUC - 2007 (Fonte: Esteio S.A.).

Já, quanto a melhor qualidade horizontal dos pontos LASER (1:5.000 de H; 1:10.000 de H), as medidas sobre o terreno são críticas para a viabilidade de construção de dutos e para o estudo de faixas existentes, sendo necessário um bom conhecimento da topografia existente. Para isso, a precisão planialtimétrica é cada vez mais importante.

Os equipamentos atuais possuem a qualidade horizontal variando entre 1:5.000 de H e 1:10.000 de H, sendo H a altura de vôo. Nos equipamentos mais antigos a qualidade horizontal varia entre 1:1.000 de H e 1:2.000 de H. Com esta melhoria, podemos realizar vôos cinco vezes mais altos, obtendo-se a mesma precisão planimétrica.

Na Figura 11, podemos observar duas imagens sobrepostas, sendo a imagem maior a porção de uma ortofotocarta gerada na escala 1:1.000, utilizando vôo da câmera digital ADS 40 da Leica. A imagem contida no centro da ortofoto foi gerada a partir da composição hipometria/intensidade LASER, a partir dos pontos levantados pelo ALS50-II. A justaposição destas imagens nos mostra a qualidade planimétrica do levantamento LASER.

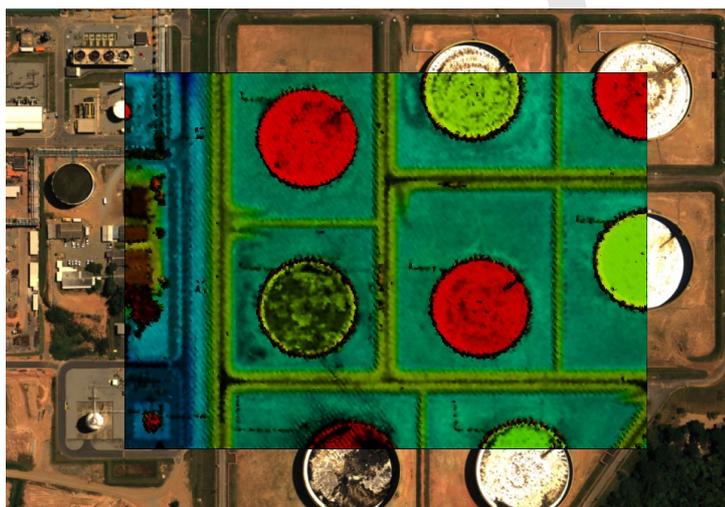


Figura 11. Ortofoto e Composição LASER de vôos GASDUC - 2007 (Fonte: Esteio S.A.).

Em relação à qualidade altimétrica, com base em pontos comuns provenientes de levantamento GPS confrontados com o levantamento LASER, foi realizada a comparação estatística utilizando 20 pontos de controle, para cada trecho de duto, concluindo-se que ambos os equipamentos atingem a precisão esperada para este tipo de mapeamento. A Tabela 2, apresenta os resultados altimétricos comparativos dos levantamentos no GASCAV e GASDUC.

Tabela 2. Comparação altimétrica do MDT com GPS

EQUIPAMENTO	GASDUC	GASCAN
	Leica ALS50 II	Optech 2025
Menor diferença (m)	-0,341	-0,423
Maior diferença (m)	0,464	0,352
Média (m)	0,044	-0,100
Desvio padrão (m)	0,198	0,170
Erro médio quadrático (m)	0,200	0,195

Em outras situações de aplicações do sistema ALS50-II, além das inovações já citadas como o aumento da largura das faixas, a compensação de movimento da aeronave e a melhor qualidade horizontal dos pontos LASER, percebe-se também, a melhoria na qualidade das imagens geradas a partir dos pontos do levantamento e a maior densidade de pontos que melhora a definição do terreno.

A melhor qualidade das imagens geradas a partir dos pontos do levantamento LASER se dá em função da emissão de 150.000 pulsos por segundo ou mais pelos equipamentos atuais, com isto podemos ter uma maior densidade de pontos no terreno. Quanto maior a densidade de pontos melhor será a qualidade das imagens geradas.

