

Revista Brasileira de Cartografia (2017), Edição de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto, Nº 69/6: 1101-1115  
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto  
ISSN: 1808-0936

## **MODELAGEM DE PARÂMETROS DE UM VANT EQUIPADO COM LIDAR EM APLICAÇÕES DE MONITORAMENTO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

*Modeling Parameters of an UAV Equipped with LiDAR in Powerlines Monitoring Applications*

**Mariana de Oliveira Lage<sup>1</sup>, Laerte Appolinário Júnior<sup>2</sup>,  
Leonardo Ercolin Filho<sup>3</sup>, Linda Lee Ho<sup>4</sup>, Augustinho José Menin Simões<sup>5</sup>  
& José Alberto Quintanilha<sup>2</sup>**

**<sup>1</sup> Universidade de São Paulo – USP**

**Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental**

Av. Prof. Almeida Prado, nº1289 / Cidade Universitária – São Paulo/SP – Brasil – CEP: 05508-070

Tel.: +55 11 3091 2648 | +55 11 3091 3235

mariana\_lage@usp.br

**<sup>2</sup> Universidade de São Paulo – USP**

**Departamento de Engenharia de Transportes**

Av. Prof. Almeida Prado, Travessa 2, nº83 – Edifício Engenharia Civil / Cidade Universitária – São Paulo/SP – Brasil – CEP: 05508-070

Tel.: +55 11 3091 5208 | +55 11 3091 5297

laerte.appolinario@gmail.com | jaquinta@usp.br

**<sup>3</sup> Universidade Federal do Paraná – UFPR**

**Setor de Ciências da Terra – Departamento de Geomática**

Rua Coronel Francisco Heráclito dos Santos, 230 – Jardim Américas / Centro Politécnico – Curitiba/PR – Brasil – CEP: 81531-990

Tel.: +55 41 3361 3161 | +55 41 3361 3456

leonardo.ercolin@ufpr.br

**<sup>4</sup> Universidade de São Paulo – USP**

**Departamento de Engenharia de Produção**

Av. Prof. Almeida Prado, Travessa 2, nº128 / Cidade Universitária – São Paulo/SP – Brasil – CEP: 05508-070

Tel.: +55 11 5525 8751

lindalee@usp.br

**<sup>5</sup> CELEOREDES**

**Departamento de Engenharia e Manutenção**

Av. Mal. Câmara, nº160, Sala 1433 / Centro – Rio de Janeiro/RJ – Brasil – CEP: 20020-080, Tel.: +55 21 3171 7076

augustinho.simoese@celeoredes.com

*Recebido em 16 de Junho, 2017/ Aceito em 16 de Julho, 2017*

*Received on June 16, 2017/ Accepted on July 16, 2017*

## RESUMO

Os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) vem se tornando uma poderosa ferramenta em aplicações de uso civil e militar no campo das Geotecnologias. Em geral, os VANT são equipados com câmeras métricas convencionais ou multiespectrais de pequeno formato e também podem ser equipados com sensores LiDAR (Light Detection And Ranging). Em atividades de monitoramento de linhas de transmissão de energia elétrica, por exemplo, o uso do VANT equipado com sensores LiDAR possibilita monitorar o risco da vegetação existente sob as linhas a partir da classificação automática da nuvem de pontos. Além disso, o uso combinado dos dados de imageamento multiespectral possibilita identificar diferentes tipos de uso e cobertura do solo, bem como a altura da vegetação existente sob as linhas de transmissão. Entretanto, para essas e outras atividades, há uma combinação de parâmetros do VANT e do sensor que deve ser analisada de modo a se obter dados corretamente dimensionados para a aplicação. Dessa forma, o uso de um planejamento de experimentos (em inglês – Design of Experiments – DoE) permite identificar qual(ais) a(s) melhor(es) combinação(ões) de parâmetros para se obter a(s) melhor(es) resposta(s) conforme finalidade de uso. No presente estudo, os critérios para selecionar um experimento são discutidos e um experimento tipo Split-split plot fatorial fracionado  $2 \times 2 \times 2^{3-1}$  é proposto para ser executado devido às características dos fatores. A conclusão é que com o emprego do modelo DoE é possível propor uma combinação de fatores menores que quantidade original, permitindo que esses fatores possam ser avaliados em diversas aplicações.

**Palavras-chave:** VANT, LiDAR, UAV, Monitoramento, Linhas de Transmissão, Experimento Fatorial Fracionado, Experimento Tipo Split-Plot.

## ABSTRACT

Unmanned Aerial Vehicles (UAV) has become a powerful tool for civil and military applications in the field of Geotechnology. In general, the UAVs are equipped with conventional metric or multispectral small format cameras and can also be equipped with LiDAR (Light Detection And Ranging) sensors. In monitoring activities of electric power transmission lines, for example, the use of the UAV equipped with LiDAR sensors allows monitoring the risk of existing vegetation under the lines from the automatic classification of the cloud of points. In addition, the combined use of multispectral imagery data allows the identification of different types of land use and cover, as well as the height of vegetation under transmission lines. However, for these and other activities, there is a combination of UAV and sensor parameters that must be analyzed to obtain correctly sized data for the application. Thus, the use of a Design of Experiments (DoE) allows to identify the best combination(s) of parameters to obtain the best(s) response(s) according to purpose of use. In the present study, the criteria for selecting an experiment are discussed and a split-split plot factorial fractional  $2 \times 2 \times 2^{3-1}$  experiment is proposed to be performed due to the characteristics of the factors. The conclusion is that with the use of the DoE model it is possible to propose a combination of factors smaller than original quantity, allowing these factors to be evaluated in several applications.

**Keywords:** LiDAR, UAV, Monitoring, Transmission Lines, Fractioned Factorial Experiment, Split-Plot Type Designs.

## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil tem uma extensa malha de linhas de transmissão de energia elétrica, cujas linhas na sua maioria estão localizadas distantes dos centros urbanos e em áreas de difícil acesso, o que torna o monitoramento, inspeção e manutenção uma atividade complexa e de alto custo. O monitoramento da vegetação em linhas de transmissão é uma das atividades mais caras no processo de manutenção e também é de suma importância, uma vez que a vegetação é uma das causadoras de interrupções no fornecimento de energia, além de aumentar o risco de incêndios florestais (MATIKAINEN *et al.*, 2016). Perguntas como: Onde estão os possíveis riscos a serem

causados pela vegetação? Como demonstrar ao agente regulador que a conformidade estabelecida está sendo mantida? Como priorizar os trabalhos de campo? podem ser melhor respondidas com o auxílio de novas tecnologias. Neste contexto, o uso de inovações tecnológicas como o VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado) equipado com câmeras multiespectrais e sensores LiDAR (Light Detection And Ranging), que objetivem a redução dos custos e impactos ambientais torna-se cada vez mais necessário (LI *et al.*, 2011, PAN *et al.*, 2015 e PAGNANO *et al.*, 2013). Essas ferramentas possibilitam uma boa relação custo x benefício e vem se tornando cada vez mais eficiente para o monitoramento da altura da

vegetação sob linhas de transmissão, bem como a identificação individual de espécies por meio da análise da área de copa e do estrato florestal (LI *et al.*, 2012). Os autores Holmgren & Persson (2004), Popescu & Wynne (2004), Suárez *et al.* (2005), Chen *et al.* (2004), Koetz *et al.* (2007), Dalponte *et al.* (2008), Giongo *et al.* (2010), Li *et al.* (2012) indicam que o cruzamento de dados de sensores LiDAR com dados de sensores multiespectrais (ou ainda hiperespectrais pois fornecem melhores informações do ambiente), permitem a caracterização da vegetação e a identificação de espécies florestais, uma vez que a análise conjunta de informações de diferentes sensores, atuam de forma complementar (KIM *et al.*, 2009). Um diagrama esquemático de como mapear a vegetação utilizando a tecnologia VANT pode ser encontrado em Kaneko & Nohara (2014).

