

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL - UFRGS
UNIDADE ACADÊMICA DE PÓS - GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO
NÍVEL DOUTORADO

FABIANE BORDIN

**LASER SCANNER TERRESTRE NA CARACTERIZAÇÃO DE ALVOS
FLORESTAIS**

Porto Alegre

2015

Fabiane Bordin

**LASER SCANNER TERRESTRE NA CARACTERIZAÇÃO DE ALVOS
FLORESTAIS**

Tese apresentada como requisito parcial para
obtenção do título de Doutor em
Sensoriamento Remoto, pelo Programa de Pós-
Graduação em Sensoriamento Remoto da
Universidade Federal do Rio Grande do Sul -
UFRGS

Orientadora: Prof(a). Dr. Elba Calesso Teixeira

Co-Orientadora: Prof(a). Dr. Sílvia Beatriz Alves Rolim

Porto Alegre

2015

Ao meu pai Ivo, que soube transmitir o quão importante é a formação para uma
pessoa;

À minha mãe Inês, pelo carinho e apoio;

À minha irmã Priscila pela troca de conselhos;

Ao meu amor Maurício, pelo incentivo e por estar presente em cada momento desta
conquista.

À minha avó, que não conseguiu presenciar o término da tese.

AGRADECIMENTOS

A concretização desta pesquisa é resultado do trabalho de uma equipe. Por isso, devo meus sinceros agradecimentos:

À minha orientadora professora Dra. Elba Calesso Teixeira, pela confiança, oportunidade concedida e pelo aprendizado não só nas atividades de pesquisa e orientação, mas também pela amizade.

À co-orientação da professora Dra. Sílvia Beatriz Alves Rolim, por dar um rumo essencial à minha pesquisa e por estar sempre disposta a esclarecer as dúvidas sobre sensoriamento remoto e outros fenômenos distantes da minha formação básica.

Agradeço ao professor Dr. Francisco Manoel Wohnrath Tognoli, pelo assessoramento e revisão dos textos dos artigos, pelos conselhos e discussões produtivas.

Agradeço ao professor Dr. Luiz Gonzaga da Silveira Jr. e ao colega Fabrício Muller pelo apoio nas etapas de manipulação de dados e desenvolvimento do algoritmo.

Ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto pelos ensinamentos, conhecimentos transmitidos e pela oportunidade de concretização de um sonho.

Em especial aos colegas Dayana e Ismael pelo auxílio, companheirismo, disposição e ajuda sempre prestada.

Aos colegas do Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto: Aníbal, Flávia, Paula, Luís Felipe, Marilei e Raquel pelo companheirismo.

À Universidade do Vale do Rio dos Sinos por possibilitar a execução de parte da pesquisa. Principalmente à equipe dos laboratórios VIZLab, LASERCA e Geomensura: Gabriel Soares, Evandro Kirst, Beto Saraiva dos Reis, Marcos Turani.

E, em especial, à Camila Fernandes Natus de Souza pelo apoio técnico, parceria e amizade.

Se, a princípio, a ideia não é absurda, então...

... não há esperança para ela.

Albert Einstein

RESUMO

O resultado do escaneamento de um Laser Scanner Terrestre (LST) é uma nuvem de pontos com coordenadas geométricas (X, Y, Z), informações de cor (R, G, B) provenientes de uma câmera fotográfica acoplada ao equipamento e, ainda, a informação do retorno da intensidade do pulso laser (I). Esses sistemas de varredura possuem algumas características como, por exemplo, sua rapidez na aquisição de informações, registro de cenas em 3D e coleta de informações sem contato direto que se aplicam de forma importante nas análises florestais. Contudo, a grande vantagem da utilização de um LST na área florestal é a possibilidade de caracterizar alvos remotamente de forma rápida e não destrutiva. Assim, este trabalho teve como objetivo principal avaliar os dados de intensidade de retorno do laser provenientes de um sistema LST para a caracterização de alvos florestais. Metodologicamente foram realizados experimentos controlados que envolveram as seguintes etapas: calibração radiométrica do LST; avaliação da influência da distância nos dados de intensidade de retorno do laser e; análise do efeito de borda em imageamento de alvos florestais (considerado um dos principais problemas que afeta os dados intensidade de retorno quando se utiliza um LST). O equipamento utilizado durante os experimentos foi um laser scanner modelo Ilris 3D da Optech que trabalha no intervalo do infravermelho médio com comprimento de onda de 1535 nm. Os resultados mostraram que para esse comprimento de onda os alvos florestais devem ser imageados a uma distância maior ou igual a 5m e o processamento dos dados com resolução radiométrica de 8 bits foi mais adequado, pois proporcionou uma caracterização geométrica do alvo com efeito visual de melhor qualidade se comparado com o processamento de 16 bits. Os resultados dos experimentos realizados sobre o efeito de borda possibilitaram identificar dois tipos de distorções que ocorrem em dados de nuvem de pontos adquiridos com um LST. O primeiro afetou os valores de intensidade de retorno do laser e o segundo criou um efeito que deslocou os pontos no espaço. Para minimizar este efeito foi desenvolvido um algoritmo, o IRA (Intensity Recovery Algorithm), que possibilitou recuperar automaticamente os valores de intensidade de retorno do laser minimizando em até 35,7% o efeito de borda nos imageamentos do alvo estudado na pesquisa. Assim para o uso de um LST, na caracterização geométrica de alvos florestais, é necessário desenvolver modelos de calibração da intensidade de retorno do pulso laser, pois os sistemas LST são distintos em termos de faixa do espectro eletromagnético que operam. Por fim, no que tange ao efeito de

borda concluiu-se que o algoritmo IRA necessita ser aprimorado com outras abordagens computacionais e matemáticas que poderão ser desenvolvidos em estudos futuros.

Palavras-chave: LIDAR. Laser *Scanner* Terrestre. Calibração. Efeito de Borda. Intensidade.

ABSTRACT

The result of the scanning of a terrestrial laser scanner (TLS) is a point cloud with geometric coordinates (X, Y, Z), color information (R, G, B) from a camera coupled to the equipment, and also the return information of intensity of the laser pulse (I). These scanning systems have some characteristics, for example, its speed in acquiring information, and of 3D scenes with record of data remotely which applies significantly in the forestry analysis. The advantage of using a TLS in the forestry area is the possibility of remote acquisition of data enabling a fast and non-destructive work. This work aimed to evaluate the laser return intensity data from a TLS system for the characterization of forest targets. Methodologically were performed controlled experiments involving the following steps: radiometric calibration of TLS; evaluating the influence of the distance in the laser return intensity data and; analysis of the edge effect in imaging forest targets (considered one of the main problems that affect the data intensity return when using a TLS). The equipment used during the experiments was a laser scanner Iris Optech 3D model that works in the mid-infrared range with wavelength of 1535 nm. The results showed that for this wavelength forest targets should be imaged at a distance greater than or equal to 5m and processing of the radiometric data with 8-bit resolution is more suitable because it provided a geometric characteristics of the target with better visual effect quality compared with the 16-bit processing. The results of the experiments on the edge effect possible to identify two types of distortions that occur in cloud data points acquired with a LST. The first affect the laser return intensity values and the second set offset an effect that the points in space. To minimize this effect an algorithm, the IRA (Intensity Recovery Algorithm), was developed which enabled automatically retrieve the laser return intensity values up to 35.7% of minimizing the edge effect in the target imaging surveys studied in research. Thus for use of an TLS, the geometrical characterization of forest targets, it is necessary to develop calibration models of the return laser pulse intensity, for TLS systems are different in terms of the electromagnetic spectrum operating range. Finally, with respect to the edge effect it was concluded that the IRA algorithm needs to be enhanced with other computational and mathematical approaches that may be developed in future studies.

Key-words: LIDAR. Laser Scanner Terrestre. Calibration. Edge Effect. Intensity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Organograma das etapas metodológicas.....	22
Figura 2 - Laser Scanner Terrestre ILRIS 3D.	23
Figura 3 - Região do infravermelho médio, de 1,3 a 2,6 μm	23
Figura 4 - Transição de elétrons entre níveis de energia por (a) absorção, (b) emissão espontânea e (c) emissão estimulada.....	31
Figura 5 - Coerência das ondas eletromagnéticas.	32
Figura 6 - Princípio de medição do tempo de viagem do laser. a) Por tempo de vôo. b) Por diferença de fase. AT e AR são as amplitudes do sinal transmitido e recebido, respectivamente.	35
Figura 7 - Ilustração de uma varredura e aquisição das informações para a determinação das coordenadas espaciais (X, Y, Z, I, R, G, B).	35
Figura 8 - Padrão de intensidade do feixe transversal e diâmetro do feixe.....	37
Figura 9 - Divergência do feixe em certo ângulo de varredura.....	37
Figura 10 - Fonte pontual irradiando energia em um ângulo sólido.	38
Figura 11 - Ilustração do efeito de borda nas folhas.	41
Figure 12 - Procedures for acquisition of the intensity data as a function of distance and type of target. a) Trunk before cleaning. b) Tree and the target demarcated after cleaning. c,d) Different distance demarcation using metric tape and graduated rulers. e,f) Representation of the target in the trunk and Spectralon® 99%. g) Inspection of the height of the equipment for maintaining the viewing geometry. h) Points of interest enhanced in red in the point cloud. .	49
Figure 13 - Digital representation of the study object. a) Photograph of the digital camera coupled to TLS before scanning. b) Image of the TLS screen during scanning, with the gray area showing the scanning window. c) 3D model after processing of the coordinates (X, Y, Z) plus intensity (I).	50
Figure 14 - Intensity after classification by K-clouds. a) Point cloud classified with 2 classes. Note that white color represents both the edge effect and leaves. b) Point cloud classified with 3 classes. Note that the edge effect is better observed as a well-defined black border around the tree.	51
Figure 15 - Digital photographs, point clouds and intensity classification obtained with (a) 2m, (b) 3m and (c) 5m from the target with 0.5mm of spacing between points and radiometric resolution of 8 and 16 bits. The edge effect highlighted in the red rectangle can be recognized in a), b) and c), both in 8 and 16 bits. Radiometric resolution of 16 bits did not provide satisfactory image contrast (the circular target is not visible in the trunk shown in c).	52

Figure 16 - Point source radiating energy in a solid angle (Colwell, 1983).....	55
Figure 17 - Procedures for acquisition of the intensity data as a function of distance and type of target. a) Trunk before cleaning; b) Tree and the target demarcated after cleaning; c & d) Different distance demarcation using metric tape and graduated rulers; e & f) Representation of the target in the trunk and Spectralon® 99%; g) Inspection of the height of the equipment for maintaining the viewing geometry; h) Points of interest enhanced in red in the point cloud (From Bordin et al., 2013a).	58
Figure 18 - Digital photographs, point clouds and intensity classification obtained with (a) 2 m, (b) 3 m, and (c) 5 m from the target with 0.5 mm of spacing between points and radiometric resolution of 8 and 16 bits. The edge effect highlighted in the red rectangle can be recognized in a), b) and c), both in 8 and 16 bits. Radiometric resolution of 16 bits did not provide satisfactory image contrast (the circular target is not visible in the trunk shown in c) (From Bordin et al., 2013a).	60
Figure 19 - Mathematical model for the adjustment between intensity and distance.	61
Figure 20 - Schematic representation of geometric coordinates (X, Y, Z) and intensity data acquisition (I).....	68
Figure 21 - Gaussian distribution of the energy across the laser beam intensity seen in a diagram and across the diameter of the beam (Popescu, 2011).....	69
Figure 22 - Representation of the laser diameter in relation with the distance	70
Figure 23 - Point source radiating energy in a solid angle (Colwell, 1983).....	70
Figure 24 - Representation of an object with circular holes. The red color represents the areas where the edge effect will appear.	72
Figure 25 - Methodological steps undertaken in this study.....	73
Figure 26 - Experiment to generate the edge effect using a tripod, a target, a white screen and the laser scanner.....	74
Figure 27 - Example of the AABB with quadtree level 1. (a) Shows the AABB with points inside. (b) It is the quadtree centered in the same place of the AABB with the AABB points inserted.	76
Figure 28 - Variation of the area (A and A') of interaction of radiation from the laser beam with the distance (d and d') between the sensor and the target.	78
Figure 29 - Edge effect generated in the initial test. The green points inside the circles and around the blue rectangle represent the edge effect seen in the 3D point cloud. Figure in false color.....	79
Figure 30 - Different resolutions of the data acquired with the laser scanner. a) The distance between the centers of the beam is greater than the diameter of the beam. b) The distance between the centers of beam is smaller than the diameter of the beam. c) The distance between the centers of the beam is equal to the diameter of the beam.....	80

Figure 31 - Edge effect generated in the initial test. The green points in the cloud are shifted in space on the y-axis. Figure in false color. 80

Figure 32 - Point clouds of the tree as a 3D image before (a) and after (b) recovering intensity lost due to the edge effect. The tree before processing (a) shows a large number of blue edge effect points, whereas the tree after processing (b) shows a reduced number of blue edge effect points. Figure in false color. 83

Figure 33 - Distribution of intensities of the point cloud before column (a) and after column (b) segmentation and processing by IRA. 84

LISTA DE TABELAS

Table 1 - The table summarizes results obtained after IRA processing. The edge effect is represented as blue, the leaves as green, and the branches as red in the Figure 32..... 82

Table 2 - Average and standard deviation of intensity values before and after the IRA..... 84

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Especificações técnicas do LST ILRIS 3D.	24
Quadro 2 - Propriedades da luz laser.....	33
Framework 3 - Scans with controlled settings.....	74

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LST	Laser Scanner Terrestre
RGB	Red, Green and Blue
I	Intensidade
X, Y, Z	Coordenadas Geométricas
USB	Universal Serial Bus
RADAR	Radio Detection And Ranging
TLS	Terrestrial Laser Scanner
LIDAR	Light Detection and Ranging
IRA	Intensity Recovery Algorithm

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO, HIPÓTESE, OBJETIVOS, METODOLOGIA GERAL E ORGANIZAÇÃO DA TESE	18
1.1 INTRODUÇÃO.....	18
1.2 OBJETIVOS.....	20
1.2.1 Objetivo geral.....	20
1.2.2 Objetivos específicos.....	20
1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE	20
1.4 METODOLOGIA.....	21
REFERÊNCIAS	25
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	27
2.1 SENSORIAMENTO REMOTO	27
2.1.1 Sensoriamento remoto por meio da técnica LIDAR	30
2.1.2 Luz laser	30
2.1.3 Princípios do Laser Scanner Terrestre.....	33
2.1.4 Intensidade	38
REFERÊNCIAS	42
CAPÍTULO 3 - METHODOLOGY FOR ACQUISITION OF INTENSITY DATA IN FOREST TARGETS USING TERRESTRIAL LASER SCANNER.....	46
3.1 INTRODUCTION	46
3.2 MATERIAL AND METHODS.....	47
3.2.1 Experiment 1	47
3.2.2 Experiment 2	48
3.3 RESULTS AND DISCUSSION.....	49
3.3.1 Experiment 1	49
3.3.2 Experiment 2	51
3.4 FINAL REMARKS	52
REFERENCES	53

CAPÍTULO 4 - EFFECTS OF DISTANCE ON LIDAR DATA INTENSITY	54
4.1 INTRODUCTION	54
4.1.1 Intensity	55
4.2 MATERIAL AND METHODS.....	57
4.3 RESULTS AND DISCUSSION.....	59
4.4 FINAL REMARKS	62
REFERENCES	62
CAPÍTULO 5 – AN INTENSITY RECOVERY ALGORITHM (IRA) FOR MINIMIZING THE EDGE EFFECT OF LIDAR DATA	66
5.1 INTRODUCTION	66
5.1.1 Terrestrial Laser Scanner.....	67
5.1.2 LIDAR Intensity	70
5.1.3 Edge effect on LIDAR data	71
5.2 MATERIAL AND METHODS.....	72
5.2.1 Modeling the edge effect.....	73
5.2.2 Method proposed: IRA	75
5.2.3 Testing IRA	77
5.3 RESULTS AND DISCUSSION.....	77
5.3.1 Results of the edge effect test.....	77
5.3.2 Results of the IRA.....	81
5.4 FINAL REMARKS	85
REFERENCES	85
CAPÍTULO 6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	88
6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	89

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO, HIPÓTESE, OBJETIVOS, METODOLOGIA GERAL E ORGANIZAÇÃO DA TESE

1.1 INTRODUÇÃO

O conceito que possibilitou a criação de lasers foi proposto por Albert Einstein, por volta de 1917, cujo estudo previa ser possível estimular um corpo a liberar energia em forma de radiação eletromagnética com características uniformes e constantes. A palavra LASER, na verdade, é uma sigla em inglês cuja origem remete à *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* que na tradução significa Amplificação da Luz por Emissão Estimulada de Radiação. As limitações tecnológicas existentes na época da descoberta fizeram com que as pesquisas sobre essa teoria iniciassem somente a partir da década de 1950 (GONÇALES, 2007). Sendo assim, o descobrimento da luz do tipo laser data do início da década de 60 e, é uma das numerosas contribuições da física quântica para a tecnologia (HALLIDAY et al., 2007).

Por volta de 1960 o laser começou a ser usado em levantamentos topográficos para a medição de distâncias o que permitiu o desenvolvimento de equipamentos que auxiliaram na melhoria da exatidão dos levantamentos topográficos e geodésicos. Com o desenvolvimento de um mecanismo de varrimento/escaneamento acoplado aos equipamentos de medição, surgiu o primeiro Laser Scanner Terrestre (LST), o qual foi comercializado em meados da década de 90.