Abaixo temos duas imagens que foram geradas a partir dos pontos do levantamento LASER, são imagens de composição, formada pela hipsometria e pela intensidade do pulso LASER. A Figura 5 apresenta uma imagem que possui uma densidade de 3 pontos por metro quadrado e a Figura 6 possui 0,3 pontos por metro quadrado. A diferença é nítida entre as imagens, demonstrando que a Figura 5 possui definição superior dos detalhes.

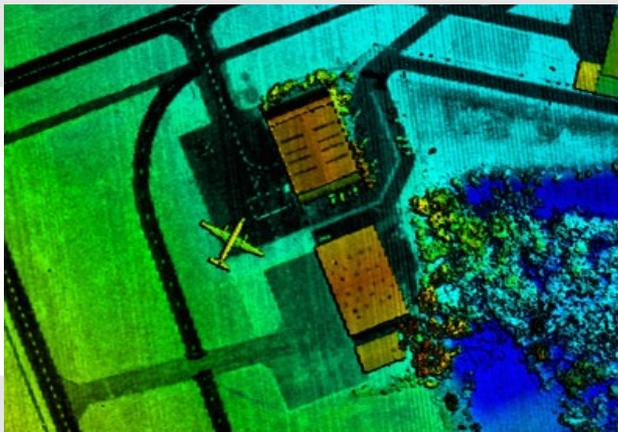


Figura 5. Vão - 3 pontos por metro quadrado
(Fonte: Esteio S.A.).

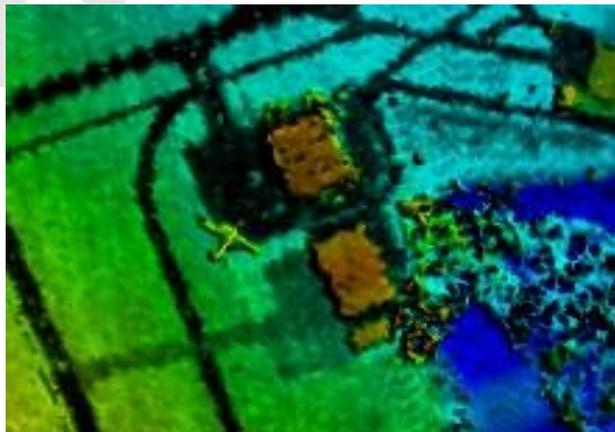


Figura 6. Vão - 0,3 pontos por metro quadrado
(Fonte: Esteio S.A.).

A maior densidade de pontos e a melhor definição do terreno, influenciam diretamente o delineamento do terreno, por ser proporcional à quantidade de pontos adquirida, portanto se o planejamento do vôo for adequado para este objetivo, pode-se evitar a necessidade da geração de linhas estruturais do terreno (*breaklines*). Mesmo em áreas com variações bruscas no formato do terreno, a quantidade de pulsos emitida pelo sistema LASER é tão grande que podemos definir de forma satisfatória a superfície do terreno.

Um exemplo pode ser visualizado na Figura 7, que mostra uma imagem de composição gerada sobre uma região de mineração. Podemos observar sobre a imagem a grande quantidade de pontos obtidos pelo sistema LASER. Na Figura 8 vemos a representação da superfície gerada a partir dos pontos do LASER em perspectiva 3D

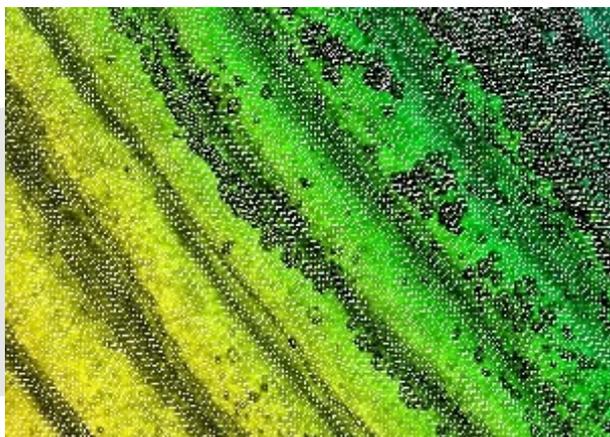


Figura 7. Pontos sobre Composição (Fonte: Esteio S.A.).