Atualmente, há uma grande incerteza sobre como especificar, de forma minimamente confiável, a combinação de um VANT e de sensores para se obter dados úteis para a sua finalidade. Informações como altura e velocidade de voo, densidade de pontos, posição do objeto imageado, etc. e, no caso particular de linhas de alta tensão, se pode ser mais seguro voar mais alto ou lateralmente ao corredor determinado pela linha de transmissão.

Recentemente na literatura e mais especificamente em Sensoriamento Remoto, o planejamento de experimentos (ou em inglês “Design of Experiments” – DoE), tem sido usado com a finalidade de otimizar a definição final de uma configuração ou de avaliação da qualidade de produtos finais, por exemplo, utilizando as técnicas de Taguchi (PRADHAN *et al.*, 2016a, b; IDREES e PRADHAN, 2016; GIBRIL *et al.*, 2017). O artigo discute brevemente os diversos critérios de seleção de planos experimentais encontrados na literatura e apresenta uma proposta de um experimento tipo Split-plot fatorial fracionado. Esse experimento considera os possíveis fatores intervenientes para testes da captura de dados obtidos por sensores LiDAR com uma câmera métrica a bordo de um VANT, mostrando o potencial emprego do DoE. Este plano experimental apresenta características similares aos experimentos em teste de protótipos com uma severa restrição de tempo e de orçamento, com um único equipamento e uma única réplica de cada vez

para executar todas as configurações e fatores com dificuldade na execução (em inglês, *hard-to-change factors*).

Este artigo está estruturado da seguinte forma, além desta Introdução: uma revisão bibliográfica sobre VANT, tecnologia LiDAR para classificação de vegetação em linhas de transmissão, bem como câmeras métricas para uso em VANT; uma proposta de metodologia contendo as configurações de imageamento para detecção de vegetação sob linhas de transmissão, empregando um plano experimental e por fim, discussões e conclusões.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

É apresentada uma revisão do estado da arte no âmbito nacional e internacional sobre o uso do VANT equipado com os sensores LiDAR e uma câmera métrica, bem como um exemplo para o monitoramento do crescimento da vegetação sob linhas de transmissão. Uma ideia da rapidez da evolução da tecnologia LiDAR pode ser percebida ao se comparar aos resultados mostrados aqui com aqueles mostrados no artigo de Longhitano *et al.* (2012).

### **2.1 Sobre VANT e UAV**

O termo VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado) é oficialmente aceito e empregado pelas instituições: ICAO (International Civil Aviation Organization), ANAC (Agência Nacional de Aviação Civil) e DECEA (Departamento de Controle do Espaço Aéreo) (KEANE & CARR, 2013). Esse termo não considera somente a terminologia para a aeronave em si, mas é também empregado para um “sistema”, ou seja, inclui, além da aeronave, a estação de controle, o sistema de lançamento, sistema de pouso e demais componentes. Compreende, portanto, todos os elementos configuráveis e necessários que permitam, não só o voo como também o objetivo a ser atingido: comando, controle, comunicação, pouso e decolagem, bem como a prática em si (por exemplo, equipamento sensor acoplado à aeronave). A terminologia vem sendo mudada ao longo dos anos (ANGELOV, 2012), na década de 60 como Remotely Piloted Vehicle (RPV); na década de 90 como Unmanned Aerial Vehicle (UAV); nos anos 2000 como Unmanned Aerial System (UAS). No Brasil, o termo Remotely Piloted Aircraft (RPA) adotado

pela ICAO, ANAC e DECEA, foi traduzido para o português (do Brasil) como Aeronave Remotamente Pilotada (ARP). Assim, como no mercado nacional e internacional, o termo DRONE será utilizado aqui como sinônimo genérico de VANT. Na bibliografia e no mercado nacional e internacional, os VANT são classificados em três tipos:

- Aeronaves asa fixa: trata-se das aeronaves que contém asas e são fixas durante o voo;
- Aeronave dirigível: são aeronaves que se sustentam através de uma grande cavidade que é preenchida com um gás menos denso que o ar atmosférico, como por exemplo o gás hélio ou mesmo o inflamável gás hidrogênio; e
- Aeronave rotor e multirotor: na bibliografia estes podem também ser entendidos como helicópteros e multirrotores, estes últimos também denominados algumas vezes de mini-UAV.

Maiores informações podem ser encontrados em: <http://www.ebc.com.br/tecnologia/2015/02/drones-vants-ou-rpas-entenda-mais-sobre-essas-aeronaves-nao-tripuladas>.

## 2.2 Tecnologia LiDAR: características e uso em classificação de vegetação e monitoramento de linhas de transmissão

O sistema de varredura LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation), também conhecido internacionalmente pela sigla LiDAR (Light Detection And Ranging), é uma tecnologia de Sensoriamento Remoto ativo que permite determinar coordenadas tridimensionais de pontos sobre a superfície terrestre através de pulsos devidamente integrados com informações da trajetória de um Global Navigation Satellite System with Inertial Measurement Unit (GNSS+INS) (maiores detalhes em: WEHR & LOHR, 1999; LILLESAND & KIEFER, 2000; DALMOLIN & SANTOS, 2004; SHAN e TOTH, 2008). O princípio da tecnologia LiDAR se baseia na determinação de coordenadas tridimensionais (X, Y, Z) de pontos por meio da emissão e recepção de pulsos laser bem como a refletância de determinados objetos. As coordenadas tridimensionais dos pontos são determinadas através da medição do tempo entre a emissão e o retorno do pulso

refletido multiplicada pela velocidade da luz, cuja técnica é também conhecida como Time-of-Flight (WEHR & LOHR, 1999 e LILLESAND & KIEFER, 2000). Os pulsos laser são emitidos até a superfície terrestre com uma frequência e padrão de varredura que geralmente são perpendiculares à direção da linha de voo. Além das características de frequência e padrão de varredura, alguns sensores possuem a capacidade de emitir e receber múltiplos retornos de um único pulso laser e essa característica constitui uma poderosa ferramenta de análise de dados pois contribui para a detecção, extração e reconstrução de objetos tridimensionais utilizando nuvem de pontos (SANTOS, 2006).

O LiDAR é um sensor ativo que mede a distância de um feixe de laser refletido. De acordo com Ercolin Filho (2013) e NOAA (2017), existem dois grandes grupos de sensores LiDAR: os aerotransportados e os terrestres, sendo que os terrestres se subdividem em móveis e estáticos e os aerotransportados em topográficos e batimétricos. Os aerotransportados topográficos, objeto de nosso estudo, são utilizados para aplicações de mapeamento de grandes áreas e na captura de dados tridimensionais de grandes áreas como florestas, plantações e áreas urbanas. Os sensores LiDAR podem ser divididos em categorias baseadas na forma de como eles irradiam e recebem o sinal da cena imageada (CHRISTIAN e CRYAN, 2013). Esses autores propõem três grandes grupos: por escaneamento (ou varredura): sistemas que irradiam (iluminam) a cena e recebem o sinal de volta com um único detector; matrizes de detectores (detector arrays): sistemas que irradiam a cena recebem o sinal de volta em uma matriz de detectores e moduladores espaciais de luz (spatial light modulator): sistemas que irradiam partes de uma cena em um padrão e o retorno com um único detector.