Essa evolução se deu de forma contínua acoplando-se outras tecnologias tal como a câmera fotográfica e a possibilidade do registro de retorno da radiação eletromagnética após a interação com o alvo. Sendo assim, um equipamento de LST hoje, permite medir ângulos, distâncias e nos dá acesso às informações de cor (RGB) provenientes da câmera fotográfica acoplada e ainda, o registro da intensidade (I) da radiação eletromagnética no seu retorno.

A partir da determinação das distâncias e dos ângulos, é possível obter as coordenadas geométricas X , Y , Z de cada ponto obtido. O resultado de um escaneamento com câmera fotográfica acoplada é uma nuvem de pontos tridimensional com redundância de informação (X , Y , Z , I , R , G , B), podendo facilmente ultrapassar milhões de pontos com apenas alguns segundos de coleta.

Esses sistemas de varredura possuem algumas características que se aplicam de forma importante nas análises florestais, pois as amostragens nessa área geralmente são destrutivas, caras, trabalhosas e, muitas vezes, resultam em amostras pouco representativas (Seielstad et al. 2011). Contudo, a grande vantagem da utilização de um LST na área florestal é a possibilidade de se adquirir dados remotamente, possibilitando assim, um trabalho rápido e não destrutivo. As pesquisas na área têm demonstrado que as informações obtidas proporcionam exatidão quanto à geometria ao longo do tronco das árvores, permitindo não somente obter valores de alturas e diâmetros, mas avaliar, a tortuosidade, forma e qualidade da madeira em função da inserção de galhos e danos que possam ocorrer no tronco (MAAS et al., 2008).

Os trabalhos publicados sobre as aplicações do LST têm sido direcionados à utilização das coordenadas geométricas (X, Y, Z) e do atributo da cor (R, G, B) para estimativas de volume, reconstrução 3D, altura, diâmetro a altura do peito, densidade de área foliar, índice de área foliar entre outras. No entanto, existem poucos estudos sobre abordagens metodológicas de LST utilizando a informação da intensidade de retorno do laser. Alguns estudos relacionados à intensidade têm focado, principalmente, a questão da calibração radiométrica (WAGNER et al., 2006, 2008; HÖFLE e PFEIFER., 2007; KAASALAINEN et al., 2009, 2011; SEIELSTAD et al., 2011; PFEIFER et al., 2008).

A intensidade já foi explorada em algumas áreas da Geociências. Burton et al. (2011) estudaram a sua correlação em relação a litologia. Os resultados obtidos mostraram que a intensidade teve uma correlação inversamente proporcional ao peso (%) de argila e diretamente proporcional ao quartzo, plagioclásio e K-feldspato. Os autores enfatizam que a intensidade do LST é um possível sensor remoto de litologia, particularmente em afloramentos remotamente inacessíveis e que, no entanto, poucos pesquisadores têm estudado sobre a informação da intensidade do LST. Eitel et al., (2010) correlacionaram o conteúdo de clorofila proveniente das folhas e a intensidade e obtiveram uma correlação de $R^2 = 0,77$ entre essas duas variáveis.

Com base nos trabalhos supracitados foram estabelecidos os objetivos geral e específicos que estão descritos na sequência.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho teve como objetivo geral avaliar os dados de intensidade provenientes de um sistema laser scanner terrestre para a caracterização de alvos florestais.

1.2.2 Objetivos específicos

Para corroborar com o objetivo geral, foi necessária a proposição dos seguintes objetivos específicos:

- a) estabelecer procedimentos metodológicos para a aquisição de dados de intensidade de alvos florestais com LST;
- b) analisar a influência da distância na aquisição de dados de intensidade de retorno do pulso laser;
- c) propor uma metodologia para minimizar o efeito de borda sobre os dados de intensidade do LST de alvos florestais;

1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE

Esta tese foi organizada em seis capítulos. O capítulo 1 apresenta a introdução ao assunto, estabelece os objetivos geral e específicos, os procedimentos metodológicos efetuados para cada objetivo e a organização da tese.

O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica sobre os assuntos relacionados ao tema deste trabalho. São dadas as definições dos termos de interesse, bem como os conceitos básicos sobre sensoriamento remoto, a técnica LIDAR (*Light Detection And Ranging*), a luz laser, laser scanner terrestre e intensidade.

Já os capítulos 3, 4 e 5 estão estruturados de modo que cada um deles corresponde a um dos três objetivos específicos da tese. Esses três capítulos estão elaborados na forma de artigos em língua inglesa. Na sequência está descrito um maior detalhamento sobre cada um destes três capítulos.

O capítulo 3 foi desenvolvido para atender ao objetivo de estabelecer procedimentos metodológicos para a aquisição de dados de intensidade do LST para estudos de correlação com as características químicas de alvos florestais. Neste capítulo está descrita a exploração metodológica e os testes de calibração realizados com o LST. São descritos também os procedimentos realizados no processamento dos dados para a aquisição da intensidade objetivando a aplicação em alvos florestais. Este capítulo foi publicado no periódico IERI Procedia, v 5, p. 238-244, 2013 .

O capítulo 4 trata do estudo desenvolvido para atender ao objetivo de analisar a influência da distância na aquisição de dados de intensidade de retorno do pulso laser. Este capítulo analisa e modela a intensidade de retorno do LST em função da distância. O referido capítulo foi publicado nos anais do The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (CD-ROM), v. XL-2/W1, p. 99-103, 2013.

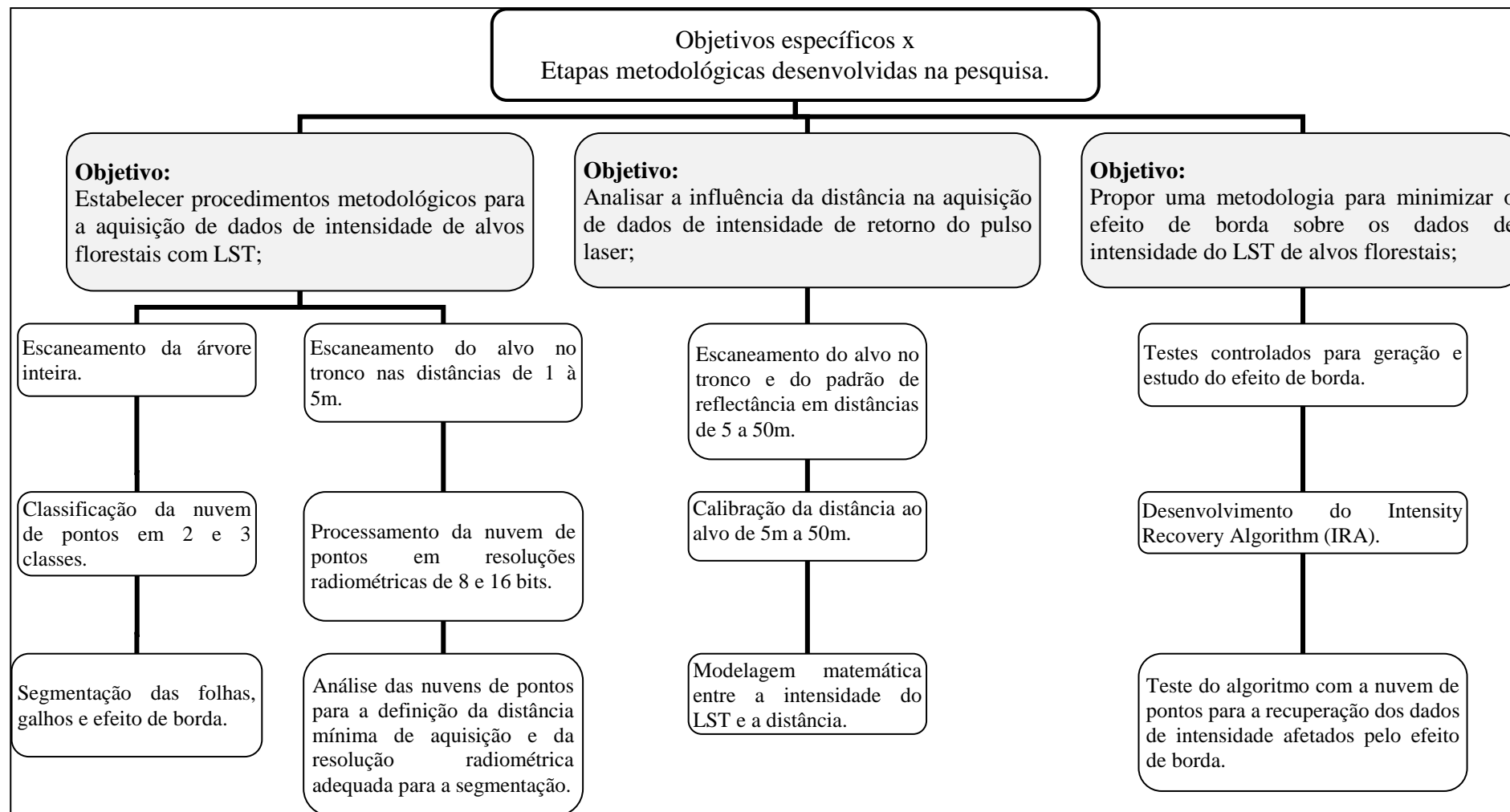
O capítulo 5 apresenta o estudo desenvolvido para atender ao objetivo de propor uma metodologia para minimizar o efeito de borda sobre os dados de intensidade do LST de alvos florestais. Nessa parte do estudo foi realizada a caracterização do comportamento do efeito de borda, bem como o desenvolvimento de um algoritmo para minimizar este efeito. Este algoritmo foi baseado em um processo de agrupamento, juntamente com abordagens baseada em centroides e quadtree para tratar do efeito de borda automaticamente.

O capítulo 6 apresenta a conclusão da tese, as considerações finais e indica propostas para estudos futuros.

1.4 METODOLOGIA

A Figura 1 ilustra, por meio de um organograma, a metodologia empregada no desenvolvimento da tese. Ela foi elaborada com o propósito de elucidar as etapas metodológicas realizadas. Essas etapas estão relacionadas aos objetivos específicos propostos na pesquisa. Contudo, um maior detalhamento será apresentado nos capítulos 3, 4 e 5 correspondentes a cada objetivo específico.

Figura 1 - Organograma das etapas metodológicas.



O desenvolvimento da etapa experimental foi realizado no campus da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS) localizado na cidade de São Leopoldo, estado do Rio Grande do Sul no Brasil. Este campus dispõe de 90,55 hectares e 142 km² de área de preservação ecológica. Foram escolhidas duas árvores aleatórias como alvo de estudo. A aquisição da intensidade desses alvos foi realizada com o equipamento Laser Scanner Terrestre Iris 3D da Optech. Este equipamento é um sensor ativo que trabalha com a radiação eletromagnética no comprimento de onda de 1535 nm (Figura 2). Ele emite radiação na região do infravermelho médio por emissão estimulada do laser de diodo (Kekeba, 2008). O equipamento funciona com o princípio de tempo de voo.

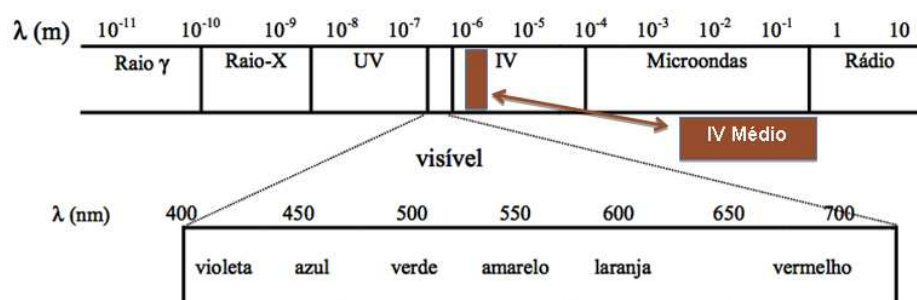
Figura 2 - Laser Scanner Terrestre ILRIS 3D.



Fonte: Optech (2009)

Segundo Ponzoni (2002), a região do infravermelho médio compreende a faixa que vai de 1,3 a 2,6 μm , cuja ilustração consta na Figura 3.

Figura 3 - Região do infravermelho médio, de 1,3 a 2,6 μm .



Fonte: Adaptado de Ponzoni (2002).

O sistema possui uma interface de simples operação, podendo ser controlado por Notebook, através de uma conexão por cabo ou do tipo wireless. Os dados adquiridos podem ser armazenados em memória de dispositivos USB. Durante o escaneamento, podem ser selecionadas diversas áreas do alvo, com opção de diferentes resoluções para cada área.

As especificações técnicas do ILRIS – 3D. Optech estão descritas no Quadro 1.

Quadro 1 - Especificações técnicas do LST ILRIS 3D.

Alcance variável entre 400 metros, para objetos com refletância de 10%, e 1200 metros, para objetos com 80% de refletância;
Possui uma precisão linear de 7 milímetros e uma precisão angular de 8 milímetros, ambos a uma distância de 100 metros do equipamento;
A divergência de seu laser, de 0,00974°, faz com que, em uma distância de 100m do equipamento, o diâmetro do raio do laser emitido seja de 2,2 centímetros.
Laser classe 1, seguro para o olho humano, opera em uma frequência de 1535 nm, ou seja, na faixa do infravermelho médio;
O Ilris 3D opera no modo de janela, ou seja, em cada posição do equipamento ele possui um campo de visada de 20° em todas as direções, perfazendo uma janela total de 40°x40°;
Possui integrada uma câmera digital de 3.1 megapixels, localizada fora do eixo central do equipamento, o que causa uma distorção de paralaxe em objetos localizados a menos de 35 a 40 metros do equipamento.

Fonte: Optech (2009)

A partir da exposição da introdução, hipótese, objetivos e metodologia, a tese apresenta os principais conceitos que embasaram a pesquisa no capítulo que trata da revisão bibliográfica.

REFERÊNCIAS

Burton, D., Dunlap, D. B., Wood, L. J., Flaig, P. P. Lidar intensity as a remote sensor of rock properties. *Journal of Sedimentary Research*. v. 81, p. 339-347, 2011.

Eitel, J.U.H., Vierling, L.A., Long, D.S. Simultaneous measurements of plant structure and chlorophyll content in broadleaf saplings with a terrestrial laser scanner. *Remote Sensing of Environment* v. 114, p. 2229-2237, 2010.

Gonçales, R. Dispositivo de Varredura 3D terrestre e suas aplicações na Engenharia, com ênfase em túneis. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de e Transporte. 132p. São Paulo. 2007.

Halliday, D.; Resnick, R.; Walker, J.. Tudo sobre os Átomos. In: HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J.. Fundamentos de física. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007. p. 258 – 260. v.4

Höfle, B., and Pfeifer, N. Correction of laser scanning intensity data: data and model-driven approaches: *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 62, p. 415–433, 2007.

Kaasalainen, S.; Krooks, A.; Kaartinen, H. Radiometric calibration of terrestrial laser scanners with external reference targets. *Remote Sensing*. v. 1, p. 144-158, 2009.

Kaasalainen, S.; Pyysalo, U.; Krooks, A.; Vain, A.; Kukko, A.; Hyypä, J.; Kaasalainen, M. Absolute radiometric calibration of ALS intensity data: effects on accuracy and target classification. *Sensors*. v. 11, p. 10586-10602, 2011.

Kekeba, A.D. (2008) Establishing relationship between thermal radiation and intensity of 3D terrestrial laser scan data of weathered rock surface for sloper stability analysis. Enschede, ITC, 84p., 2008.

MAAS, H.-G.; BIENERT, A.,SCHELLER, S.; KEANE, E.. Automatic forest inventory parameter determination from terrestrial laser scanner data. *International journal of remote sensing*, v. 29, n. 5, p. 1579-1593, 2008.

Optech. Iris-3D Operation Manual. 2009 Disponível em:
ftp://ftp.hypack.com/0040170_ILRIS-3D_Operation_Manual_RevC.pdf. Acesso em:
14/11/2012

Pfeifer, N., Höfle, B., Briese, C., Rutzinger, M., Haring, A. Analysis of the backscattered energy in terrestrial laser scanning data. *The international Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. v. 37 (Part B5), p. 1045-1051 Beijing, 2008.

Ponzoni, F. J. Sensoriamento remoto no estudo da vegetação: diagnosticando a mata atlântica. In: Rudorf, B. F. T.; Moraes, E. C.; Ponzoni, F. J.; Camargo Júnior, H.; Conforte, J. C.; Moreira, J. C.; Epiphânio, J. C. N.; Moreira, M. A.; Kampel, M.; Albuquerque, P. C. G. de; Martini, P. R.; Ferreira, S. H.; Tavares Júnior, S. S.; Santos, V. M. N. dos (Ed.). Curso de uso de sensoriamento remoto no estudo do meio ambiente. São José dos Campos: INPE, 2002. p. 27. Capítulo 8. (INPE-8984-PUD/62).

Seielstad, C.; Stonesifer, C.; Rowell, E.; Queen, L. Deriving fuel mass by size class in douglas-fir (*pseudotsugamenziesii*) using terrestrial laser scanning. *Remote Sensing*. v. 3, p. 1691-1709, 2011.

Wagner, W., Hyypä, J., Ullrich, A., Lehner, H., Briese, C., Kaasalainen, S. Radiometric calibration of full-waveform small-footprint airborne laser scanners *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, v.37 (Part 1), p. 163–168, 2008.

Wagner, W., Ullrich, A., Ducic, V., Melzer, T., and Studnicka, N., 2006. Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitising airborne laser scanner. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 60, 100-112.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada a revisão bibliográfica sobre os assuntos pertinentes a esta pesquisa. Em linhas gerais, foram abordados os conceitos sobre sensoriamento remoto, a técnica LIDAR, a luz laser, o laser scanner terrestre bem como a intensidade do LST.