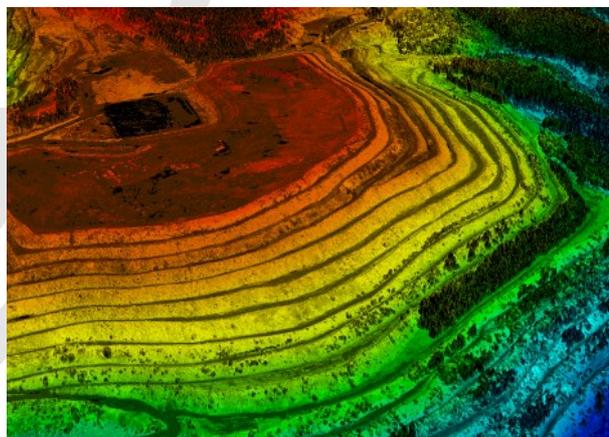


Figura 8. Composição 3D (Fonte: Esteio S.A.).

4. Considerações Finais

Como pode se perceber, o mercado de LASER Aerotransportado apresenta uma grande agilidade em suas inovações tecnológicas, aperfeiçoando cada vez mais a precisão e a capacidade de emissão de pulsos LASER. Em casos de mapeamento de dutos, estas inovações refletem grandes ganhos e vantagens sem prejuízo à precisão, principalmente quando relacionados à questão do ganho de tempo.

Para ilustrar melhor esta evolução, elaborou-se uma tabela comparativa entre alguns Sistemas de Perfilamento LASER, fabricados em datas e por empresas distintas. Os critérios de comparação utilizados são baseados em características comuns a todos os sistemas LASER: altitude operacional, frequência do pulso, ângulo de abertura e padrão de varredura.

Tabela 3. Características evolutivas dos equipamentos a LASER.

EQUIPAMENTO	ALTM 1020 – Optech - 1995	ALTM 3033 – Optech – 2001	ALS50-II –Leica- 2006	ALTM GEMINI – Optech - 2006
Altitude operacional	Até 1200 m	Até 3000 m	200-6000m	80-4000m
Frequência do pulso	5 kHz	33 kHz	150 kHz	167 kHz
Ângulo de abertura	0° - 20°	0° - 20°	10° - 75 °	0° - 50°
Padrão de varredura	Dente de Serra	Dente de Serra	Senoidal	Dente de Serra

O mercado mundial, dos sistemas de perfilamento a LASER obteve um crescimento acelerado nos últimos quatro anos, passando de 82 sistemas em novembro de 2002 para 180 em março de 2007. No Brasil existem quatro sistemas em operação, dois são da Esteio Engenharia e Aerolevantamentos S.A.

Para um futuro próximo, prevê-se que com a criação dos sistemas a LASER de Multi Pulso, a quantidade de pulsos, armazenada pelos futuros sistemas a LASER, dobre ou até triplique.

5. Referências

- , ALS50-II Specifications Brochure, Leica Geosystems Inc., 2006.
- , ALS50-II_User_Manual_Rev- 060519, Leica Geosystems Inc., 2006
- , GEMINI 167 Specifications Brochure, Optech Inc, 2006
- BRANDALIZE, A. A. Perfilamento a LASER: Comparação com Métodos Fotogramétricos. Anais do I Simpósio Brasileiro de Geomática, Presidente Prudente, julho, 2002.
- BRANDALIZE, A. A. Perfilamento a LASER: 10 anos de evolução.... Apresentação, Geobrasil 2006, São Paulo, julho, 2006.
- ROTH, R., LIDAR state of the art and ALS50-II brief impressions, Discussion: LIDAR Digital Elevation Data Acquisition/Processing Flow: A User's Perspective , ASPRS, May, 2006.
- ROTH, R. Airborne LIDAR for Digital Surface Generation overview and highlights of ALS50-II, Workshop 3, Performance, Accuracy, and Cost-effectiveness of Advanced Imaging Sensing Systems for Digital Surface Generation, ASPRS, May, 2006.
- WEVER, C. , LINDEMBERGER, J., Experience of 10 years of LASER Scanning, Schriftenreihe de Institute für Photogrammetrie der Universität Stuttgart, pp. 125-132, 1999.