Marcoe (2007) resume os princípios de operação do LiDAR topográfico. Outros autores, como Béland *et al.* (2015) sugerem três tipos de sistemas LiDAR que operam sob o mesmo princípio: pulsos laser emitidos que interceptam um alvo e parte da energia emitida é refletida de volta ao equipamento onde ocorre a detecção. No caso utilizam os sistemas: ALS (Airborne Laser Scanning) e TLS (Terrestrial Laser Scanning), anteriormente mencionados e o PCL (Portable Canopy), que necessitam de um operador e gravam dados por perfis, na maioria das vezes

apontando o feixe de laser para cima e têm um custo relativamente baixo. O LiDAR-ALS (Light Detection and Ranging-Airborne Laser Scanner) é um sistema ativo de sensoriamento remoto que opera geralmente na faixa de comprimento de onda do infravermelho próximo (1040nm), composto por equipamentos que, funcionando simultaneamente, são capazes de determinar a posição e a altura de alvos na superfície terrestre (RENSLOW, 2012). O sistema é constituído por três elementos principais: um instrumento emissor e receptor que emite pulsos laser através de um espelho com varredura perpendicular ao plano de voo da aeronave; uma IMU (Inertial Measurement Unit) que registra os movimentos de atitude da aeronave (deriva, rolamento e arfagem) e um receptor GNSS para determinar a posição da trajetória e conseqüentemente a exata posição tridimensional de cada pulso do perfilamento.

Os primeiros retornos são provenientes dos alvos da superfície que possuem maior altitude e os últimos são da própria superfície. Os múltiplos retornos são importantes pois proporcionam a geração de uma variada gama de imagens e modelos digitais de elevação. Após a aquisição é necessário fazer o pós-processamento em softwares capazes de transformar os dados obtidos pelo sistema GNSS+INS em pontos que possuem pares de coordenadas (X, Y) e o atributo da altitude (Z). Segundo Ercolin Filho (2013), “os avanços tecnológicos ocorridos nos sensores laser vem permitindo que múltiplos retornos (ecos) de um único pulso sejam interpretados e armazenados”. Essa tecnologia é conhecida como Full Waveform e possibilita a análise dos diversos ecos de um pulso laser obtendo informações adicionais sobre o objeto refletido. Pesquisas vem sendo direcionadas para o desenvolvimento de metodologias de interpretação do comportamento dos ecos de um pulso laser. O objetivo é identificar padrões de comportamento que possam auxiliar na classificação e detecção de objetos na nuvem de pontos. Os sistemas LiDAR constituem o núcleo de muitos sistemas de mapeamento móvel e eles podem ser categorizados em dois grandes grupos no que diz respeito à aquisição de dados (HU *et al.*, 2013): sistemas que usam LiDAR 3D em stop-scan-match-go-process para criar um mapa 3D do ambiente, juntando vários escaneamentos 3D num mesmo conjunto de coordenadas e onde

não há necessidade de fusão de imagens e o outro grupo é Interlaced, esse modo monta cada passagem do sensor com as metades das linhas da tela, as linhas pares ou ímpares, formando uma ilusão de uma resolução maior e transmitindo apenas metade da imagem formada. As variáveis que relacionam a densidade da nuvem de pontos coletada sobre a superfície são: a frequência do pulso laser, o ângulo de divergência do pulso, a frequência de varredura, a velocidade de voo, o ângulo de varredura, a altura de voo, a topografia do terreno e as propriedades de refletância do objeto (ERCOLIN FILHO, 2013).

O perfilamento LiDAR tem sido utilizado na classificação de vegetais. Yang *et al.* (2015) propuseram um novo método para a extração de vegetação baseado nas dimensões 3D fractais, supondo que as características do alvo podem ser distinguidas com base nas informações morfológicas. Foi alcançado mais de 90% de viabilidade e eficácia do método de identificação da vegetação. Entretanto, a morfologia de algumas árvores curtas é semelhante a arbustos e alguns foram classificados erroneamente como árvores. Ainda segundo os autores, quanto maior for a densidade da nuvem de pontos, melhor serão os resultados, por causa da irregularidade e da rugosidade da morfologia das árvores altas irão tornar-se mais evidente. O método tira proveito das características de morfologia espaciais em 3D de árvores altas para extraí-los a partir dos dados de nuvem de pontos LiDAR, e sua eficiência é comprovada. Eysn *et al.* (2015), desenvolveram uma aplicação em oito áreas de estudo em cinco países alpinos, representando diferentes tipos de floresta. As densidades de pontos adquiridos variaram de 5 pontos /m<sup>2</sup> na Suíça até 121 pontos/m<sup>2</sup> em Pellizzano, Itália. A altura média de voo acima do solo pode variar de 420 m a 800 m para os diferentes voos. Wing *et al.* (2012) fizeram um experimento para saber se as medidas do LiDAR eram influenciadas pelo tipo de dossel e pela inclinação do terreno. Utilizaram um laser scanner Leica ALS 50, o qual permite gravar quatro retornos por pulso laser e tem uma densidade nativa de mais de oito pontos por metro quadrado. Os primeiros resultados indicam que as medidas são influenciadas pelos dois fatores.

No artigo de Paneque-Galvez *et al.* (2014), os autores discutem: (1) a possibilidade de

utilizar VANT/ UAV pequenos, de baixo custo em programas da CBFM (Community-Based Forest Monitoring); (2) as suas potenciais vantagens e desvantagens para as comunidades, organizações parceiras e usuários finais de dados florestais; e (3) em que medida a sua utilização, juntamente com levantamentos de campo e conhecimento ecológico local, seria melhor para o monitoramento da floresta tropical. Utilizaram o Sistema TerraLuma UAV-borne LiDAR desenvolvido pela Universidade da Tasmânia. A plataforma consiste de um multirrotor UAV (OktoKopter Droidworx/MikroKopter AD-8) usado para portar os sensores. O sistema é capaz de carregar mais de 2.8kg durante 3-4 min, o suficiente para cobrir uma área programada até 100m do ponto de origem do voo.

As técnicas clássicas de inventário florestal exigem tempo e recursos e em alguns casos são inviáveis pelas dificuldades de acesso. Os trabalhos já desenvolvidos e publicados indicam que é possível a extração de variáveis dendrométricas como: altura individual e diâmetro de copa a partir dos dados LiDAR, e com isso obter um ganho na precisão das estimativas de volume e biomassa florestal. Quando se avalia o povoamento florestal sob o ponto de vista de manejo, torna-se indispensável conhecer quanto, quando, onde e como será manejado. Através dos dados LiDAR integrados com SIG (Sistemas de Informações Geográficas), torna-se admissível, não somente calcular o volume individual da árvore, como também visualizar sua distribuição espacial em todo o povoamento. Estas informações poderão ser utilizadas em modelos de otimização de prognóstico da produção, além de fornecer parâmetros para avaliações sobre o crescimento da vegetação, mapeamento de sítios florestais e estudos de melhoramento de espécies.

Um dos melhoramentos da tecnologia LiDAR é precisamente a obtenção da altura individual e informações sobre a estrutura das copas, permitindo a inclusão de novas variáveis nos modelos de regressão. Além disso, torna-se possível uma estratificação florestal através da altura, que poderá ser empregada como uma ferramenta auxiliar para definição e alocação das parcelas em campo, reduzindo o erro amostral das estimativas. Dois dos parâmetros florestais mais importantes em estudos de ecologia e de

manejo florestal são o padrão de distribuição e a identificação das espécies de uma determinada área. O valor dessa informação reflete na otimização de tempo e recursos na tomada de decisões. O alcance espectral das imagens hiperespectrais possibilita a geração de curvas características das assinaturas espectrais de cada espécie, viabilizando a diferenciação de uma espécie da outra, como verificado por Alonzo *et al.* (2014) e Fassnacht *et al.* (2014).