2.1 SENSORIAMENTO REMOTO

Segundo Novo (2010), o princípio do sensoriamento remoto está cientificamente ligado ao desenvolvimento da fotografia e à pesquisa espacial. A primeira fotografia de que se tem notícia foi obtida por Daguerre e Niepce em 1839 e já em 1840 o seu uso estava sendo recomendado para levantamentos topográficos. A evolução nesta área ocorreu rapidamente até que em 1858 o corpo de engenharia da França já estava utilizando aparatos fotográficos embarcados em balões para o mapeamento topográfico. Este termo apareceu pela primeira vez na literatura científica em 1960 e significava simplesmente a aquisição de informações sem o contato físico com os objetos (NOVO, 2010).

Existem diversas definições para o sensoriamento remoto. Charles Elachi, em 1987, qualificou esta tecnologia como sendo a aquisição de informações pela detecção e mensuração das mudanças que um determinado objeto impõe aos campos de força eletromagnéticos, acústicos ou potenciais que o circundam. (ELACHI, 1987).

Sabins (2007), também se refere ao termo incluindo as ondas acústicas e define sensoriamento remoto como sendo o conjunto de métodos que empregam a energia eletromagnética, tais como a luz, o calor e as ondas de rádio, como meios de detecção e mensuração da característica dos alvos.

Apesar de sensores de ondas acústicas (sonares) e de ondas sísmicas (sismógrafos) também permitirem a aquisição de informações sobre objetos ou fenômenos através da mensuração das mudanças que impõem a esses campos, a definição atual de sensoriamento remoto se limita à utilização de sensores que medem alterações sofridas pelo campo eletromagnético.

De acordo com Fitz (2008), os sensores remotos são dispositivos com capacidade de captar e registrar, em forma de dados, a energia refletida pelas superfícies. Os dados obtidos podem então ser armazenados, manipulados e analisados, através de softwares específicos. A

energia utilizada no sensoriamento remoto é a radiação eletromagnética (REM), medida em frequência e comprimento de onda (FLORENZANO, 2002).

Segundo Florenzano (2002), sensoriamento remoto pode ser definido como a tecnologia que permite a obtenção de imagens e outros tipos de dados de determinada superfície através da captação e registro da energia refletida ou emitida pela superfície. A palavra sensoriamento refere-se à aquisição dos dados e o termo remoto é utilizado porque a obtenção de dados é feita à distância, sem o contato físico entre o receptor e o emissor.

Para Jensen (2009), as características físicas e químicas de um objeto podem ser identificadas por equipamentos especializados a quilômetros de distância, pois captam as informações por meio da radiação que este objeto reflete, absorve, transmite ou emite. Este alvo pode estar localizado tanto na Terra como no Espaço, pois os sensores estão localizados, quase que na totalidade, em satélites que orbitam ao redor da Terra. Esta capacidade de conseguir estudar materiais sem o contato físico é chamado de sensoriamento remoto.

Novo (2010) definiu como sendo a utilização conjunta de sensores e equipamentos para processamento e transmissão de dados com o objetivo de estudar eventos, fenômenos e processos que ocorrem na superfície do planeta Terra a partir do registro e da análise das interações entre a radiação eletromagnética e as substâncias que o compõem em suas mais diversas manifestações.

Para Longley et al., (2013), o sensoriamento remoto mede propriedades físicas, químicas e biológicas de objetos sem o contato direto com eles e é, atualmente, a forma mais popular de captura de dados geográficos primários.

Em relação à origem da fonte de energia, os sensores são classificados em ativos e passivos. Os sensores ativos emitem a energia necessária em direção ao alvo para captarem a sua reflexão, ou seja, possuem fonte de energia própria. Já os sensores passivos necessitam de fontes de energia externas para captarem a reflexão das superfícies dos alvos, como a energia proveniente do sol, por exemplo. (FITZ, 2008).

Quanto à forma como os dados são traduzidos, os sensores podem ser classificados em imageadores e não imageadores. Os sensores imageadores permitem que seja gerada uma imagem através das informações coletadas, podendo ser esta bi ou tridimensional, enquanto que os sensores não imageadores fornecem apenas informações. (NOVO, 2010). Conforme Fitz (2008), este último traduz as informações obtidas em forma de gráficos e dados diversos.

As imagens coletadas através do sensoriamento remoto possuem diferentes resoluções, sendo que a resolução é definida como a capacidade de um sensor distinguir objetos. (FLORENZANO, 2002). Fitz (2008) menciona quatro tipos de resolução, sendo estas: espacial, espectral, radiométrica e temporal.

Segundo Valença (2011), a resolução espacial está relacionada diretamente com o tamanho real dos elementos que compõe uma imagem, chamados de pixels, e com a dimensão do menor objeto a ser identificado pelo sensor. Meneses e Almeida (2012), completa esta definição explicando que só serão identificados pelo sensor objetos cujo tamanho seja no mínimo igual ao tamanho da resolução. Os pixels podem ser relacionados com uma grandeza de comprimento, permitindo assim medir o tamanho real da imagem. (VALENÇA, 2011).

A resolução espectral é dada pela capacidade de um sensor em dividir uma imagem em um determinado número de bandas e em definir o intervalo destas. Quanto maior a resolução espectral, mais estreito é o intervalo de banda e maior é o número de bandas. (VALENÇA, 2011). O fator que permite distinguir um objeto do outro em diferentes comprimentos de onda é a diferença de refletância que estes possuem. (MENESES e ALMEIDA, 2012).

Resolução radiométrica é definida pela habilidade do sensor em distinguir variações no nível de energia que é refletida ou emitida pela superfície do alvo. Será maior quanto maior for a capacidade do sensor em perceber a diferença da intensidade do sinal. (NOVO, 2010). A medida desta resolução é expressa em termos de números de dígitos binários, ou bits. (MENESES e ALMEIDA, 2012). Por fim, a resolução temporal refere-se ao espaço de tempo que o sensor leva para obter cada cena. (FITZ, 2008).

Os equipamentos de sensoriamento remoto se diferenciam quanto à plataforma de observação. Eles podem ser orbitais e aerotransportados e, existem ainda outras plataformas como balões, sistemas de voo de controle remoto ou torres elevatórias. (BLASCHKE e KUX, 2011). Contudo, é fato que, o sensoriamento remoto foi e está muito difundido pelas aplicações de sensores a bordo de plataformas espaciais. Os equipamentos de plataforma terrestre ainda são pouco mencionados na bibliografia por serem tecnologias recentes.

A técnica de sensoriamento remoto abordada neste trabalho será a LIDAR, especificamente pela utilização do Laser Scanner Terrestre (LST), sensor remoto ativo de plataforma terrestre. A varredura a laser (em inglês, *laser scanning*) é uma das tecnologias

que foi aperfeiçoada a partir dos princípios de sensoriamento remoto. (NASCIMENTO JÚNIOR et al., 2006).

2.1.1 Sensoriamento remoto por meio da técnica LIDAR

A tecnologia LIDAR é baseada nos mesmos princípios utilizados no sistema de RADAR, com a diferença de que, ao invés do uso de ondas de rádio para localizar os objetos de interesse, o sistema LIDAR utiliza pulsos laser (GIONGO et al., 2010).

Os sistemas de varredura a laser são técnicas de sensoriamento remoto baseadas na detecção da variação de luz do laser (POPESCU, 2011). LIDAR é uma tecnologia recente que emprega um equipamento de sensoriamento remoto ativo (*scanner*), que transmite a radiação eletromagnética e mede a radiação que é retroespalhada para um receptor depois de interagir com a atmosfera da Terra ou com objetos. (LONGLEY et al., 2013).

O equipamento que realiza o escaneamento é chamado de *Laser Scanner* e pode ser do tipo móvel ou fixo, aerotransportado ou terrestre.

De acordo com Popescu (2011), não há grandes diferenças entre os princípios ópticos e mecânicos dos sistemas LIDAR de escaneamento aéreo, espacial e terrestre. As distinções ocorrem na montagem das plataformas e na complexidade das tecnologias adicionais usadas para determinar a orientação e a posição do sensor.

Assim, para um melhor entendimento sobre a técnica LIDAR e o funcionamento do equipamento de escaneamento a laser utilizado neste trabalho, se faz necessária uma breve abordagem sobre os fundamentos do laser e sobre as propriedades da luz laser.

2.1.2 Luz laser

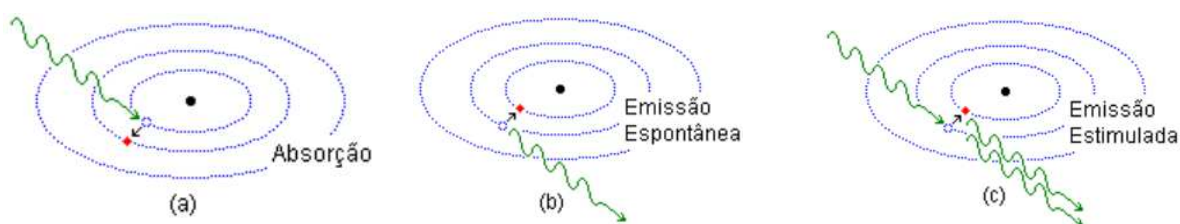
O LST está baseado na emissão estimulada de radiação. Ele é um sensor ativo cujo feixe de luz é do tipo laser.

O modelo do átomo de Bohr pode ser usado para explicar o princípio da absorção e emissão de luz (radiação) laser do LST. Segundo Bohr (1979), os átomos absorvem e emitem luz unicamente se puderem passar de um estado de energia para outro. A absorção de luz ou de outra forma de energia ocorre quando um elétron recebe energia por excitação térmica, colisão de elétrons ou absorção de fótons.

Bagnato (2001) buscou explicar a emissão estimulada de uma maneira bastante simples. Segundo o autor, um elétron está no seu estado fundamental, quando está na órbita mais próxima do núcleo. Quando um elétron está em uma de suas órbitas mais externas, diz-se que ele está em estado excitado. A tendência é que esse elétron no estado excitado retorne para a órbita mais próxima do núcleo. Porém, esse processo é relativamente demorado, podendo, no entanto, ser acelerado por um agente externo nesse caso um fóton. Um fóton externo estimula o decaimento do elétron excitado e este, ao passar para uma camada mais próxima do núcleo, emite outro fóton. Os dois fótons, que emergiram da emissão estimulada, vão perturbar outros átomos com elétrons nos seus estados excitados e haverá a emissão de mais fótons que se juntarão aos primeiros, produzindo um feixe de luz onde todos os fótons se comportam identicamente.

A Figura 4a mostra o elétron migrando de um nível energético mais baixo para um mais alto. Na emissão espontânea a energia emitida é igual à diferença de energia entre o nível inicial e o final (Figura 4b). Nela, os átomos emitem luz incoerente (sem relação de fase) e em várias direções, sendo que, em meios homogêneos, a luz emitida apresenta uma direção preferencial. Na emissão estimulada (princípio de funcionamento do laser), um fóton incidente estimula a emissão de outro fóton, que, por sua vez, é idêntico ao primeiro fóton o que pode ser visto na Figura 4c (DRUMMOND, 2007).

Figura 4 - Transição de elétrons entre níveis de energia por (a) absorção, (b) emissão espontânea e (c) emissão estimulada



Fonte: Drummond (2007)

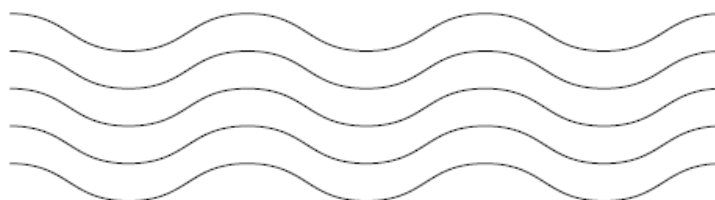
Um sinal de entrada faz com que os átomos de um meio ativo emitam fótons coerentes (emissão de luz em fase) com o sinal de entrada, onde apenas uma fase define a onda eletromagnética. A amplificação (ou ganho óptico) de um sistema laser é bem definida por um amplificador comum: um sistema que proporciona um sinal de saída maior que o de entrada, quando muito bombeado. Esse ganho do laser é resultado da emissão estimulada de fótons. O

meio amplificador de um laser fica situado entre dois espelhos, permitindo a reflexão dos fótons e sua amplificação (DRUMMOND, 2007). Essa radiação e/ou energia ao ser emitida pelo LST interage com o alvo e ao retornar é captada pelo sensor, convertida em um sinal elétrico e registrada como um número digital.

De acordo com Popescu (2011), a luz laser tem propriedades importantes que a diferenciam da luz comum (branca). Mais notavelmente a coerência, o comprimento de onda, a pureza espectral, a direcionalidade e a divergência do feixe, modulação da potência, e a polarização.

A Figura 5 ilustra o conceito de coerência descrito por Popescu (2011). Nela, as ondas de luz estão em fase uma com a outra, o que significa que os seus picos são alinhados no mesmo ponto e no tempo. Para que as ondas de luz sejam coerentes, elas devem começar com a mesma fase e na mesma posição. Além disso, elas precisam ter o mesmo comprimento de onda, isto é, ser espectralmente pura. A coerência perfeita é difícil de alcançar e, nem todos os tipos de luz laser são igualmente coerentes. A coerência pode ser caracterizada como espacial ou temporal. A coerência temporal é definida pela forma como as ondas de luz laser permanecem em fase enquanto viajam. A coerência espacial mede a área sobre a qual as ondas de luz são coerentes, e é um pré-requisito essencial para uma forte direcionalidade dos feixes de laser. Provavelmente esta é a diferença fundamental entre a luz laser e a radiação a partir de outras fontes de luz. Se compararmos a luz comum (proveniente do Sol) com a luz do tipo laser, a luz laser possui potencial de gerar feixes com maior coerência espacial e temporal que a luz comum.

Figura 5 - Coerência das ondas eletromagnéticas.



Fonte: Popescu (2011)

A luz do laser é geralmente considerada monocromática, isso significa que todos os fótons têm quase o mesmo comprimento de onda. Embora normalmente lasers emitam uma gama de comprimentos de onda, a largura da banda de laser é muito mais estreita do que a de luz comum (POPESCU, 2011).

O Quadro 2 apresenta as principais propriedades da luz laser.

Quadro 2 - Propriedades da luz laser

Propriedades da luz	Característica do laser
Coerência espacial e temporal	A luz laser gera ondas com elevada coerência espacial e temporal (picos alinhados no mesmo ponto e ao mesmo tempo). As ondas iniciam no mesmo período, na mesma posição e tem o mesmo comprimento de onda (ondas em fase). Essa característica é responsável pela forte direcionalidade do feixe mesmo em longas distâncias.
Comprimento de Onda	A luz laser é monocromática, ou seja, possui apenas um comprimento de onda, ao contrário da luz comum. No laser, a energia carregada pelo fóton estimulante e pelo fóton emitido é a mesma.
Divergência do feixe	A luz laser possui caráter direcional do feixe. Todo o feixe propaga-se na mesma direção, havendo um mínimo de dispersão. Os feixes de laser percorrem grandes distâncias com um pequeno ângulo de retroespalhamento ($0,057^\circ$).
Intensidade do feixe	Ao contrário das fontes de luz convencionais, a intensidade do feixe laser é extremamente grande, atingindo potências na ordem de terawatt (10^{12}W).

Fonte: Adaptado de Popescu (2011); Bagnato (2008).

Na sequência serão abordados os princípios do LST.

2.1.3 Princípios do Laser Scanner Terrestre

Segundo Wutke (2006), os sistemas *laser scanner* estão divididos em dois tipos: estáticos e dinâmicos. Os estáticos são utilizados em plataformas fixas, para levantamentos

terrestres, e os dinâmicos são utilizados para medições em movimento, geralmente transportados por aeronaves ou helicópteros.

Como o foco deste trabalho é a utilização do sistema terrestre, os sistemas aéreo e espacial não serão abordados na revisão bibliográfica.

Da mesma forma que outros sistemas de sensoriamento remoto ativo, os sistemas de LST utilizam comprimento de onda específico. Esse sistema tem como princípio de funcionamento a emissão estimulada de ondas eletromagnéticas na região do visível, do infravermelho ou do ultravioleta. Esses equipamentos baseiam-se na emissão de um feixe desse tipo especial de luz, na direção do alvo.

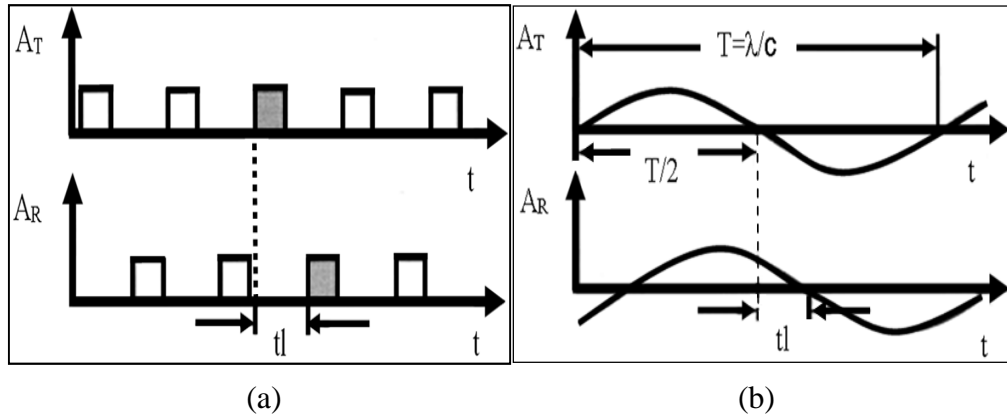
A interação entre as ondas eletromagnéticas pode ser analisada por meio de técnicas de interferometria. A interferometria é o estudo dos fenômenos causados por interferência nas ondas de luz, que nesse caso, é a interação entre o comprimento de onda do laser e as características químicas dos alvos (HARIHARAN, 2007).

Boehler et al., (2001) definem o termo *laser scanner* como qualquer equipamento que coleta coordenadas 3D da superfície de um objeto de forma automática e com a aquisição de dados em tempo quase real.