Vários autores apresentam resultados promissores do uso conjunto de imagens hiperespectrais com dados de sensores ativos como o LiDAR, por exemplo. Sensores desse tipo são conhecidos por fornecerem informações bastante acuradas acerca do perfil do alvo. Isso se deve pelo fato da tecnologia LiDAR gerar uma representação em três dimensões do objeto, que nas florestas, facilita a visualização da distribuição das árvores e da densidade dos estratos, assim como a mensuração remota dos parâmetros biofísicos. Dalponte *et al.* (2012 e 2014) avalia o uso do LiDAR e das imagens hiperespectrais para a identificação de espécies em florestas nativas, enquanto que Dupuy *et al.* (2013), Ozdemir & Donoghue (2013), Hu *et al.* (2014) e Räsänen *et al.* (2014), descrevem resultados satisfatórios na definição de copas. Outras características estruturais importantes da floresta, como a biomassa da parte aérea, área basal e diâmetro podem ser obtidos por técnicas de modelagem e/ou estimadas a partir de medições diretas (GIONGO *et al.*, 2010).

A estimativa da altura da cobertura florestal pode ser obtida diretamente a partir do processamento dos dados provenientes da varredura laser (NILSSON, 1996). Em áreas de cobertura florestal, O primeiro retorno do pulso laser corresponde, geralmente, aos pontos mais altos das copas das árvores (LIM *et al.*, 2001). Desta forma, o modelo digital de superfície (MDS) pode ser obtido com os pontos mais altos dentro de uma vizinhança definida, existindo diversas variações de metodologias descritas em literatura (SITHOLE e VOSSSELMAN, 2003).

Giongo *et al.* (2010), fornecem uma visão geral das metodologias relacionadas ao LiDAR desenvolvidas nos últimos anos e suas utilizações e aplicações em atividades relacionadas ao

setor florestal. Este artigo ressalta o aumento do número de trabalhos/estudos publicados relacionados com o tema, afirma que o sistema LiDAR tem grande área de aplicação com vantagens sobre as tecnologias utilizadas até o momento, como exemplo sobre as imagens de satélite que tem a necessidade de luminosidade para adquirir as imagens.

Os próximos parágrafos serão dedicados ao uso de LiDAR nas linhas de transmissão. De acordo com Li *et al.* (2011), “o processo convencional de inspeção manual de linhas de transmissão utilizados por muitas empresas de energia, é intensamente trabalhoso, demorado e caro. As tecnologias de sensoriamento remoto representam uma alternativa atraente e de custo para essas atividades de monitoramento.” Os autores apresentam uma pesquisa de monitoramento automático de corredor de linha de transmissão baseado em sensoriamento remoto focado na plataforma fixed-wing para a coleta de dados por via aérea por eles denominado de PTAGS (Powerline Tracking Automatic Guidance System) e um processamento de dados automatizado por reconhecimento de objetos, usando um processo de fusão de informações de múltiplos sensores (LiDAR e imagens ópticas) e descritores da aparência visual (cor e textura).

Pan *et al.* (2015), apresentam um sistema LiDAR para inspecionar linhas de transmissão com o propósito de inspeção e manutenção. O LiDAR é levado por um small UAV (small unmanned helium airship), guiado por GPS e sistema laser para voar automaticamente sobre a linha de transmissão. Segundo os autores, o método oferece fácil acesso e menos risco às pessoas aumentando a eficiência da inspeção a um menor custo.

Pagnano *et al.* (2013) publicaram artigo apresentado o estado-da-arte relativo a duas categorias de robôs, apresentados como soluções para a inspeção de linhas de transmissão, no caso, unmanned aerial vehicles (UAVs) e rolling on wires robots (RWR), para criar o que chamaram de “fully automated power line inspection concept”. Nessa revisão, mencionam um projeto australiano que usa helicópteros para detectar obstáculos e planejar o voo utilizando visão estereográfica e escâner laser para gerar um mapa de ocupação 3D (HRABAR, 2010).

A patente US 7,543,780 B1 de jun. 9,

2009 “Unmanned air vehicle transmission”, usa UAV com GPS e outros equipamentos de navegação para monitorar linhas de transmissão utilizando sensores e fornece uma orientação de como manejar/dirigir o UAV sobre a linha de transmissão.

### **2.3 Câmeras Métricas para VANT**

O modelo de câmera a ser utilizado está diretamente relacionado ao uso previsto para as imagens, ou seja, fins fotogramétricos ou não fotogramétricos. Para fins fotogramétricos é indicado o uso de câmeras profissionais com um conjunto de lentes devidamente calibrado. Além disso, as características de abertura de diafragma e velocidade de obturador deverão ser equivalentes para a aplicação do projeto de modo a não gerar imagens com arrastamento. É necessário também, que o conjunto óptico seja fixo de modo que os parâmetros de orientação interior (distância focal, coordenadas do ponto principal, coeficientes de distorção radial simétrica e descentrada) sejam determinados no processo de calibração e permaneçam inalterados.

Em função da aplicação em tela, que consiste em análise de vegetação, o uso de câmeras multispectrais (RGB+NIR) é mais indicado pois possibilita uma análise mais detalhada da cobertura através de índices como o NDVI. Algumas câmeras possuem esta capacidade de georreferenciamento, porém sabidamente com precisão não suficiente para utilização técnica, apenas de referência.

Com uso do GNSS+INS integrado a um FMS (Flight Management System), é possível que o tempo GPS de disparo e captura das imagens seja obtido com precisão e o mesmo possa ser utilizado para extrair informações de posição e atitude da trajetória GNSS+INS.

A resolução geométrica está diretamente relacionada à distância focal e a altura de voo que resulta na resolução de um pixel no terreno, também conhecido como GSD (Ground Sample Distance). Resoluções geométricas acima de 20MP poderão ser utilizadas nesse tipo de aplicação.

É improvável que todas as fotografias possuam a mesma exata altitude. Nesse caso é necessário um estudo técnico para verificar capacidade de correção em pós-processamento. Especificamente para o processamento fotogra-

métrico, variações significativas de escala podem comprometer a qualidade dos resultados.

O controle do disparo (Trigger) é feito através de um FMS e um plano de voo com as posições de tomada das imagens. Para os fins propostos, o foco da câmara óptica deverá ser fixado no infinito e o tempo mínimo entre disparos será dado via FMS.

O artigo de O'Connor e Smith (2016) trata de câmeras para UAV, resume o que de mais atual existe nesse assunto. O link para acesso à revista eletrônica é: <https://issuu.com/geomarespublishing/docs/gim-international-october-2016/1?e=0>.

### **3. METODOLOGIA PROPOSTA: DELINEAMENTO DE EXPERIMENTOS NA DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DO SENSOR LIDAR PORTADO POR VANT EM LEVANTAMENTO DE DADOS**

Design ou planejamento de experimentos tem sido largamente aplicado na indústria de manufatura há muitas décadas (BOX, HUNTER & HUNTER, 2005). No caso das indústrias, as empresas precisam inovar e novos produtos ou materiais com alta qualidade devem ser lançados ou melhorados em um curto período de tempo. No entanto, pode ser que haja uma falta de compreensão das propriedades de novos processos, produtos e materiais e, nessas circunstâncias, o projeto de experimentos (DoE) tem sido usado como ferramenta para adquirir conhecimento de seu desempenho especialmente para rastreamento e caracterização (LACEY & STEELE, 2006, MIZUYAMA, 2005).

Brevemente, o DoE consiste de quatro etapas básicas: identificação de recursos disponíveis, seleção de fatores potenciais, definição de intervalos plausíveis para cada fator e escolha de um projeto experimental, que inclui o número de provas que satisfazem as restrições operacionais. Após a execução do experimento, os dados devem ser analisados em consonância com o plano executado. A falta de uma compreensão clara das características reais do desenho empregado pode levar a conclusões erradas. As conclusões do experimento são usadas como entradas guias para a próxima implementação (como por exemplo, novas experiências, controle de processo estatístico ou novos procedimentos operacionais padrão).

Assim, maus planejamentos e/ou análises deficientes podem conduzir a resultados sub-ótimos. Na prática, é comum o uso de abordagens ad-hoc para criar experiências, o que custa tempo e dinheiro (KOWALSKI *et al.*, 2002; MONTGOMERY, 2009).

Em novos processos, produtos e materiais, devido à falta de informação das propriedades do produto/material/processo, experimentos com muitos fatores são feitos como uma forma de realizar uma seleção dos fatores mais relevantes. Este tipo de experimento é conhecido como experimentos de triagem (em inglês screening experiments) e na grande maioria das vezes executados utilizando fatores com dois níveis através de um experimento fatorial completo ou fracionado, porém, sem replicação e sem restrição quanto à aleatorização. A análise de dados provenientes deste tipo de experimento pode ser feita através de um único gráfico de probabilidade (normal probability plot). Devido à não replicação dos tratamentos, ferramentas como teste de hipótese ou análise de variância não podem ser utilizadas.

Além disto, em muitos experimentos industriais, é comum ter experimentos cuja troca de níveis de alguns fatores pode apresentar uma certa dificuldade na sua execução (em inglês hard-to-factor experiments), introduzindo restrições na aleatorização. Na literatura tais experimentos são referenciados como experimentos tipo Split-plot. O uso de um experimento completamente aleatorizado demandaria muito tempo e/ou dispenderia muitos recursos. Para exemplificar, considere um experimento de preparação de um bolo com apenas dois fatores: temperatura (a 250°C, 180°C), xícaras de açúcar (1, 1.5) totalizando quatro condições experimentais e apenas um forno está disponível para executar o experimento. O cozimento dos bolos das duas condições experimentais (uma com 1 xícara e outra com 1.5) a 250°C e depois as outras duas condições a 180°C economizaria substancialmente o tempo de execução do experimento ao invés de assar um a 250°C e ter de esperar baixar a temperatura do forno a 180°C para assar o bolo seguinte.

Neste artigo, é apresentada uma proposta para identificar parâmetros do sensor LiDAR portado por VANT em levantamento de dados através de um delineamento de experimentos



para monitorar a vegetação nas faixas de passagem e sob as linhas de transmissão. As informações da linha de transmissão foram fornecidas pela CELEO Redes: (1) a linha de transmissão piloto é de 500kV; (2) a faixa de servidão tem uma largura total de 80m, sendo

40m para cada lado do eixo da linha; (3) o ponto mais alto da torre de transmissão é o cabo para-raios que está a cerca de 40m de altura em relação ao solo; (4) a distância entre torres é de cerca de 500m. O trabalho foi dividido em etapas, conforme fluxograma da Figura 1.

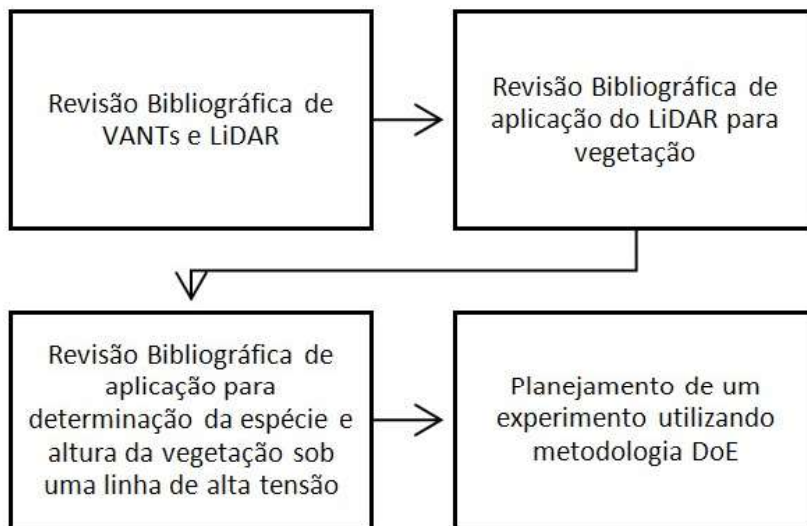


Fig. 1 – Fluxograma da Metodologia.

Na literatura, existem vários critérios para escolher os planos experimentais. O mais conhecido é a máxima resolução (BOX, HUNTER & HUNTER, 2005; WU & HAMADA, 2011). Contudo para discriminar melhor os planos, é necessário considerar outros critérios como aberração mínima (em inglês Minimum Aberration (MA)) e efeitos livres (em inglês, Clear Effects) (maiores detalhes em WU & HAMADA, 2011). Entre estes dois, MA é o critério mais popular para comparar e escolher experimentos fatoriais fracionados. Recentemente um outro critério adicional denominado Configuração Mínima (em inglês, Minimum Setup (MS)) foi proposto por Lee Ho *et al.* (2016) com o objetivo de minimizar o número de configurações associado aos fatores com dificuldade de trocar os níveis em teste de protótipos usado em planos fatoriais regulares. Para exemplificar o critério Configuração Mínima considere dois planos Split-plot d1 e d2 de 32 provas com 8 fatores classificados em dois níveis de dificuldade (com 4 fatores mais difíceis e 4 sem dificuldade de trocar os níveis):

- Plano d1:  $2^4 \times 2^{4-3}$  com geradores definidos por F=ABE; G=ACE; H+BCDE. Seu grupo de contraste definidor é dado por:

$$I = ABEF = ACEG = BCDEH = BCFG = ACDFH = ABDGH = DEFGH$$

- Plano d2:  $2^{4-1} \times 2^{4-2}$  com geradores definidos por D=ABC; G=ABE; H=ACEF. Seu grupo de contraste definidor é dado por:

$$I = ABCD = ABEG = ACEFH = CDEG = BDEFH = BCFGH = ADFGH$$

Os planos d1 e d2 têm a mesma resolução, o mesmo número de provas (32 provas), são planos não isomorfos de aberração mínima com o mesmo padrão de grupo de contraste definidor, ou seja, são três efeitos de interação de quarta ordem confundidos (plano d1: ABEF=ACEG=BCFG e no plano d2: ABCD=ABEG=CDEG) e quatro efeitos de interação de quinta ordem confundidos (plano d1: BCDEH=ACDFH=ABDGH=DEFGH e no plano d2: ACEFH=BDEFH=BCFGH=ADFGH). Portanto usando os critérios de resolução e aberração mínima os dois planos não são distinguíveis. Contudo, se levar em consideração o critério de configuração mínima, é favorável ao plano d2, visto que no plano d1 são 16 ( $2^4$ ) configurações no primeiro estágio e no plano d2 são 8 ( $2^{4-1}$ ) configurações. Desta forma, o critério de menor número de configurações pode

ajudar a diferenciar planos com mesmo padrão de contraste definidor.

Agora considere os planos d3 e d4 com 16 provas e 5 fatores classificados em dois graus de dificuldade:

- Plano d3:  $2^3 \times 2^{2-1}$  com gerador definido por  $E=ABCD$ . Seu grupo de contraste definidor é:  $I=ABCDE$
- Plano d4:  $2^{3-1} \times 2^2$  com gerador definido por  $C=AB$ . Seu grupo de contraste definidor é:  $I=ABC$

O plano d3 é de resolução V, enquanto o d4 é de resolução III; os padrões dos grupos de contraste definidor são diferentes (d3 tem um elemento de quinta ordem e o d4 um de terceira ordem). Usando o critério de resolução ou de mínima aberração, é favorável ao plano d3. No entanto, se considerar o critério mínimo de configurações como critério de escolha, é favorável à escolha do experimento d4 visto que apresenta menor número de configurações no primeiro estágio (quatro configurações) ao passo que no plano d3 são 8 configurações no primeiro estágio.