Centeno et al., (2004) divide o sistema laser scanner em três componentes principais: a unidade de medição laser propriamente dita, um sistema de varredura optomecânico e uma unidade de registro de medições de apoio. A unidade de medição laser é a parte encarregada de emitir e captar o sinal laser, sendo responsável pela determinação da distância entre o sensor e o objeto.

O LST emite um estreito feixe de pulsos laser de onda eletromagnética com alta frequência de repetição. Ele mede o tempo de ida e volta dos pulsos que retornam ao viajar do sensor ao alvo (WEHR e LOHR, 1999). Eles possuem diferentes princípios de funcionamento para a determinação do intervalo de tempo de viagem do sinal. Os mais disseminados são o por tempo de vôo e por diferença de fase (Figura 6).

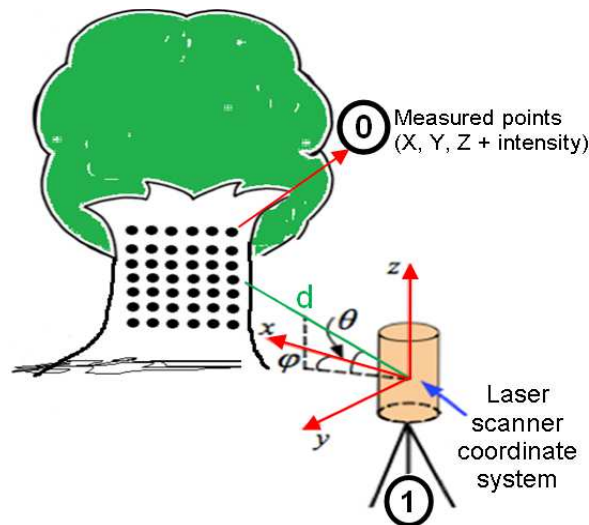
Figura 6 - Princípio de medição do tempo de viagem do laser. a) Por tempo de voo. b) Por diferença de fase. A_T e A_R são as amplitudes do sinal transmitido e recebido, respectivamente.



Fonte: Adaptado de Wehr e Lohr (1999, p. 71).

Em sua maioria, cada equipamento LST gera um formato próprio de arquivo de dados coletados. Porém, esses arquivos possuem similaridades em relação às informações contidas. Os arquivos baseiam-se em uma estrutura onde são armazenadas as coordenadas dos pontos no espaço (X , Y , Z), o valor de intensidade de retorno do pulso laser (I) e, caso haja disponibilidade, os valores provenientes da câmera fotográfica digital (R , G , B) acoplada, interna ou externamente, gerando uma sequência de informações (X , Y , Z , I , R , G , B). A Figura 7 ilustra uma varredura realizada com o LST para a coleta dessas informações.

Figura 7 - Ilustração de uma varredura e aquisição das informações para a determinação das coordenadas espaciais (X , Y , Z , I , R , G , B).



Fonte: Adaptado de Reshetyuk (2009, p. 18).

A distância entre o sensor e o alvo é determinada pela Equação (1) que considera o tempo que o sinal leva entre a ida e a volta, onde d é a distância entre o sensor e o alvo, c é a velocidade da luz, tl é o intervalo de tempo da viagem do sinal e $\frac{1}{2}$ é a fração que considera a metade do tempo entre a ida e a volta.

$$d = \frac{1}{2}ctl \quad (1)$$

As informações espaciais $X0$, $Y0$, $Z0$ são geradas por meio das Equações 2, 3 e 4, onde $X0$, $Y0$, $Z0$ são as coordenadas espaciais do alvo, $X1$, $Y1$, $Z1$ as coordenadas da estação, d é a distância entre a estação e o alvo, φ é o ângulo horizontal, e dn é o desnível entre a estação e o alvo.

$$X0 = X1 + d \operatorname{sen} \varphi \quad (2)$$

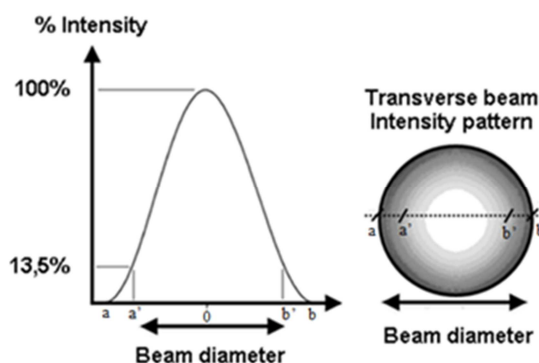
$$Y0 = Y1 + d \operatorname{cos} \varphi \quad (3)$$

$$Z0 = Z1 + dn \quad (4)$$

Os equipamentos disponíveis atualmente no mercado são capazes de realizar o levantamento e a coleta de milhares (sistema de tempo de voo) a até milhões (sistema de diferença de fase) de pontos por segundo e alguns dispõem da capacidade de gravar a intensidade do pulso de retorno do laser para cada posição espacial (X , Y , Z) de um determinado alvo (BELLIAN et al., 2005).

A energia do feixe de laser não é, contudo, igualmente distribuída dentro do seu diâmetro. Ela segue uma distribuição Gaussiana de acordo com Béland et al (2011) e Popescu (2011). O perfil da Figura 8 mostra que a intensidade do feixe cai radialmente e a extremidade do feixe onde é considerada a intensidade diminui para 13,5% do seu pico, ou o valor máximo axial (RESHETYUK, 2009).

Figura 8 - Padrão de intensidade do feixe transversal e diâmetro do feixe



Fonte: Adaptado de Popescu (2011)

Segundo Béland et al (2011), o feixe laser do equipamento ILRIS 3D da Optech possui um raio de 6 mm ao ser emitido e aumenta com a distância de acordo com a Equação 5.

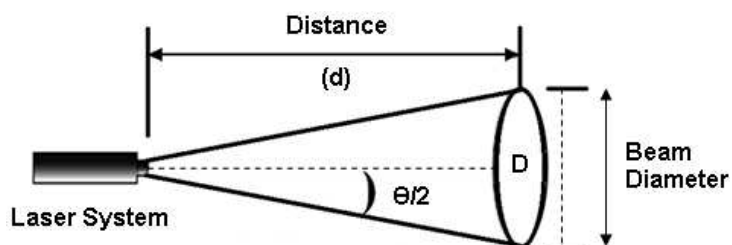
$$R = \frac{0,17d+12}{12} \quad (5)$$

Onde R é o raio do feixe e d é a distância ao alvo.

Geralmente, a divergência do feixe é considerada o ângulo entre os lados do feixe (BALTSAVIAS, 1999). Não importa como a divergência é medida, calcular o tamanho do feixe ou o diâmetro do laser é um problema trigonométrico que pode ser determinado pela Equação 6 baseada na Figura 9.

$$D = 2dtg \frac{\theta}{2} \quad (6)$$

Figura 9 - Divergência do feixe em certo ângulo de varredura



Fonte: Adaptado de Popescu (2011).

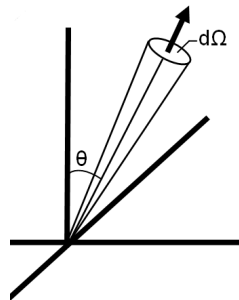
Onde D é o diâmetro do feixe (diâmetro da área iluminada), d é a distância ao alvo e θ é o ângulo de divergência do feixe.

A partir do exposto a respeito do LST, se faz necessário um entendimento sobre a intensidade do feixe de laser.

2.1.4 Intensidade

Nesse estudo, a intensidade seguiu a definição de Colwell (1983), que é a variação do fluxo de energia por unidade de ângulo sólido irradiado numa certa direção a partir de uma fonte pontual. Ela é caracterizada pelo símbolo I e é dada em watts por esterorradiano (W/sr). Ou ainda, como a quantidade de energia que passa através de uma unidade de área por segundo, por esterorradiano. A Figura 10 e a Equação 7 ilustram esse conceito.

Figura 10 - Fonte pontual irradiando energia em um ângulo sólido.



Fonte: Adaptado de Colwell (1983).

$$I = \frac{E}{A \cos \theta d\Omega} \quad (7)$$

Onde I é a intensidade, E é a quantidade de energia que passa através da área por segundo e $d\Omega$ é o ângulo sólido. Portanto, a radiação faz um ângulo sólido $d\Omega$ com a normal à área A . E , a projeção dessa área é dada por $A \cos \theta$.

Ainda, é possível definir a intensidade realizando uma analogia à equação do RADAR. Para o LIDAR, a energia que retorna é descrita pela Equação 8, (BALTSAVIAS, 1999; WEHR e LOHR 1999; WAGNER et al., 2006; HÖFLE e PFEIFER, 2007).

$$P_r = P_t \frac{A}{\pi R^2} \rho n_0 n_a^2 \quad (8)$$

Onde P_r é a energia que retorna ao sensor, após sua emissão, reflexão pelo alvo e dispersão na atmosfera. P_t é a energia do pulso na saída do laser. ρ é a reflectância do alvo, A é a área efetiva do laser na superfície do alvo, R é a distância entre o sensor e o alvo, η_0 é

eficiência de transmissão óptica do sensor, o pulso laser e as propriedades do receptor e η_a^2 a eficiência de transmissão da atmosfera entre o sensor e o alvo.

Outros termos como brilho, irradiância, radiância, BRDF ou BRF (radiação retroespalhada pela superfície em dada direção), fator de reflectância ou reflectância relativa também são usados.

Na prática, os sensores laser scanners medem o fluxo de fótons que entram no receptor a partir de uma determinada direção e ângulo sólido, ou seja, a radiação dispersa a qual está relacionada com a potência do sinal recebido. Os scanners a laser gravam o retorno discreto da potência do pulso recebido como um único número digital representando a intensidade. A intensidade gravada é proporcional a função de distribuição bidireccional de reflectância (BRDF) do alvo, que pode ser escrita em termos de potência do laser de acordo com a Equação 9, (LEADER, 1979):

$$BRDF = \frac{\partial^2 P_s}{\partial P_i \partial \Omega_s} \frac{1}{\cos \theta_s} \quad (9)$$

Onde P_i e P_s são a energia incidente no alvo e a energia (dispersão) que retorna ao sensor respectivamente, Ω_s é o ângulo sólido de dispersão e θ_s é o ângulo entre a direção de dispersão e a normal da superfície do alvo.

A intensidade de retorno é dependente das características físico-químicas do material do alvo. Tomaselli (2003) comenta que a intensidade pode ser usada para criar uma imagem associada à reflectância da superfície no comprimento de onda utilizado. Intensidades geometricamente normalizadas são proporcionais à reflectância do alvo (SONG et al., 2002; AHOKAS et al., 2006; COREN e STERAZI 2006; PFEIFER et al., 2008). Por conseguinte, os materiais com diferentes propriedades de reflexão podem ser distinguidos pela variação na sua intensidade (SONG et al., 2002; LUTZ et al., 2003; AHOKAS et al., 2006; HÖFLE e PFEIFER 2007).

Tanto as condições físicas como ambientais impactam os valores de intensidade. Os fatores físicos mais importantes são a distância e a reflectância do alvo, com ângulo de incidência e rugosidade sendo secundários. Condições ambientais como umidade, poeira, e as variações na densidade do ar também podem afetar a intensidade. Quando as informações de intensidade são adquiridas em condições favoráveis (umidade do ar baixa) e as variáveis geométricas corrigidas, a intensidade torna-se proporcional à reflectância (LUTZ et al., 2003;

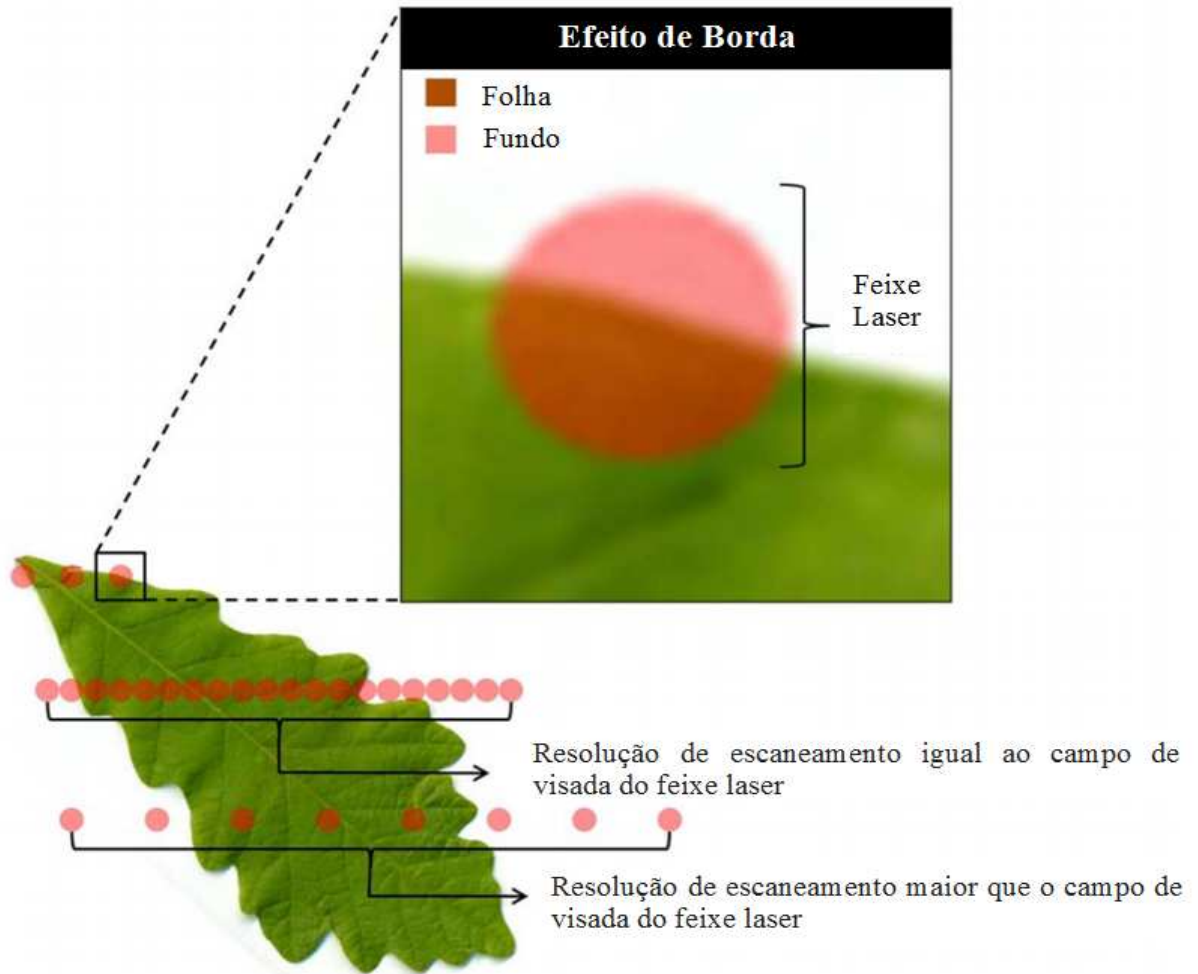
AHOKAS et al., 2006; HÖFLE e PFEIFER, 2007; PFEIFER et al., 2007). No entanto, essas condições físicas afetam mais significativamente a intensidade de lasers aerotransportados pelo fato deles estarem a distâncias muito maiores dos alvos do que os terrestres.

Embora a teoria diga que os lasers terrestres sejam menos afetados pelas condições físicas, é necessário que se realize uma grande quantidade de estudos de calibração. Estudos sobre a calibração de lasers aerotransportados tornaram-se disponíveis recentemente, mas para os LST são ainda pouco disponíveis. Alguns estudos de calibração radiométrica de LST podem ser vistos em Kaasalainen et al., (2009) e (2011), Pfeifer et al (2007), Höfle e Pfeifer, (2007) e Sielstad et al., (2011). Estes estudos têm focado na análise da influência dos ângulos e da distância da aquisição da intensidade aos alvos. Quanto aos estudos sobre a influência angular, Höfle e Pfeifer, (2007) dizem que a quantidade de radiação eletromagnética de um feixe que atinge uma determinada unidade de área de superfície atinge o seu máximo quando a área de superfície é perpendicular ao feixe de luz ($\cos 90^\circ = 0$), e diminui à medida que o ângulo da superfície se desvia desta orientação perpendicular.

A relação entre a refletividade dos alvos e a intensidade do laser emitido é diretamente proporcional ao alcance do Laser Scanner, ou seja, se um determinado alvo possui 10% de refletividade, o equipamento deverá estar muito mais próximo do que um alvo que possui 90% de refletividade (PETRIE e TOTH, 2009).

Algumas técnicas de correção diferentes têm sido propostas para explicar o ângulo de incidência do laser e da lei do inverso do quadrado da distância da propagação da luz (COREN e STERZAI, 2006; HÖFLE e PFEIFER, 2007; KAASALAINEN et al., 2009). No entanto, pouco se sabe sobre como corrigir um fator complicador conhecido como o efeito de borda (VAN GENECHTEN et al., 2008; BOEHLER et al., 2001; EITEL et al., 2010), (Figura 11). O efeito de borda ocorre quando o feixe de laser é dividido na extremidade de um objeto e o seu retorno é uma combinação de sinais refletidos a partir de pelo menos dois objetos. Pode-se tomar como exemplo a borda de uma folha e algum objeto que está atrás. O sinal, ao retornar ao sensor registra uma informação que mescla dados da folha e do alvo atrás. Ou ainda, porque apenas uma fração do feixe de laser é devolvida para o sensor e o outro é fraco demais para desencadear um sinal.

Figura 11 - Ilustração do efeito de borda nas folhas.



Fonte: Eitel (2010).