A equipe selecionou cinco fatores a saber: Tipo de VANT, tipo de sensor e três fatores relacionados com voo: altura, velocidade e local. Tabela 1 estão os fatores identificados pela equipe com os respectivos níveis (com os códigos -1 e +1) para monitorar a vegetação nas faixas de passagem e sob as linhas de transmissão utilizando VANT.

Também considerou que era viável executar oito provas nesta etapa exploratória e descartou o uso de experimento completamente aleatorizado devido à dificuldade de trocar os tipos de VANT e sensores. Neste experimento a equipe avaliou que os fatores podem ser classificados em três graus de dificuldade (muito difícil, dificuldade mediana, muito fácil) para trocar os níveis. Com estas restrições, só é possível incluir planos de resoluções III (ou seja, existem efeitos dos fatores principais confundidos com interações de segunda ordem – ver Tabela 3) porém todos os planos apresentam o mesmo padrão de grupo definidor de contraste (não exibido aqui).

Tabela 2 mostra todas as possibilidades de classificação dos cinco fatores, o tipo de Split-plot e o número de configurações. Pode-se observar os planos apresentados na Tabela 2 se diferenciam em relação ao número de configurações.

Tabela 1: Fatores do experimento e os respectivos níveis.

Fator	Descrição do fator	Níveis dos Fatores
A	Tipo de VANT	6 hélices (-1); 8 hélices (+1)
B	Sensor	LiDAR (V16) (-1); Velodyne (32) (+1)
C	Altura	50m (-1); 100 m (+1)
D	Velocidade do voo	15 km/h (-1); 50 km/h (+1)
E	Local do voo	Perpendicular à linha de alta tensão (-1); deslocado lateralmente de 40m (+1).

A equipe se reuniu e considerou que apenas o fator A – Tipo de VANT foi considerado o maior grau de dificuldade de trocar; o fator B – Sensor foi considerado como fator com uma mediana dificuldade de trocar os níveis e os fatores C, D e E foram considerados igualmente fáceis de trocar os níveis dos fatores. Isto equivale ao plano p1 da Tabela 2 com número de configurações 2:4:8 nos vários estágios. Escolhido o número de provas igual a oito e um experimento com 5 fatores (todos com 2 níveis), será necessário escolher os três fatores base (vide Box, Hunter & Hunter, 2005). No caso do plano 1, os fatores: A, B e C podem ser designados como base e os fatores D e E confundidos respectivamente com as interações AB e AC, o que resulta os seguintes grupos de aliases dispostos na Tabela 3. Este experimento é  $2 \times 2 \times 2^{3-2}$  e o número de configurações por estágio dado por 2:4:8, é de Resolução III (ver Tabela 2). Maiores detalhes sobre a designação do grau resolução de um experimento, ver Wu e Hamada, 2011.

Uma possível configuração deste experimento está apresentada na Tabela 4.

Realizado o experimento, sua análise deve ser procedida. Como é um experimento sem réplica, novamente, o uso de teste de hipótese e ou análise de variância não poderão empregados. A análise também deverá ser feita através de gráficos de probabilidade, necessitando alguns ajustes visto ser agora um experimento do tipo *Split-plot*. Os efeitos com a mesma variância deverão estar dispostos no mesmo gráfico necessitando mais de um gráfico de probabilidade, a saber: Gráfico 1 – apenas o

efeito do fator A; Gráfico 2 – apenas os efeitos do fator B e interação AB; Gráfico 3 – efeitos C, D, E, AC, AD, AE, BC, BD, BE, CD, CE, DE, ABC, ABD, ABE, ACD, ACE, ADE, BCD, BCE, BDE, CDE, ABCD, ABCE, ABDE, ACDE, BCDE, ABCDE.

Tabela 2: Planos possíveis com 5 fatores com 3 graus de dificuldade.

Plano	Muito	Mediana	Fácil	Experimento Split-split-plot	# de Configurações
p1	1	1	3	2x2x23-1	2:4:8
p2	1	2	2	2x22-1x22-1	2:4:8
p3	1	3	1	2x23-1x22-1	2:8:8
p4	2	1	2	22x21-1x22-1	4:4:8
p5	2	2	1	22x22-1x21-1	4:8:8
p6	3	1	1	23x21-1x21-1	8:8:8

Tabela 3: Grupo de aliases

Grupo	Aliases
1	I=ABD=ACE=BCDE
2	A=BD=CE=ABCDE
3	B=AD=CDE=ABCE
4	C=AE=BDE=ABCD
5	D=AB=BCE=ACDE
6	E=AC=BCD=ABDE
7	BC=DE=ACD=ABE
8	CD=BE=ADE=ABC

Tabela 4: Plano experimental com 8 provas- Fatores base A, B e C.

Dificuldade	Muito	Pouco	Nenhuma		
			Fator A	Fator B	Fator C
1	8 hélices (+1)	LiDAR (V16) (-1)	50m (-1);	15 km/h (-1)	Perpendicular (-1)
2	8 hélices (+1)	LiDAR (V16) (-1)	100 m (+1)	15 km/h (-1)	Deslocado (+1)
3	8 hélices (+1)	Velodyne (32) (+1)	100 m (+1)	50 km/h (+1)	Deslocado (+1)
4	8 hélices (+1)	Velodyne (32) (+1)	50m (-1);	50 km/h (+1)	Perpendicular (-1)
5	6 hélices (-1)	Velodyne (32) (+1)	50m (-1);	15 km/h (-1)	Deslocado (+1)
6	6 hélices (-1)	Velodyne (32) (+1)	100 m (+1)	15 km/h (-1)	Perpendicular (-1)
7	6 hélices (-1)	LiDAR (V16) (-1)	50m (-1);	50 km/h (+1)	Deslocado (+1)
8	6 hélices (-1)	LiDAR (V16) (-1)	100 m (+1)	50 km/h (+1)	Perpendicular (-1)

Identificados os fatores relevantes, estimativas da resposta das configurações não executadas podem ser estimadas e daí determinar qual combinação dos 5 fatores que fornecerá a melhor resposta conforme o uso.

Salienta-se que o enfoque principal deste trabalho é debater sobre a escolha de um plano apropriado com restrição de tempo, orçamento e material.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste artigo, uma proposta metodológica empregando um delineamento de experimento para identificar qual(ais) a(s) melhor(es) combinação(ões) dos níveis dos parâmetros em teste que fornecerá a(s) melhor(es) resposta(s) a ser utilizada um levantamento de dados empregando um VANT foi apresentada. Um experimento do tipo Split-plot fracionado fatorial  $2 \times 2 \times 23 - 1$  com 3 graus de dificuldade (explicitamente um Split-split-plot), ilustrou o procedimento, porém, este pode ser facilmente estendido para outros tipos de planos experimentais. Um catálogo deste tipo de experimento pode ser encontrado em Lee Ho *et al.* 2016. Por exemplo, experimentos tipo Split-plot (ou não) fatoriais com fatores com número de níveis maiores que dois pois nem sempre é possível acomodar os níveis de interesse de um fator em dois níveis. Ou em experimentos do tipo Split-strip plot, como em muitos experimentos industriais em fase inicial ainda de projeto, poucos protótipos, poucas peças estão disponíveis na execução do experimento e há necessidade de reuso do mesmo protótipo na realização de outro experimento. Com isto há introdução de uma dependência entre as realizações com a mesma peça.

#### 5. CONCLUSÃO

Foi apresentada uma breve revisão bibliográfica sobre VANT, tecnologia LiDAR para classificação de vegetação e linhas de transmissão e das câmeras métricas para uso em VANT. Além disso, foi desenvolvida uma aplicação de uso de DoE otimizado para a captura de dados obtidos por sensores LiDAR e câmera métrica contendo as configurações de possível imageamento para detecção de vegetação sob linhas de transmissão.

Foi mostrada a importância do uso da técnica DoE, principalmente num momento de

incerteza quanto ao melhor uso combinado de VANT e sensores LiDAR. O modelo apresentado aqui, pode ser ampliado caso se considere um experimento maior considerando, por exemplo, o uso simultâneo de sensores LiDAR e ópticos, “acoplados”, o que aumentaria substancialmente o peso, a velocidade e o tempo de voo (bateria e memória) ou voos independentes, que implicaria em registro, outros processamentos, etc. No exemplo utilizado, o uso do DoE permitiu a comparação de 8 cenários, mas com resultados que podem ser generalizados para outros 24 possíveis resultados, num total de 32 experimentos.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - EPUSP, ao Conselho Nacional de Pesquisa - CNPq, à FDTE/CeleoRedes e ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica)/P&D (Pesquisa e Desenvolvimento) pelo suporte financeiro e cessão das informações do problema abordado.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALONZO, M.; BOOKHAGEN, B.; ROBERTS, D.A. Urban tree species mapping using hyperspectral and LiDAR data fusion. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 148, p. 70-83, 2014.

ANGELOV, P. **Sense and Avoid in UAS: Research and Applications**. John Wiley & Sons, p. 345, 2012.

BÉLAND, M., BALDOCCHI, D.D., WIDLOWSKI, J.L., FOURNIER, R.A., VERSTRAETE, M.M. On seeing the wood from the leaves and the role of voxel size in determining leaf area distribution of forests with terrestrial Lidar. **Agric. For. Meteorol.** v.184, p.82-97, 2015.

BOX, G. E., HUNTER, J. S., HUNTER, W. G. **Statistics for experimenters: design, innovation, and discovery**. 2<sup>nd</sup> Ed. Chapter 6, p. 235-280. New York: Wiley-Interscience. 2005.

CHEN, L. C., TEO, T. A., SHAO, Y. C., LAI, Y. C., RAU, J. Y. Fusion of LIDAR data and optical imagery for building modeling. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.35(B4), p.732-737, 2004.

- CHRISTIAN, J. A.; CRYAN, S. **A Survey of LiDAR Technology and its Use in Spacecraft Relative Navigation**. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2013. Disponível: [ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20140000616.pdf](https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20140000616.pdf). Acesso: 28 de outubro de 2016.
- DALMOLIN, Q.; SANTOS, D. R. **Sistema laser scanner: Conceitos e princípios de funcionamento**. 3a Edição, Editora UFPR, 97p. Curitiba, 2004.
- DALPONTE, M., BRUZZONE, L., GIANELLE, D. Fusion of hyperspectral and LiDAR remote sensing data for classification of complex forest areas. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.46, n.5, p.1416-1427, 2008.
- DALPONTE, M., BRUZZONE, L., GIANELLE, D. Tree species classification in the Southern Alps based on the fusion of very high geometrical resolution multispectral/hyperspectral images and LiDAR data. **Remote Sensing of Environment**, v.123, p.258-270, 2012.
- DALPONTE, M.; ØRKA, H.O.; ENE, L.T.; GOBAKKEN, T.; NÆSSET, E. Tree crown delineation and tree species classification in boreal forests using hyperspectral and ALS data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 140, p. 306-317, 2014.
- DUPUY, S.; LAINÉ, G.; TASSIN, J.; SARRAILH, J-M. Characterization of the horizontal structure of the tropical forest canopy using object-based LiDAR and multispectral image analysis. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, London, v. 25, p. 76-86, 2013.
- ERCOLIN FILHO, L. **Inovações tecnológicas do sistema laser**, MundoGEO#Connect Latin América - Conferência e Feira de Geomática e Soluções Geoespaciais 18 a 20 de junho de 2013 – Centro de Convenções Frei Caneca – São Paulo, Brasil, 22p, 2013.
- EYSN, L.; HOLLAUS, M.; LINDBERG, E.; BERGER, F.; MONNET, J-M.; DALPONTE, M.; KOBAL, M.; PELLEGRINI, M.; LINGUA, E.; MONGUS, D.; PFEIFER, N. A. Benchmark of LiDAR-Based Single Tree Detection Methods Using Heterogeneous Forest Data from the Alpine Space. **Forests**, v.6, n.5, p. 1721-1747; 2015.
- FASSNACHT, F.E.; NEUMANN, C.; FÖRSTER, M.; BUDDENBAUM, H.; GHOSH, A.; CLASEN, A.; JOSHI, P.K.; KOCH, B. Comparison of feature reduction algorithms for classifying tree species with hyperspectral data on three central european test sites. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, New York, v. 7, n. 6, p. 2547-2561, 2014.
- GIBRIL, M. B. A., SHAFRI, H. Z., HAMEDIANFAR, A. (2017). New semi-automated mapping of asbestos cement roofs using rule-based object-based image analysis and Taguchi optimization technique from WorldView-2 images. **International Journal of Remote Sensing**, v.38, n.2, p.467-491, 2017.
- GIONGO, M., KOEHLER, H.S., MACHADO, S. A., KICHNER, F. F., MARCHETTI, M. LiDAR: princípios e aplicações. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v.30, n.63, p. 231-244, 2010.
- HOLMGREN, J., PERSSON, Å. Identifying species of individual trees using airborne laser scanner. **Remote Sensing of Environment**, 90, 415-423. 2004.
- HRABAR, S., MERZ, T., FROUSHEGER, D., Development of an Autonomous Helicopter Aerial Power Line Inspection. **Proceedings**. 1st. International Conference on Applied Robotics for the Power Industry (CARPI 2010), Montreal, Canada, 2010. 1-6.
- HU, S.; HEN, C.; ZHANG, A.; SUN, W.; ZHU, L. A small and light autonomous laser mapping systems without GPS. **Journal of Field Robotics**, v.30, n.5, p.784-802, 2013. DOI: 10.1002/rob.21465.
- HU, B.; LI, J.; JING, L.; JUDAH, A. Improving the efficiency and accuracy of individual tree crown delineation from high-density LiDAR data. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, London, v. 26, p. 145- 155, 2014.
- IDREES, M. O., PRADHAN, B. (2016). Hybrid Taguchi-Objective Function optimization approach for automatic cave bird detection from terrestrial laser scanning intensity image. **International Journal of Speleology**, v.45, n.3, p.289, 2016.