REFERÊNCIAS

- Ahokas, E., Kaasalainen, S., Hyypä, J., Suomalainen, J. Calibration of the Optech ALTM 3100 laser scanner intensity data using brightness targets. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2006.
- Bagnato, V. S. Os Fundamentos da luz laser. *Física na Escola, São Carlos*, v. 2, n. 2, p. 4-9, 2001.
- Baltsavias, E. P., Airborne laser scanning: basic relations and formulas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* v. 54, p. 199–214, 1999.
- Béland, M., Widlowskib, J., Fourniera, R. A., Côtéa, J., Verstraeteb, M. Estimating leaf area distribution in savanna trees from terrestrial LiDAR measurements. *Agricultural and Forest Meteorology* v. 151, p. 1252– 1266, 2011.
- Bellian, J. A.; Kerans, C.; Jennette, D. C. Digital Outcrop Models: applications of terrestrial scanning lidar technology in stratigraphic modeling. *Journal of Sedimentary Research*, v. 75, n. 2, p. 166-176, 2005.
- Blaschke, T; Kux, H. Sensoriamento remoto e SIG avançados: novos sistemas sensores: métodos inovadores. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 303 p.
- Boehler, W.; Heinz, G.; Marbs, A. The potential of non-contact close range laser scanners for cultural heritage recording. CIPA – International Symposium, Proceedings. Potsdam, Germany – 2001.
- Bohr, N. Sobre a constituição de átomos e moléculas. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1979.
- Centeno, J. S.; Wutke, J. D.; Kersting, A. P. B. Comparação de Geração de Modelos Tridimensionais Usando Laser Scanner Terrestre e Restituição Fotogramétrica Monocular. In: I Simpósio De Ciências Geodésicas E Tecnologias Da Geoinformação - SIMGEO, 2004, Recife. Anais do I Simpósio De Ciências Geodésicas E Tecnologias Da Geoinformação - SIMGEO. Recife, 2004. v. 1.
- Colwell, R.N.; Manual of Remote Sensing. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, Falls Church. Virginia, 2nd ed, 1983.
- Coren, F., Sterzai, P., 2006. Radiometric correction in laser scanning. *International Journal of Remote Sensing* 27 (15–16), 3097–3104.
- Drummond, A. M. C. Confiabilidade Metrológica de Equipamentos Eletromédicos a Laser e a Luz Intensa Pulsada. PUC-Rio, dissertação de mestrado 17 (2007).
- Eitel, J.U.H., Vierling, L.A., Long, D.S. Simultaneous measurements of plant structure and chlorophyll content in broadleaf saplings with a terrestrial laser scanner. *Remote Sensing of Environment* v. 114, p. 2229-2237, 2010.

- Elachi, C. Introduction to the physics and techniques of remote sensing. New York: Wiley, 1987.
- Fitz, P. R. Geoprocessamento sem complicação. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 160 p.
- Florenzano, T. G. Imagens de satélite para estudos ambientais. São Paulo: Oficina de Textos, 2002. 97 p.
- Giongo, M., Koehler H. S., Machado, S. A., Kirchner, F. F., Marchetti, M. LiDAR: princípios e aplicações florestais. Pesquisa Florestal Brasileira, Colombo, v. 30, n. 63, p. 231-244, 2010.
- Gonçales, R. Dispositivo de Varredura 3D terrestre e suas aplicações na Engenharia, com ênfase em túneis. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Transporte. 132p. São Paulo. 2007.
- Halliday, D.; Resnick, R.; Walker, J.. Tudo sobre os Átomos. In: HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J.. Fundamentos de física. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007. p. 258 – 260. v.4
- Hariharan, P. Basics of Interferometry. 2ª Ed. Elsevier, 2007.
- Höfle, B., and Pfeifer, N. Correction of laser scanning intensity data: data and model-driven approaches: Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 62, p. 415–433, 2007.
- Jensen, J. R. Sensoriamento Remoto do Ambiente - uma perspectiva em recursos terrestres. São José dos Campos: Parêntese, 598p., 2009.
- Kaasalainen, S.; Krooks, A.; Kaartinen, H. Radiometric calibration of terrestrial laser scanners with external reference targets. Remote Sensing. v. 1, p. 144-158, 2009.
- Kaasalainen, S.; Pyysalo, U.; Krooks, A.; Vain, A.; Kukko, A.; Hyyppä, J.; Kaasalainen, M. Absolute radiometric calibration of ALS intensity data: effects on accuracy and target classification. Sensors. v. 11, p. 10586-10602, 2011.
- Leader, J.C. Analysis and prediction of laser scattering from rough-surface materials. J. OPT. Soc. Am. 69 (1979) 610-629.
- Longley, P. A.; Goodchild, M. F.; Maquire, D. J.; Rhind, D. W. Sistemas e ciência da informação geográfica. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 540 p.
- Lutz, E., Geist, T., Stötter, J., 2003. Investigations of airborne laser scanning signal intensity on glacial surfaces - Utilizing comprehensive laser geometry modeling and orthophoto surface modeling (A case study: Svartiseibreen, Norway). International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 34 (Part 3/W13), 143–148.
- Meneses, P. R.; Almeida, T. D. Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto. Universidade de Brasília, Brasília, 2012, 266p.

Nascimento Júnior, J. O., Schuler, C. A. B., Cavalcante, R. B. S. Sistema Laser Scanner. In: Simpósio Regional de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto, 3., 2006, Aracaju. Anais eletrônicos. Universidade Federal de Pernambuco, 2006.

Novo, E. M. L. M. Sensoriamento remoto: princípios e aplicações. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2010. 387 p.

Petrie, Gordon; Toth, Charles K. Terrestrial Laser Scanners. In: Shan, Jie & Toth, Charles K (org.) Topographic

Pfeifer, N., Doringe, P., Haring, A., and Fan, H., Investigating terrestrial laser scanning intensity data: quality and function relations: Urban Remote Sensing, Joint Event, Paris. v. 1, p. 1–9, 2007.

Pfeifer, N., Höfle, B., Briese, C., Rutzinger, M., Haring, A. Analysis of the backscattered energy in terrestrial laser scanning data. The international Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. v. 37 (Part B5), p. 1045-1051 Beijing, 2008.

Popescu, S.C. Lidar Remote Sensing in Advances in Environmental Remote Sensing: Sensors, Algorithms, and Applications, p. 57-84, 2011.

Reshetyuk, Y. Self-calibration and direct georeferencing in terrestrial laser scanning. Tese de doutorado em infraestrutura, geodésia. Stockholm: Royal Institute of Technology (KTH). 162p. 2009.

Sabins, F. F. Remote Sensing: Principles and Interpretation. 3 ed. Illinois: Waveland Press, Inc, 2007. 485p.

Seielstad, C.; Stonesifer, C.; Rowell, E.; Queen, L. Deriving fuel mass by size class in douglas-fir (pseudotsugamenziesii) using terrestrial laser scanning. Remote Sensing. v. 3, p. 1691-1709, 2011.

Song, J.-H., Han, S.-H., Yu, K., Kim, Y.-I., 2002. Assessing the possibility of land-cover classification using lidar intensity data. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 34 (Part 3B), 259–262.

Tommaselli, A. M. G. Um estudo sobre as técnicas de varredura a laser e fotogrametria para levantamentos 3D a curta distância. Geodésia Online -Revista da Comissão Brasileira de Geodésia. 4 / 2003 [ISSN 1415-1111].

Valença, J. M. A. Monitorização do estado de conservação de estruturas de betão por processamento de imagem e análise multi-espectral. 2011. 285 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, 2011.

Van Genechten, B., Caner, H., Heine, W., Garsía, J. L. L., Poelman, R., & Quintero, M. S. (2008). Principles of laser scanning. Theory and practice on Terrestrial Laser Scanning. Flemish Agency of the European Leonardo Da Vinci program (p. 14–35).

Wagner, W., Hyypä, J., Ullrich, A., Lehner, H., Briese, C., Kaasalainen, S. Radiometric calibration of full-waveform small-footprint airborne laser scanners *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, v.37 (Part 1), p. 163–168, 2008.

Wagner, W., Ullrich, A., Ducic, V., Melzer, T., and Studnicka, N., 2006. Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitising airborne laser scanner. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 60, 100-112.

Wehr, A., Lohr, U. Airborne laser scanning—an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*. v. 54, p. 68–82, this issue, 1999.

Wutke, J. D.. *Metodos para avaliação de um sistema laser scanner terrestre* (Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Paraná). (2006)

CAPÍTULO 3 - METHODOLOGY FOR ACQUISITION OF INTENSITY DATA IN FOREST TARGETS USING TERRESTRIAL LASER SCANNER

This chapter was published in the journal IERI Procedia, v 5, p. 238-244, 2013.

Abstract The advance of technology and the availability of high-resolution and accurate systems have permitted the development of new methods for studies in forests. Terrestrial laser scanners have been consolidated as one of the most effective technologies for geospatial data acquisition since the last decade. They have offered the possibility of mapping tridimensionally with high positional accuracy a great number of targets, including forests. However, it is quite difficult to find methodological approaches for acquisition of forest data involving these types of systems. Thus, based on a mid and long range laser scanner with an electromagnetic spectrum ranging into the mid-infrared, 1535nm, different distances and radiometric resolutions were tested in order to establish a method of acquisition of intensity data in forest targets. After processing, data were analyzed with a clustering algorithm to test the possibility of identifying different elements. Trunk, branches and leaves as well as an edge effect were satisfactorily grouped. Besides defining a method for acquisition of intensity, it opens good perspectives in terms of integrating the classification obtained by the clustering technique with the point cloud. Future studies can contribute to develop a method for quantifying the volume of forest elements and, consequently, estimate biomass.

Keywords Remote Sensing, Radiometric Resolution, Distance, K-means Algorithm, LIDAR, Mid-infrared, Edge Effect.

3.1 INTRODUCTION

The forestry as well as other areas of knowledge benefit from technological advances to develop and improve their working methods and to increase their knowledge about forests. New equipment and methods have been continually developed to support these approaches. In the last decade, systems for laser scanning and profiling have been consolidated as one of the most effective technologies for geospatial data acquisition. The automated data acquisition has expanded rapidly in recent years, together with the technological advances made in the areas of surveying and mapping (Buckley et al., 2008). The laser scanning and profiling systems, also known as Terrestrial Laser Scanner (TLS), are fast, non-destructive (Seielstad et al., 2011) and provide accurate tridimensional data, i.e., worthwhile for forest analysis. Moreover, the visual quality of the generated digital models is appropriate for many different quantitative approaches.

Spatial information obtained from laser scanners is commonly used for both volume estimation and identification and characterization of geometric features in Civil Engineering, Architecture and Geology, for example. In such areas, methodological developments have arisen in the last years in order to attend the specific necessities. However, there are relatively few studies addressing methodological approaches of terrestrial LIDAR for forest studies. Considering the data structure acquired by laser scanners, three sets of data are stored and available in their format file: spatial data (X, Y, Z), intensity of the laser pulse (I) and color data (R, G, B).

Spatial data are useful for defining volume and geometry whereas color provide texture and visual quality to the image. Intensity values are the record of the laser pulse that returned from the target and are affected by its physical and chemical characteristics. Thus, there is a potential application of the intensity values for identifying forest elements, once that trunks, branches and leaves are chemically and physically different. In order to develop new methodological approaches using remote sensors, intensity data obtained by the LIDAR technique was acquired and tested. This methodological approach is relatively new for forestry studies and each acquisition have to consider five main aspects: ranging principle, wavelength, distance, radiometric resolution and physicochemical characteristics of the target. The main goal of this study was to test a methodology for acquisition of this type of data considering the distance and radiometric resolution as important parameters and to discuss its application for forest studies.

3.2 MATERIAL AND METHODS

3.2.1 Experiment 1

The first experiment performed the scanning of an entire tree. After scanning, the file from the point cloud with 8 bits radiometric resolution containing information (X, Y, Z, I) was manually cleaned for eliminating noise and/or undesirable objects that were not part of the study material. The point cloud was classified into two classes (trunk and leaves) using K-clouds, an in-house software based on the k-means. This algorithm is a cluster classifier which performs a process of partitioning of a population of n in k classes. These partitions represent the internal variation which occurs within each class. Two images show the

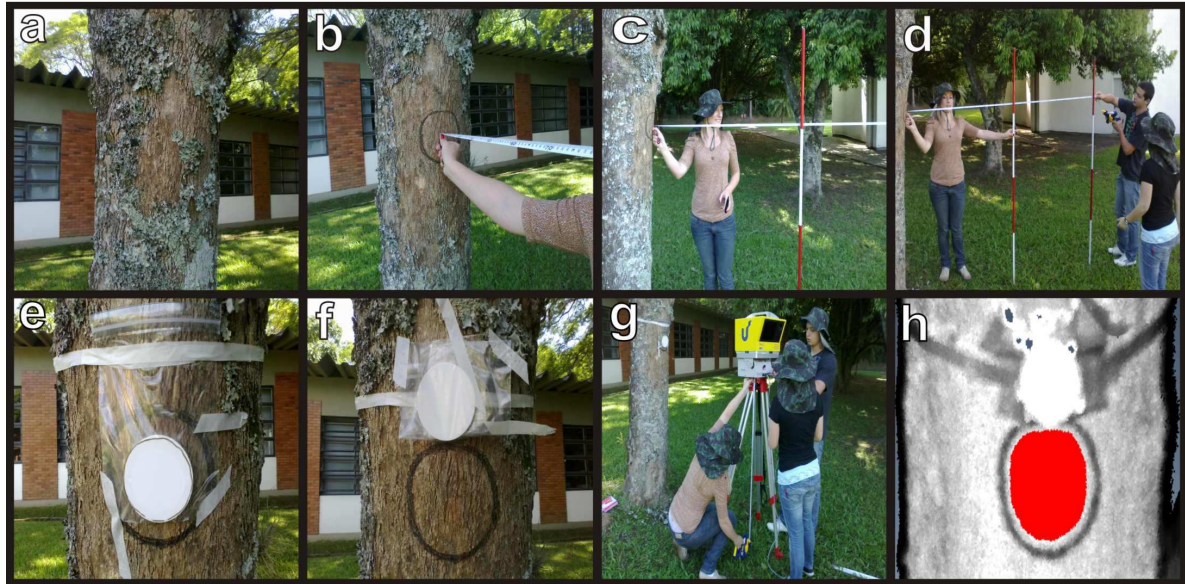
classification obtained with two and three classes. The third class was included and made possible the identification of the edge effect (Boehler et al., 2001).

3.2.2 Experiment 2

The acquisition of the intensity data is shown step by step in Figure 12. The trunk of the tree originally had lichens, which were previously removed (Figure 12 a). After cleaning, a circular area was selected on the trunk and marked with black pen (Figure 12 b). After that, distances of 1m, 2m, 3m and 5m were marked from the trunk using metric tape and pickets (Figure 12 c and 12 d). The fixation of the Spectralon[®] 99% on the tree trunk required a plastic bag in order to avoid the contact of the Spectralon[®] 99% with the surface of the tree and to remove it when necessary (Figure 12 e). The plastic was cut so that the center of Spectralon[®] 99% was the same without the plastic coating, leaving only a 5mm circular edge to fixate the plate. This fixation procedure was performed with plastic protection for the preservation of Spectralon[®] 99%, because it cannot come into contact with dust or grease.

It was necessary to perform the acquisition twice in the same area, one of them scanning the Spectralon[®] 99% and after scanning only the trunk (Figure 12 e and 12 f), always keeping the same height of the equipment in order to maintain the viewing geometry (Figure 12 g). Scanning was performed with a spacing of 0.5 mm between points for the four determined distances, for both the trunk and for the Spectralon[®] 99%. After scanning, the *X*, *Y*, *Z* and *I* data file was processed and it was possible to identify the target as shown in the Figure 12 h. The red area illustrates the selection of the target in the point cloud directly on the trunk. For the different distances, the intensity data were collected and compared in order to determine the average intensity of return of the laser beam, the minimum distance between the target and the TLS for a good quality acquisition and if radiometric resolution affects the results.

Figure 12 - Procedures for acquisition of the intensity data as a function of distance and type of target. a) Trunk before cleaning. b) Tree and the target demarcated after cleaning. c,d) Different distance demarcation using metric tape and graduated rulers. e,f) Representation of the target in the trunk and Spectralon® 99%. g) Inspection of the height of the equipment for maintaining the viewing geometry. h) Points of interest enhanced in red in the point cloud.



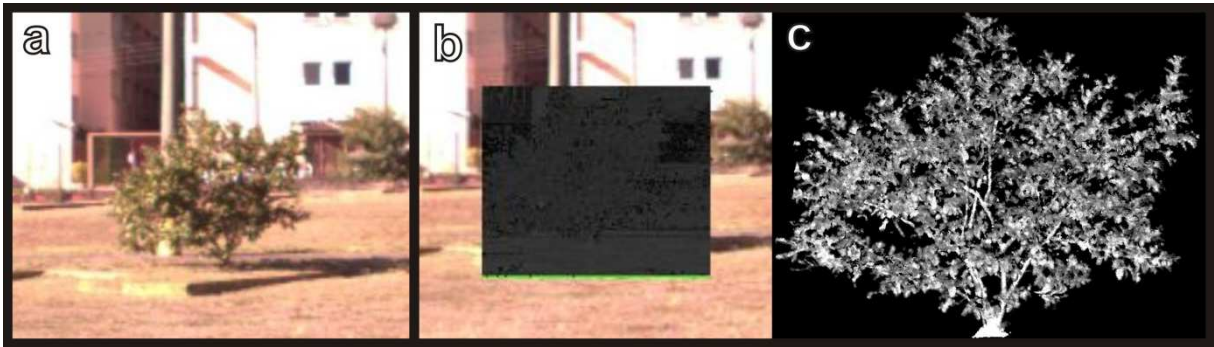
Source: The author

3.3 RESULTS AND DISCUSSION

3.3.1 Experiment 1

The results of the first experiment are shown in the Figure 13. Figure 13 shows the picture of the camera coupled to the TLS that makes possible the association of the RGB attribute with each point of the cloud. Although variations in the daylight interfere in the image quality, they did not affect the results of the present study because only the X , Y , Z , I data were used. Figure 13 b show the scanning window with the tree of interest. After processing, it is possible to see the same tree represented by the X , Y , Z , I data (Figure 13 c).