- KANEKO, K., NOHARA, S. Review of Effective Vegetation Mapping Using the UAV (Unmanned Aerial Vehicle) Method. **Journal of Geographic Information System**, v.6, p. 733-742, 2014.
- KEANE, J.F.; CARR, S.S. **A brief history of early unmanned aircraft**. In: JOHNS HOPKINS APL TECHNICAL DIGEST, VOLUME 32, NUMBER 3, p. 558-571. Disponível em: <https://www.law.upenn.edu/live/files/3887-keane-and-carr-a-brief-history-of-early-unmanned>. Acesso em: 28 de outubro de 2016.
- KIM, S.; MCGAUGHEY, R.J.; ANDERSEM, H.-E.; SCHREUDER, G. Tree species differentiation using intensity data derived from leaf-on and leaf-off airborne laser scanner data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 113, n. 8, p. 1575- 1586, 2009.
- KOETZ, B., SUN, G., MORSDORF, F., RANSON, K., KNEUBUHLER, M., ITTEN, K. AND ALLGÖWER, B.
- Fusion of imaging spectrometer and LIDAR data over combined radiative transfer models for forest canopy characterization. **Remote Sensing of Environment**, 106, 449-459. 2007.
- KOWALSKI, S. M.; CORNELL, J. A.; VINING, G. G. "Split-Plot Designs and Estimation Methods for Mixture Experiments with Process Variables". **Technometrics** 44, pp. 72–79. 2002.
- LACEY, D., STEELE, C. The use of dimensional analysis to augment design of experiments for optimization and robustification. **Journal of Engineering Design**, 17(1), 55-73. 2006.
- LEE HO, L., VIVACQUA, C. A., SANTOS DE PINHO, A. L. (2016). Minimum Setup Minimum Aberration Two-level Split-plot Type Designs for Physical Prototype Testing. **Quality and Reliability Engineering International**. V 32, p. 1007–1020, 2016.
- LI, Z.; BRUGGEMANN, T. S.; FORD, J. J.; MEJIAS, L.; LIU, Y. Toward automated power line corridor monitoring using advanced aircraft control and multisource feature fusion. **Journal of Field Robotics**, v. 29, n.1, pp. 4-24. Dec. 2011.
- LI, W.; GUO, Q.; JAKUBOWSKI, M.K.; KELLY, M. A new method for segmenting individual trees from the LiDAR point cloud. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda, v. 78, n. 1, p. 75-84, 2012.
- LILLESAND, T.M.; KEIFER, R.W (2000): **Remote Sensing and Image Interpretation**. John Wiley & Sons, Nova York, pp. 568-575.
- LIM, K.; TREITZ, P.; GROOT, A.; ST-ONGE, B. Estimation of individual tree heights using LiDAR remote sensing. In: CANADIAN SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING, 23., 2001, Québec. **Proceedings...** Ottawa: Canadian Aeronautics and Space Institute, p.243-250, 2001.
- LONGHITANO, G. A.; GIANNOTTI, M. A.; QUINTANILHA, J. A. Veículos Aéreos não Tripulados (VANTs): ferramenta para captura de dados da superfície terrestre. **Inovação! Brasileiros**, São Paulo, p. 1 - 7, 21 dez. 2012.
- MARCOE, K. **LiDAR: An introduction and overview**. GEOG581, Fall 2007. Portland State university. Disponível em: [http://web.pdx.edu/~jduh/courses/Archive/geog481w07/Students/Marcoe\\_LiDAR.pdf](http://web.pdx.edu/~jduh/courses/Archive/geog481w07/Students/Marcoe_LiDAR.pdf) Acesso em: 28 de outubro de 2016.
- MATIKAINEN, L., LEHTOMÄKI, M., AHOKAS, E., HYYPPÄ, J., KARJALAINEN, M., JAAKKOLA, A., KUKO, A., HEINONEN, T. Remote sensing methods for power line corridor surveys. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 119, p.10-3, 2016.
- MIZUYAMA, H. Statistical robust design of a complex system through a sequential approach. **Journal of Engineering Design**, 16(2), 259-276, 2005.
- MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. Chapter 13, 563 – 616. John Wiley & Sons. 2009.
- NILSSON, M. Estimation of Tree Heights and Stand Volume Using an Airborne LiDAR System. **Remote Sensing of Environment**, v. 56, p. 1-7, 1996.
- NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) *What is LIDAR?* <https://oceanservice.noaa.gov/facts/lidar.html>. 2017.
- O'CONNOR, J.; SMITH, M. Selecting cameras for UAV surveys. **GIM International**, p.34-37, 2016.
- OZDEMIR, I.; DONOGHUE, D.N.M. Modelling

- tree size diversity from airborne laser scanning using canopy height models with image texture measures. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 295, p. 28-37, 2013.
- PAN, W.W.; DOU, Y.J.; WANG, G.L.; WU, M.X.; REN, R.G.; XU, X. Development and test of blimp-based compact LiDAR power-line inspection system. The **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v.3, n.2, 155- 159. 2015.
- PANEQUE-GALVEZ J, MCCALL MK, NAPOLETANO BM, WICH SA, KOH LP. Small drones for community-based forest monitoring: An assessment of their feasibility and potential in tropical areas. **Forests**. v. 5, p.1481–1507, 2014.
- PAGNANO, A., HÖPF, M., TETI, R. A roadmap for automated power line inspection. Maintenance and repair. **Proc. 8th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering**, v. 12, p. 234 – 239, 2013.
- POPESCU, S.C.; WYNNE, R.H. Seeing the trees in the forest: using LiDAR and multispectral data fusion with local filtering and variable window size for estimating tree height. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda, v. 70, n. 5, p. 589-604, 2004.
- PRADHAN, B., TEHRANY, M. S., JEBUR, M. N. A New Semiautomated Detection Mapping of Flood Extent from TerraSAR-X Satellite Image Using Rule-Based Classification and Taguchi Optimization Techniques. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.54, n.7, p.4331-4342, 2016a
- PRADHAN, B., JEBUR, M. N., SHAFRI, H. Z. M., TEHRANY, M. S. Data fusion technique using wavelet transform and Taguchi methods for automatic landslide detection from airborne laser scanning data and quickbird satellite imagery. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.54, n.3, p.1610-1622, 2016b.
- RÄSÄNEN, A.; KUITUNEN, M.; TOMPPONEN, E.; LENSU, A. Coupling high-resolution satellite imagery with ALS-based canopy height model and digital elevation model in object-based boreal forest habitat type classification. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, London, v. 94, p. 169-182, 2014.
- RENSLOW, M. S. (Ed.). **Manual of airborne topographic lidar**. American Society for Photogrammetry Remote Sensing. 2012.
- SANTOS, D. R. **Automação da resseção espacial de imagens com uso de hipóteses de rodovias como apoio de campo derivadas do sistema de varredura laser**. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 120p., 2006.
- SHAN, J.; TOTH, C. K. **Topographic laser ranging and scanning: principles and processing**. CRC Press, 590p., 2008.
- SITHOLE, G.; VOSSSELMAN, G. Comparison of filtering algorithms. In: ISPRS WORKING GROUP III/3, 2003, Dresden. 3-D Reconstruction from airborne laser scanner and INSAR data international: **Proceedings**. Dresden. Institute of Photogrammetry and Remote Sensing: Dresden University of Technology, p. 71-78, 2003.
- SUÁREZ, J. C., ONTIVEROS, C., SMITH, S., SNAPE, S. Use of airborne LiDAR and aerial photography in the estimation of individual tree heights in forestry. **Computers & Geosciences**, 31(2), 253-262. 2005.
- WEHR A.; LOHR U. Airborne Laser Scanning – An Introduction and Overview. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 54, p. 68-82, 1999.
- WING, B.M., RITCHIE, M.W., BOSTON, K., COHEN, W.B., GITELMAN, A., OLSEN, M.J. Prediction of understory vegetation cover with airborne LiDAR in an interior ponderosa pine forest. **Remote Sensing of Environment**, v. 124, p. 730–741, 2012.
- WU, C. J.; HAMADA, M. S. **Experiments: planning, analysis, and optimization**. John Wiley & Sons. p. 552. 2011.
- YANG, H. H.; CHEN, W; QIAN T; SHEN, D; WANG, J. The Extraction of Vegetation Points from LiDAR Using 3D Fractal Dimension Analyses. **Remote Sensing**, v.7, n.8, p. 10815-10831, 2015.