Figure 13 - Digital representation of the study object. a) Photograph of the digital camera coupled to TLS before scanning. b) Image of the TLS screen during scanning, with the gray area showing the scanning window. c) 3D model after processing of the coordinates (X, Y, Z) plus intensity (I).



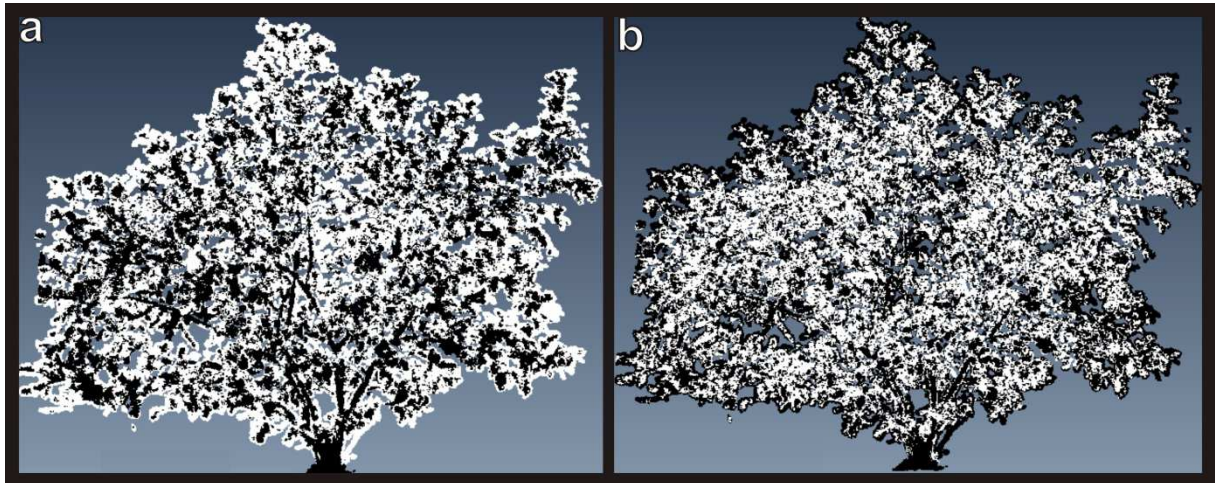
Source: The author

The results of the classification using the cluster classifier K-clouds can be seen in the Figure 14. The intensity of the point cloud with radiometric resolution of 8 bits was ranked in 2 and 3 classes. Moreover, the k-means algorithm is easily programmable and computationally economic, being capable to process large volumes of data in applications such as clustering, predicting nonlinear approximation of multivariate distributions and nonparametric tests, among others (MacQueen, 1967).

Figure 14 a shows the tree classified into two classes and it was observed that the algorithm could differentiate branches and leaves. During the visualization of the 3D model it was possible to detect the edge effect around the object. In order to isolate the edge effect from the branches and leaves in the 3D, the object was reclassified into 3 classes as shown in Figure 14 b. The edge effect can be observed both in Figures 14 a and 14 b. However, the use of 3 classes enhanced the edge effect, as shown in Figure 14 a in white color around the tree and in Figure 14 b as a more prominent black border around the tree.

This effect is related with the first and second pulses that return to the TLS. Part of the energy emitted by the laser beam hits some part of the target and part of the laser beam hits a target that is behind. After returning, the sensor records a pixel that merges both data.

Figure 14 - Intensity after classification by K-clouds. a) Point cloud classified with 2 classes. Note that white color represents both the edge effect and leaves. b) Point cloud classified with 3 classes. Note that the edge effect is better observed as a well-defined black border around the tree.

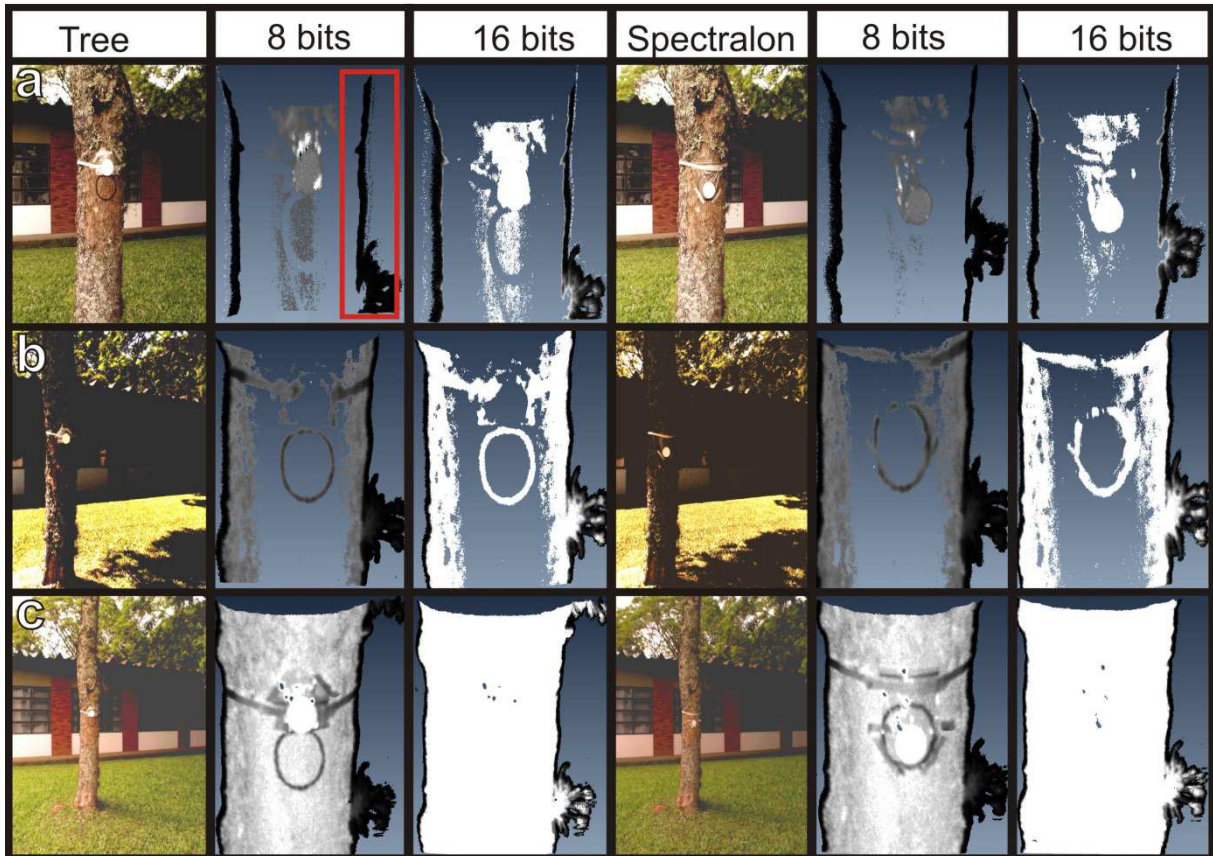


Source: The author

3.3.2 Experiment 2

The intensity of the laser beam returns to TLS after interacting with the target and is recorded together with the spatial (X , Y , Z). It was evaluated after processing of the data acquired from different sets of distance and radiometric resolution of 8 and 16 bits (Figure 15). There was not record of intensity during the acquisition far 1 meter from the target. Thus, results represent point clouds far 2 m, 3m and 5m from the target. The point cloud did not have a complete record for the distances of 2 and 3 meters; its record was satisfactory with 8 bits of radiometric resolution at 5m of distance. The resolution of 16 bits was not satisfactory because the gray scale increased and contrast decreased. It was possible to identify the edge effect in all images. The mean intensity of return of Spectralon® 99 % was the maximum over a distance of 5m.

Figure 15 - Digital photographs, point clouds and intensity classification obtained with (a) 2m, (b) 3m and (c) 5m from the target with 0.5mm of spacing between points and radiometric resolution of 8 and 16 bits. The edge effect highlighted in the red rectangle can be recognized in a), b) and c), both in 8 and 16 bits. Radiometric resolution of 16 bits did not provide satisfactory image contrast (the circular target is not visible in the trunk shown in c).



Source: The author

3.4 FINAL REMARKS

The results presented in this study demonstrate that LIDAR technique based on a pulse-based laser system can be used for distinguishing tree elements as trunk, branches and leaves, which constitute a useful application for carbon estimation and biomass quantification. Based upon the intensity data, such elements showed different characteristics after processed with a cluster classifier. Radiometric resolution of 8 bits was better than 16 bits for classification purposes as well as the minimum distance of 5 meters. Moreover, the edge effect was efficiently recognized and classified with such algorithm. This methodological approach is relatively new for forestry studies and each acquisition has to consider five main aspects: ranging principle, wavelength, distance, radiometric resolution and physicochemical

characteristics of the target. Thus, it is fundamental to define a methodology to better understand the behavior of the intensity in relation with the above-mentioned aspects. Future studies must use the point cloud to determine the total volume of each element separately, especially trunk and canopy, and try to reduce or eliminate the edge effect during processing. To establish a correlation between the intensity with physicochemical characteristics of trunks and canopies will allow the integration with volumetric data in order to predict biomass in forests.

REFERENCES

- [1] Buckley, S. J., Howell, J. A., Enge, H. D., Kurz, T. H. Terrestrial laser scanning in geology: data acquisition, processing and accuracy considerations. *Journal of the Geological Society, London*, v. 165, p. 625-638, 2008.
- [2] Seielstad, C.; Stonesifer, C.; Rowell, E.; Queen, L. Deriving fuel mass by size class in douglas-fir (*pseudotsugamenziesii*) using terrestrial laser scanning. *Remote Sensing*, v. 3, p. 1691-1709, 2011.
- [3] MacQueen, J. B. Some Methods for classification and Analysis of Multivariate Observations, *Proceedings of 5-th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, Berkeley, University of California Press, v. 1, p. 281-297, 1967.
- [4] Bohler, W.; Heinz, G.; Marbs, A. The potential of non-contact close range laser scanners for cultural heritage recording. *CIPA – International Symposium, Proceedings*. Potsdam, Germany, 2001.

CAPÍTULO 4 - EFFECTS OF DISTANCE ON LIDAR DATA INTENSITY

This chapter was published in the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (CD-ROM), v. XL-2/W1, p. 99-103, 2013.

Abstract The forest science as well as other research areas benefit from technological advancements and develop respective working methods to enrich their knowledgebase. New equipment and methods are continuously being developed to support these applications. In the last decade, laser scanning and profiling systems have been consolidated as one of the most effective technologies for geospatial data acquisition. Thus, the main objective of this study is to evaluate how the distance influences the record of the laser pulse intensity. We used a Terrestrial Laser Scanner based on the time of flight principle employing the wavelength, 1535 nm, of the infrared spectrum. In the infrared spectrum, the terrestrial laser systems are appropriate for studies of vegetation. The data acquisition was performed at 1-50 m distance using a standard board with 99% of reflectance as a control of the measurements. The results were analyzed and showed that the distance affects the intensity values. It is recommended that there should be at least 5 m as minimal distance between the laser beam and the target, as well as 8 bits of radiometric resolution, considering the specifications of the equipment used. The intensity data must be calibrated in relation to distance before being used as a data source for study of the physical and chemical characteristics of the targets. In addition, much more tests involving the correlation between angle of acquisition and distance as well as methods for reducing the edge effect must be performed.

Keywords Remote Sensing, Terrestrial Laser Scanner, K-means Algorithm, LIDAR, Laser Intensity, Radiometric Calibration

4.1 INTRODUCTION

Several recent studies with the LIDAR technology have been applied in the topography and in digital terrain modeling (Lague et al., 2013; Ergun et al., 2014), civil engineering (González-Jorge et al., 2012; Laefer et al., 2014), agriculture (Ehlert and Heisig, 2013), photogrammetry (Sahin et al., 2012), geology/geomorphology (Franceschi et al., 2011; Santana et al., 2012; Ferrari et al., 2012; Silva et al., 2012; Picco et al., 2013; Souza et al., 2013; Inocencio et al., 2014), and forestry (Fernández-Sarría et al., 2013; Poeschel et al., 2013; Eitel et al., 2010; Liang and Hyypä, 2013; Bordin et al., 2013a; Bordin et al., 2013b). The acquisition of geospatial data plays an important role in forest analysis, e.g., in providing support for the estimation of volume, identification of geometric features, measurement of amount of biomass, carbon storage estimations, etc. For this reason, researchers are increasingly proposing innovative methods and developing new technologies to deal with the automated acquisition of geospatial data, including laser scanning and profiling systems for

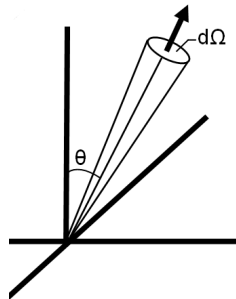
surveying and mapping purposes. In the forestry science, researchers have been testing LIDAR technology to generate reconstructed 3D models and to explore other characteristics of forestry using georeferenced point clouds (Lin et al., 2012; Raumonon et al., 2013; Seielstad et al., 2011).

The major advantage of using LIDAR is fast and non-destructive acquisition. Typically, the stored files follow a structure based on variables as the spatial coordinates (X , Y , Z), the intensity of the laser pulse (I), and the R , G , B color pattern obtained from the digital camera. The coordinates of the points are commonly used to estimate volume and identify geometric features, whereas the RGB data are used to improve the visual identification of the object. The intensity of the laser pulse may, in turn, potentiate more detailed analysis using LIDAR. However, few studies have approached intensity as target of specific studies (Wang and Lu, 2009; Barnea and Filin, 2012; Bordin et al., 2013a; Bordin et al., 2013b; Inocencio et al., 2014). The main question is to evaluate how distance affects the intensity of the laser pulse that returns after reflecting from the target. The utilization of the intensity data for correlation with physical and chemical characteristics of the target is being addressed herein.

4.1.1 Intensity

Intensity is based on the definition given by Colwell (1983) that is the variation of the flux by energy for unit by solid angle irradiated in the same direction from the point source. It is characterized by the symbol I and is given in watts per estereoradian (W/sr). Or even as the quantity of energy that passes through a unit area per second, per estereoradian. The Figure 16 and Equation 10 illustrate this concept.

Figure 16 - Point source radiating energy in a solid angle (Colwell, 1983).



Source: adapted Colwell (1983).

$$I = \frac{E}{A \cos \theta d\Omega} \quad (10)$$

Where I is the intensity, E is the quantity of energy that passes through a unit area per second, A is the area and $d\Omega$ is the solid angle.

The radiation does a solid angle $d\Omega$ with the normal to the area A . And, the projection of this area with the radiation passing is given by $A \cos \theta$. The intensity can be defined by the analogy to the RADAR equation. In terms of LIDAR, the energy that returns is described by Equation 11, (Baltasvias; 1999; Wehr and Lohr, 1999; Höfle and Pfeifer, 2007; Wagner et al., 2008). Other terms such as brightness, irradiance, BRDF or BRF (backscattered of radiation from the surface in a given direction), reflectance factor or relative reflectance are also used.

$$P_r = P_t \frac{A}{\pi R^2} \rho n_0 n_a^2 \quad (11)$$

Where P_r is the energy that returns to the sensor after its emission, reflection in the target and dispersion in the atmosphere. P_t is the energy of the laser output pulse, ρ is the reflectance of the target, A is the effective area of the laser on the surface of the target, R is the distance between the sensor and the target, n_0 is the transmission efficiency of the optical sensor, the laser pulse, and the properties of the receiver and n_a^2 is the efficiency of transmission of the atmosphere between the sensor and target.

In fact, laser scanner sensors measure the photon flux that enters the receiver from a given direction and the solid angle or the scattered radiation that is related to the received signal power. Laser scanners record the discrete return of pulse power received as a single digital number representing the intensity. The recorded intensity is proportional to the function of bi-directional reflectance distribution (BRDF), which can be written in terms of laser power in accordance with Equation 12 (Leader, 1979).

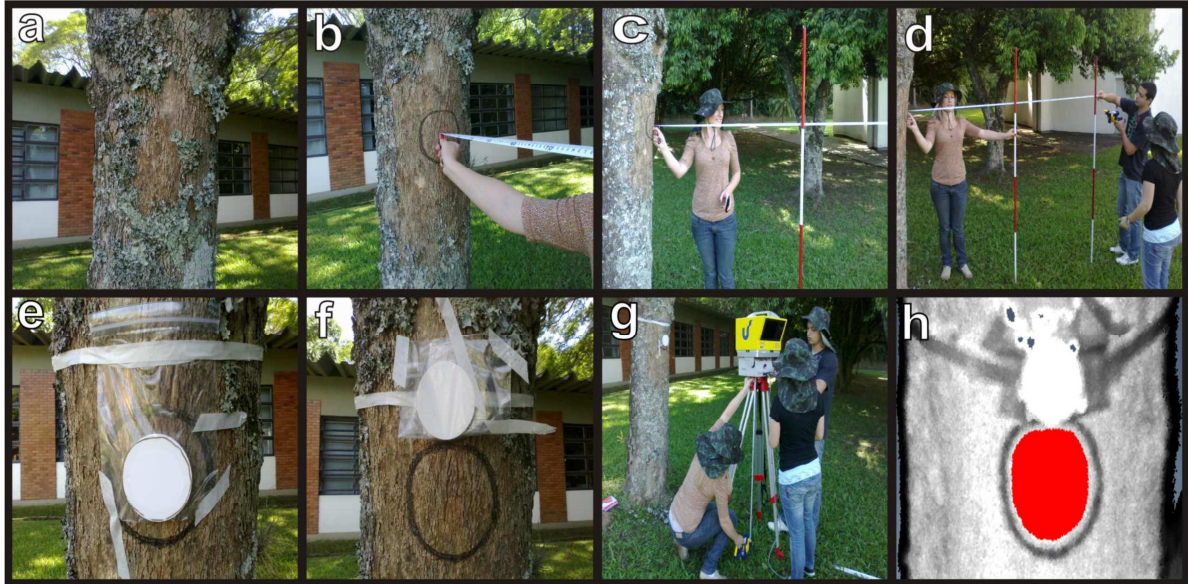
$$BRDF = \frac{\partial^2 P_s}{\partial P_i \partial \Omega_s} \frac{1}{\cos \theta_s} \quad (12)$$

Where P_i and P_s are the energy incident on the target and the energy (dispersion) that returns to the sensor, respectively, Ω_s is the solid angle of dispersion and θ_s is the angle between the direction of the surface normal and the scattering target.

4.2 MATERIAL AND METHODS

The experiment used a Terrestrial Laser Scanner 3D Ilris Optech, a mid and long range pulse-based laser scanner integrated with a metric camera of 3.0 megapixels. The acquisition was planned and executed in two steps. The first step of acquisition was for determination of the minimum distance between the equipment and the target (the trunk of a tree) to acquire the intensity data. It measured the distance as 1-5 m. The second step was performed on two different targets on the same tree trunk. One target was a sample of the trunk and the other was a standard Spectralon[®] 99% reflectance board at a distance between 1 and 50 m and radiometric resolutions of 8 and 16 bits. The acquisition of the intensity data is shown step by step in Figure 17. The trunk of the tree originally had lichens, which were previously removed (Figure 17 a). After cleaning, a circular area was selected on the trunk and marked with black pen (Figure 17 b). After that, distances of 1- 50 m were marked from the trunk using metric tape and pickets (Figure 17 c and 17 d). The fixation of the Spectralon[®] 99% on the tree trunk required a plastic bag in order to avoid the contact of the Spectralon[®] 99% with the surface of the tree and to remove it when necessary (Figure 17 e). The plastic was cut so that the center of Spectralon[®] 99% was exposed, leaving only a 5 mm circular edge to fixate the plate. This fixation procedure was performed to protect Spectralon[®] 99% from dust and grease. It was necessary to perform the acquisition twice in the same area; one by the scanning of Spectralon[®] 99% and the other by scanning only the trunk (Figure 17 e and 17 f). The height of the equipment was always kept at the same position in order to maintain the viewing geometry (Figure 17g).

Figure 17 - Procedures for acquisition of the intensity data as a function of distance and type of target. a) Trunk before cleaning; b) Tree and the target demarcated after cleaning; c & d) Different distance demarcation using metric tape and graduated rulers; e & f) Representation of the target in the trunk and Spectralon® 99%; g) Inspection of the height of the equipment for maintaining the viewing geometry; h) Points of interest enhanced in red in the point cloud (From Bordin et al., 2013a).



Source: The author

For the distances, 1, 2, 3 and 5 m, the intensity data were collected and compared in order to determine the average intensity of return of the laser beam. Such information helped to establish some criteria for imaging forest targets, aiming the correlation with physical and chemical properties, as well as to perform the radiometric calibration. The edge effect was eliminated and the scanning was performed perpendicular to the target (90°); therefore, there was no influence of the viewing angle on the acquisition of intensity. The calibration model was developed at the distances, 5, 10, 15, 20, 30, and 50 m, and adjusted by the method of least squares (Equations 14, 15, 16 and 17) from a second-order polynomial (Equation 13), according to the following details:

$$I_{(n)} = ad^2_{(n)} + bd_{(n)} + c_{(n)} \quad (13)$$

Where I is the intensity acquired with n ranging from 1-6 experiments performed at distances of 5- 50 m; d is the distance to the target in meters and a , b , c are the adjustment coefficients.

$$X = (A^T A)^{-1}(A^T L) \quad (14)$$

$$X = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}_{(3 \times 1)} \quad (15)$$

Where $X_{(3 \times 1)}$ is the value of the parameters to be adjusted and correspond to the coefficients a , b , and c of the model $I_{(n)}$, Equation 13.

$$A = \begin{bmatrix} \frac{d_{I(n=1)}}{d_a} & \frac{d_{I(n=1)}}{d_b} & \frac{d_{I(n=1)}}{d_c} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{d_{I(n=6)}}{d_a} & \frac{d_{I(n=6)}}{d_b} & \frac{d_{I(n=6)}}{d_c} \end{bmatrix}_{(6 \times 3)} \quad (16)$$

Where $A_{(6 \times 3)}$ corresponds to the matrix formed by the partial derivative of intensity related with coefficients a , b and c of the model with n ranging from 1 to 6 experiments.

$$L = \begin{bmatrix} I_{(n=1)} \\ \dots \\ I_{(n=6)} \end{bmatrix}_{(6 \times 1)} \quad (17)$$

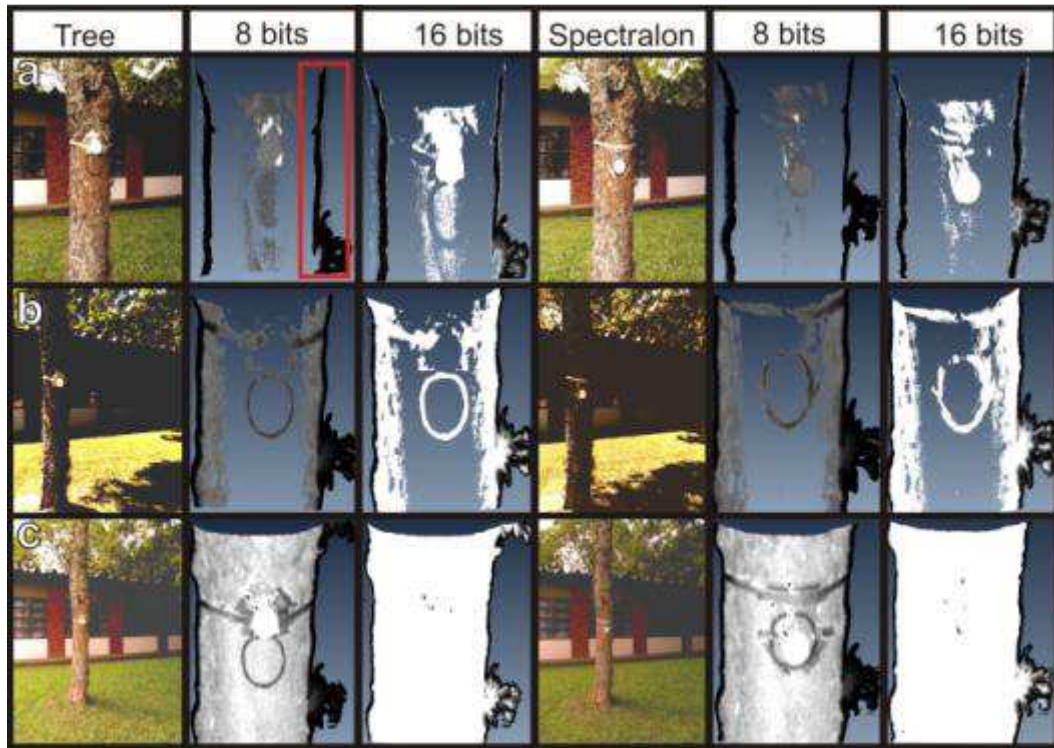
Where A^T is the transposed matrix of $A_{(3 \times 6)}$ and $L_{(6 \times 1)}$ corresponds to the value of the independent terms of equation system $I_{(n)}$.

From the results of the intensity acquisition at distances, 5, 10, 15, 20, 30, and 50 m, it was possible to define a model for radiometric calibration with the variables I (intensity in digital numbers from 0 to 255) and d (distance in meters ranging from 5 to 50).

4.3 RESULTS AND DISCUSSION

The intensity of the laser beam returning to TLS after interacting with the target is recorded together with the spatial coordinates (X , Y , Z). The intensity was subsequently evaluated after processing the data acquired from different sets of distance and radiometric resolution of 8 and 16 bits (Figure 18). There was no record of intensity during the acquisition at a distance of 1 m from the target. Thus, the results represent point clouds 2, 3, and 5 m far from the target. The point clouds did not have a complete record for the distances of 2 and 3 m; its record was satisfactory with 8 bits of radiometric resolution at a distance of 5 m. The resolution of 16 bits was not satisfactory because the grayscale increased and contrast decreased. It was possible to identify the edge effect in all images. The mean intensity of return of Spectralon[®] 99% was the maximum over a distance of 5 m.

Figure 18 - Digital photographs, point clouds and intensity classification obtained with (a) 2 m, (b) 3 m, and (c) 5 m from the target with 0.5 mm of spacing between points and radiometric resolution of 8 and 16 bits. The edge effect highlighted in the red rectangle can be recognized in a), b) and c), both in 8 and 16 bits. Radiometric resolution of 16 bits did not provide satisfactory image contrast (the circular target is not visible in the trunk shown in c) (From Bordin et al., 2013a).



Source: The author

Although laser scanner Iris-3D is based on the time of flight principle, similar observations were made in equipment operating by phase difference (Kaasalainen et al, 2009). Subsequent experiments tested distances of 5, 10, 15, 20, 30, and 50 m and the intensity decreased at a distance more than 10 m, probably due to the glare reducer (Figure 19). It was possible to establish a model of intensity versus distance which may be represented by a second order polynomial equation with $R^2 = 0.9588$ (Equation 18).

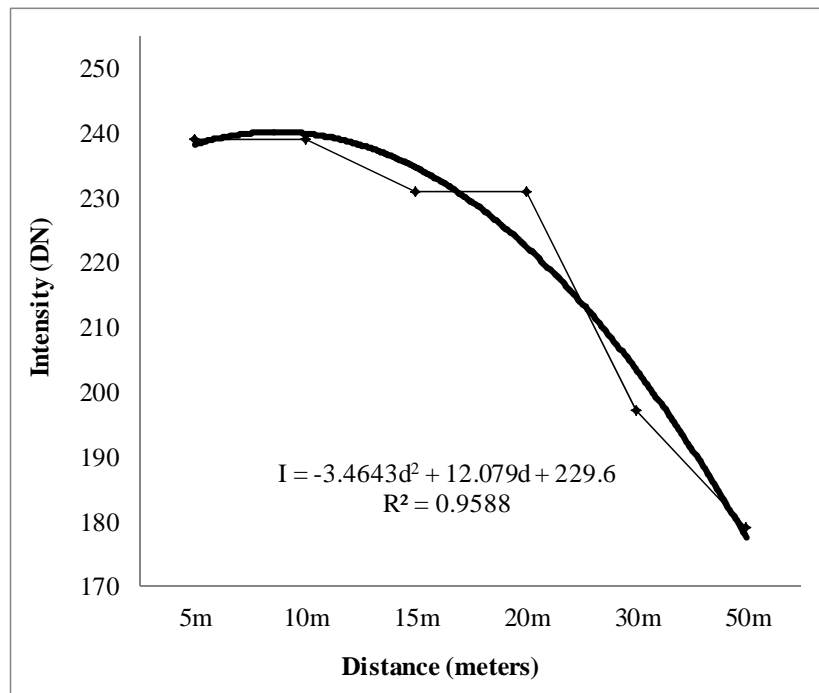
$$I = -3.4643 d^2 + 12.079 d + 229.6 \quad (18)$$

Where I is the return intensity in digital number of TLS and d is the distance between the sensor and the target in meters.

In this case, the results indicated that for distances of 5-10 m, both the measured intensity and the mathematical model curve were coincident. At a distance higher than 10 m,

the measured values can be higher or lower than the theoretical curve. It is important to note that the Equation 18 is based on a methodology in which the edge effect was eliminated and the scanning was performed perpendicular to the target (90°), so that there was no influence of the viewing angle on the acquisition of intensity.

Figure 19 - Mathematical model for the adjustment between intensity and distance.



Source: The author

This model adjusts the intensity data with the distance. It is normalized and allows adjustment with data acquired at different distances. In other words, if methodologically it is impossible to perform acquisition based on the same distance and perpendicular to the target, this model is capable to correct the intensity data obtained in different conditions. The distance has a direct influence on the intensity data acquisition. However, much more research is necessary for a complete understanding of its influence in the recorded intensity. Tests involving different angles between equipment and target as well as the correlation among intensity, angle, and distance must be performed in order to calibrate the intensity recorded under different acquisition conditions. Only with a well-established acquisition procedure, intensity data will be useful and reliable for correlations and interpretations with physical and chemical characteristics.

The necessity of the detailed studies involving intensity data can be emphasized, for example, by comparing the results of this study with those obtained by Eitel et al. (2010). The authors used equipment based on the time of flight, but with a wavelength in the visible zone, i.e., 532 nm. They developed a methodology for acquisitions, 1-2.6 m far from the target and reported that distance did not affect the intensity data. However, the equipment used in this experiment requires a minimum distance of 5 m. It is important to mention that laser beam is too stronger when nearer the source; therefore the effect of distance must be tested at different distances between the equipment and the target. Some devices have dimmer brightness which allows acquisitions within less than 3 m distance from the target (Kaasalainen et al. 2009) but this type of information is seldom available to the end user.

4.4 FINAL REMARKS

The main objective of this study was to evaluate how distance affects the data acquisition for intensity, when the acquisition is made perpendicular to the target. Moreover, this study has proposed a numerical model to calibrate the dataset acquired from different distances. We recommend at least 5 m as minimal distance between the laser beam and the target, as well as 8 bits of radiometric resolution, considering the specifications of the equipment used.

Future investigation involving intensity data must find the correlation between distance and angle of acquisition in order to refine the numerical models of calibration that will support reliable applications of the intensity data. Another aspect of investigation, involving intensity data, could be finding a relation with the edge effect. Methods for reducing or eliminating the edge effect have to be developed in order to provide an efficient data processing thus resulting in normalized data for different applications. Thus, calibration of the intensity data in relation with distance and angle of acquisition and reduction of the edge effect will be fundamental to test applications in different areas of knowledge.

REFERENCES

Baltsavias, E.P., Airborne laser scanning: basic relations and formulas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54 (1999) 199-214.

- Barnea, S.; Filin, S. Extraction of Objects from Terrestrial Laser Scans by Integrating Geometry Image and Intensity Data with Demonstration on Trees. *Remote Sensing*, 4 (2012) 88-110.
- Bordin, F.; Teixeira, E. C.; Rolim, S. B. A.; Tognoli, F. M. W.; Veronez, M. R.; Silveira Junior, L. G.; Souza, C. F. N. Methodology for acquisition of intensity data in forest targets using terrestrial laser scanner. *IERI Procedia* 5 (2013a) 238-244.
- Bordin, F.; Teixeira, E. C.; Rolim, S. B. A.; Tognoli, F. M. W.; Souza, C. N.; Veronez, M. R. Analysis of the influence of distance on data acquisition intensity forestry targets by a LIDAR technique with terrestrial laser scanner. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XL-2/W1, (2013b) 99-10.
- Colwell, R.N. *Manual of Remote Sensing*. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, Falls Church. Virginia, 2nd ed, 1983.
- Ehlert, D.; Heisig, M. Sources of angle-dependent errors in terrestrial laser scanner-based crop stand measurement. *Computers and Electronics in Agriculture*, 93 (2013) 10-16.
- Eitel, J.U.H., Vierling, L.A., Long, D.S. Simultaneous measurements of plant structure and chlorophyll content in broadleaf saplings with a terrestrial laser scanner. *Remote Sensing of Environment*, 114 (2010) 2229-2237.
- Ergun, B.; Sahin, C.; Ustuntas, T. Segmentation and determination of grid points of curve points in terrestrial laser scanning data for regular curve surfaces via C-means integrated fuzzy logic approach. *Optics and Lasers in Engineering*, 52 (2014) 261–268.
- Fernández-Sarría, A.; Martínez, L.; Velázquez-Martí, B.; Sajdak, M.; Estornell, J.; Recio, J. A. Different methodologies for calculating crown volumes of *Platanus hispanica* trees using terrestrial laser scanner and a comparison with classical dendrometric measurements. *Computers and Electronics in Agriculture*, 90 (2013) 176-185.
- Ferrari, F.; Veronez, M. R. ; Tognoli, F. M. W.; Inocencio, L. C.; Paim, P. S. G.; Silva, R. M. Visualização e interpretação de modelos digitais de afloramentos utilizando Laser Scanner Terrestre. *Geociências* 31 (2012) 79-91.
- Franceschi, M.; Teza, G.; Preto, N.; Pesci, A.; Galgaro, A.; Girardi, S. Discrimination between marls and limestones using intensity data from terrestrial laser scanner. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64 (2009) 522-528.
- González-Jorge, H.; Gonzalez-Aguilera, D.; Rodriguez-Gonzalvez, P.; Arias, P. Monitoring biological crusts in civil engineering structures using intensity data from terrestrial laser scanners. *Construction and Building Materials*, 31 (2012) 119-128.
- Höfle, B., and Pfeifer, N. Correction of laser scanning intensity data: Data and model-driven approaches. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 62 (2007) 415-433.
- Inocencio, L. C.; Veronez, M. R.; Tognoli, F. M. W.; Souza, M. K.; Silva, R. M.; Junior, L. G. S.; Silveira, C. L. B. Spectral pattern classification in LIDAR data for rock identification in outcrops. *The Scientific World Journal*, 2014 (2014) 1-10.

Kaasalainen, S.; Krooks, A.; Kaartinen, H. Radiometric calibration of terrestrial laser scanners with external reference targets. *Remote Sensing*, 1 (2009) 144-158.

Laefer, D. F.; Truong-Hong, L.; Carr, H.; Singh, M. Crack detection limits in unit based masonry with terrestrial laser scanning. *NDT & E International*, 62 (2014) 66-76.

Lague, D.; Brodu, N.; Leroux J. Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (N-Z). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 82 (2013) 10-26.

Leader, J.C. Analysis and prediction of laser scattering from rough-surface materials. *J. OPT. Soc. Am.* 69 (1979) 610-629.

Liang, X.; Hyypä, J. Automatic stem mapping by merging several terrestrial laser scans at the feature and decision levels. *Sensors* 13 (2013) 1614-1634.

Lin, Y.; Hyypä, J.; Kukko, A.; Jaakkola, A.; Kaartinen, H. Tree Height Growth Measurement with Single-Scan Airborne, Static Terrestrial and Mobile Laser Scanning. *Sensors*, 12 (2012) 12798-12813.

Picco, L.; Mao, L.; Cavalli, M.; Buzzi, E.; Rainato, R.; Lenzi, M.A. Evaluating short-term morphological changes in a gravel-bed braided river using terrestrial laser scanner. *Geomorphology*, 201 (2013) 323-334.

Pueschel, P. The influence of scanner parameters on the extraction of tree metrics from FARO Photon 120 terrestrial laser scans. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 78 (2013) 58-68.

Raunonen, P.; Kaasalainen, M.; Åkerblom, M.; Kaasalainen, S.; Kaartinen, H.; Vastaranta, M.; Holopainen, M.; Disney, M.; Lewis, P. Fast Automatic Precision Tree Models from Terrestrial Laser Scanner Data. *Remote Sensing*, 5 (2013) 491-520.

Sahin, C.; Alkis, A.; Ergun, B. ; Kukur, S.; Batuk, F.; Kilic, A. Producing 3D city model with the combined photogrammetric and laser scanner data in the example of Taksim Cumhuriyet square. *Optics and Lasers in Engineering*, 50 (2012) 1844-1853.

Santana, D.; Corominas, J.; Mavrouli, O.; Garcia-Sellés, D. Magnitude–frequency relation for rockfall scars using a Terrestrial Laser Scanner. *Engineering Geology*, 145–146, (2012) 50–64.

Seielstad, C.; Stonesifer, C.; Rowell, E.; Queen, L. Deriving fuel mass by size class in douglas-fir (*pseudotsugamenziesii*) using terrestrial laser scanning. *Remote Sensing*. 3 (2011) 1691-1709.

Silva, R. M.; Lamberty, D.; Inocencio, L. C.; Tognoli, F. M. W.; Jacobi, L.; Veronez, M. R. LIDAR for visualization of 3D geological models. *Coordinates*, 8 (2012) 14-16.

Souza, M. K.; Veronez, M. R.; Tognoli, F. M. W.; Silveira Junior, L. G.; Inocencio, L. C.; Silva, R. M.; Modena, R. C. C. Terrestrial laser scanning: Application for measuring of structures information in geological outcrops. *International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS*, 2 (2013) 260-270.

Wagner, W., Hyypä, J., Ullrich, A., Lehner, H., Briese, C., Kaasalainen, S. Radiometric calibration of full-waveform small-footprint airborne laser scanners. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37 (2008) 163-168.

Wang, C.-K.; Lu, Y.-Y. Potential of ILRIS3D Intensity Data for Planar Surfaces Segmentation. *Sensors*, 9 (2009) 5770-5782.

Wehr, A., Lohr, U., Airborne laser scanning an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54 (1999) 68-82.

CAPÍTULO 5 – AN INTENSITY RECOVERY ALGORITHM (IRA) FOR MINIMIZING THE EDGE EFFECT OF LIDAR DATA

Abstract The terrestrial laser scanner is a piece of topographic equipment developed for surveying applications and is also used for many other purposes due to its ability to acquire 3D data quickly. Although many light detection and ranging (LIDAR) studies have been published in recent years, studies addressing methodological approaches to use intensity data from LIDAR are quite rare. In forestry, the intensity of the terrestrial laser scanner (TLS) returning from forest targets can be correlated with characteristics that can help to estimate biomass and carbon storage. However, before intensity data can be used for analysis, it must be processed in order to minimize the edge or border effect, one of the most serious problems of LIDAR's intensity data. In this work, we have identified two types of distortions in the point cloud data caused by the edge effect. The first distortion modifies the intensity values while the second distortion shifts points along the y-axis. Previous studies have not provided any automatic methods to eliminate or minimize the edge effect on intensity data. Our research has focused on characterizing the edge effect behavior as well as to develop an algorithm to minimize edge effect distortion (IRA). Based on a clustering process, together with centroid- and quadtree-based approaches, an algorithm was written to correct intensity data automatically. The IRA showed to be effective recovering 35.71% of points distorted by the edge effect in this study. This research showed that the IRA can provide significant improvements and promising results for the development of applications based on TLS data intensity for environmental studies.

Keywords Intensity Recovery Algorithm, Edge Effect LIDAR, Remote Sensing, Terrestrial Laser Scanner, Forestry.

5.1 INTRODUCTION

In the last decade, laser scanning and profiling have been consolidated into one system to provide one of the most effective technologies for geospatial data acquisition. Automated data acquisition equipment has made rapid technological advances in recent years, together with other surveying and mapping technologies. Laser scanning and profiling systems are fast, non-destructive and provide accurate tridimensional data.

Geometric information obtained from laser scanners are commonly used to estimate volume and characterize geometric features in many different research areas. For each area, methodological approaches have advanced in recent years to evaluate specific features. In forestry studies, researchers have developed methodologies using TLS to estimate volume and perform reconstructions (Keightley and Bawden, 2010; Rosell and Sanz, 2012; Dassot et al.,

2012), diameter breast height (DBH) and height (Hyypä and Inkinen, 1999; Hyypä et al., 2001), leaf area density (*LAD*) and leaf area index (*LAI*) (Béland et al, 2011). However, few studies provide methodological approaches to use TLS intensity data (Eitel et al. 2010; Burton et al., 2011; Inocencio et al., 2014).

Our starting point is to recover intensity data distorted by the edge from data acquired with a terrestrial laser scanner. The principle of this research is that intensity data can be used to obtain information regarding water content or other characteristics of targets, but it is required to minimize this effect. The edge effect is one of the most serious problems that appear during data acquisition by laser scanners or other remote sensors.

This effect occurs in two cases. The first one is when the laser beam is divided by an object and returns as a combination of reflected signals from at least two objects. An example is the edge of a leaf plus an object behind the leaf. The signal returning to the sensor provides information that merges data from the leaf and data from the target behind the leaf. The second is when part of the laser beam collides with the target and part of radiation is lost. In other words, only a fraction of the laser beam returns to the sensor or is too weak to trigger a signal.

The problem of edge effect was already reported in the literature (Eitel et al., 2010), however none provided satisfactory solutions until now. Previous studies do not provide any methodology to minimize or eliminate the edge effect of intensity data. Our research contributes to an understanding of the edge effect and provides an algorithm that automatically minimizes this effect. These results were made possible by the development of the intensity recovery algorithm (IRA). The IRA can be used in a number of applications in different research areas. As intensity data is related to physical and chemical characteristics of the targets (Inocencio et al., 2014), elimination or minimization of the edge effect is beneficial for research that intends to infer, correlate or interpret these data.

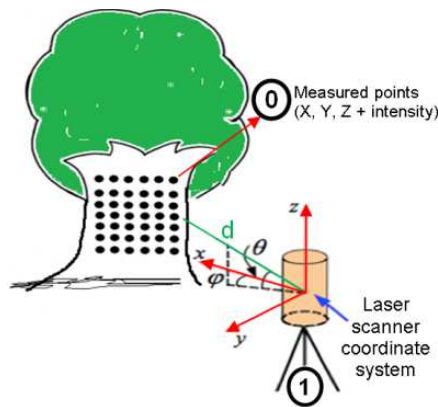
5.1.1 Terrestrial Laser Scanner

Laser light has important properties that distinguish it from ordinary light, such as coherence, wavelength, spectral purity, directivity and divergence of the beam, modulation of power and polarization of light. The TLS is based on the emission of a laser beam toward the target. The TLS for topographic mapping, also referred to as topographic LIDAR, emits a

narrow laser beam that pulses with high repetition frequency. The scanner measures the round-trip time of the pulses between sensor and the target before calculating the position of each point. Calculations are based on two different operating principles, the time of flight and the phase difference.

Most TLS equipment generates a data file based on coordinates of points in space (X , Y , Z), the intensity value after collision with the target (I) and, if available, the RGB values from a digital camera. These data result in the sequence X , Y , Z , I , R , G , B that is recorded as a text file. Figure 20 schematically illustrates data acquisition performed with a TLS to collect this type of data.

Figure 20 - Schematic representation of geometric coordinates (X , Y , Z) and intensity data acquisition (I).



Source: adapted Reshettiuk (2009).

The distance between the sensor and the target is determined by Equation (19) that takes into account the time interval between the emission and return of the signal and also the speed of light.

$$d = \frac{1}{2} c t l \quad (19)$$

Where d is the distance between the sensor and the target, c is the speed of light, tl is the time interval between the emission and the return by the sensor and $1/2$ is the fraction that considers the half-way point between the emission and return of the laser pulse.

The geometric information (X_0 , Y_0 , Z_0) is generated by Equations (20), (21) and (22) where X_0 , Y_0 , Z_0 are the geometric coordinates of the target, X_1 , Y_1 , Z_1 are the coordinates of

the station, d is the distance between the station and the target, φ is the horizontal angle, and dn is the gap between the station and the target.

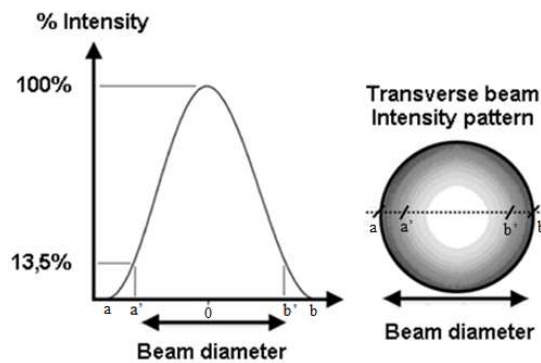
$$X0 = X1 + d \sin \varphi \quad (20)$$

$$Y0 = Y1 + d \cos \varphi \quad (21)$$

$$Z0 = Z1 + dn \quad (22)$$

The equipment currently available are capable to collect thousands (time of flight) up to millions (phase difference) of points per second and some of them are capable to record the intensity of the pulse that returns from the target for each geometric position (X , Y , Z). However, the energy of the laser beam is not uniformly distributed within its diameter. The energy follows a Gaussian distribution, according to Béland et al. (2011) and Popescu (2011). Figure 21 shows that the intensity of the beam decreases radially from the center to the border of the beam, with the intensity decreasing to $1/e^2$ or 13.5% of its peak value or maximum axial, and where e is the energy of the laser pulse (Popescu, 2011).

Figure 21 - Gaussian distribution of the energy across the laser beam intensity seen in a diagram and across the diameter of the beam (Popescu, 2011).



Source: adapted Popescu (2011)

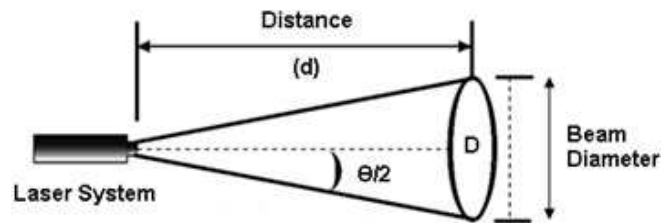
According to Béland et al. (2011) the radius of the laser beam emitted by the equipment ILRIS 3D increases with distance according to the Equation (23).

$$R = \frac{0,17d+12}{12} \quad (23)$$

R is the radius of the laser beam and d is the distance to the target and 12 in meters. Normally, the beam divergence is considered to be the angle between the beam sides (Baltsavias, 1999). No matter how the divergence is measured, the calculation of the diameter

of the laser beam is a trigonometric problem which can be determined by Equation 24, based on Figure 22 (Popescu, 2011).

Figure 22 - Representation of the laser diameter in relation with the distance



Source: adapted Popescu (2011)

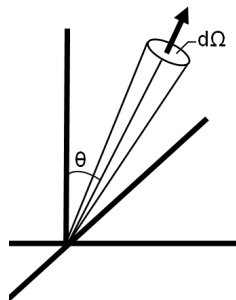
$$D = 2 d \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \quad (24)$$

For the equation, D is the beam diameter, d is the distance between the sensor and the target, and θ is the divergence angle of the laser beam.

5.1.2 LIDAR Intensity

The definition of intensity, based on Colwell's concept (1983), is variation of the flux of energy for unit by solid angle irradiated in the same direction from the point source. In other words, intensity is the quantity of energy that passes through a unit area per second, per steradian. It is characterized by the symbol I and is given in watts per steradian (W/sr), as shown in Figure (23) and Equation (25).

Figure 23 - Point source radiating energy in a solid angle (Colwell, 1983).



Source: adapted Colwell (1983).

$$I = \frac{E}{A \cos \theta d\Omega} \quad (25)$$

I is the intensity, E is the quantity of energy that passes through a unit area per second, A is the area, and $d\Omega$ is the solid angle.

The radiation is emitted at a solid angle $d\Omega$ normal to the area A . The projection of this area with the emitted radiation is given as $A \cos \theta$. The intensity can be defined as an analogy to the RADAR equation. In terms of LIDAR, the energy that returns is described by Equation 26 (Baltsavias, 1999; Wehr and Lohr, 1999; Höfle and Pfeifer, 2007; Wagner et al, 2008).

$$P_r = P_t \frac{A}{\pi R^2} \rho n_0 n_a^2 \quad (26)$$

P_r is the energy that returns to the sensor after its emission, reflection from the target and dispersion in the atmosphere. P_t is the energy of the laser output pulse, ρ is the reflectance of the target; A is the effective area of the laser on the surface of the target, and R is the distance between the sensor and the target. n_0 is the transmission efficiency of the optical sensor, the laser pulse and the properties of the receiver and n_a^2 is the efficiency of transmission of the atmosphere between the sensor and the target.

In fact, laser scanner sensors measure the photon flux that enters the receiver from a given direction and the solid angle or measure the scattered radiation, which is related to the received signal power. Laser scanners record the discrete return of the pulse power, which is received as a single digital number that represents intensity.

5.1.3 Edge effect on LIDAR data

The edge effect occurs in two cases. In the first case, the edge effect is the outline of the object generated when laser pulses collide partially with the target being scanned (i.e., stop colliding with the target and start colliding with the background). Figure 24 shows a rectangle with circular holes, where the blue area is the internal portion of the object and the red area is the border of the object.

Figure 24 - Representation of an object with circular holes. The red color represents the areas where the edge effect will appear.



Source: The author

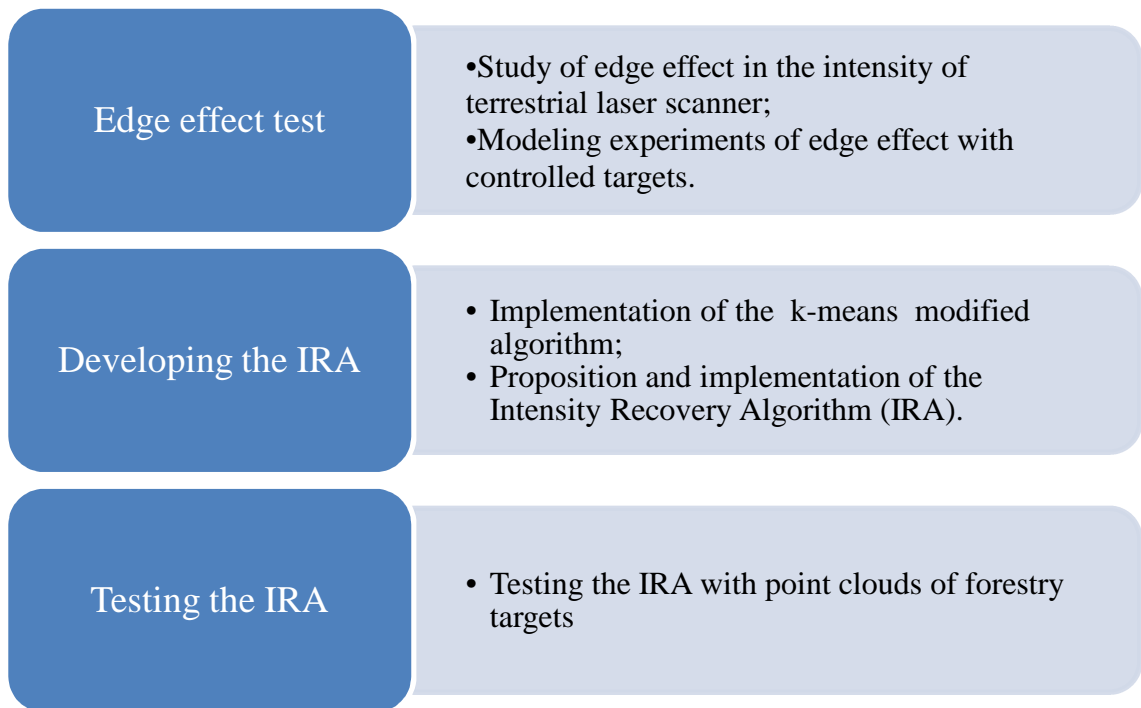
The edge effect will take place at the edge of the target and can be understood as the difference between the recorded intensity and the expected intensity after colliding with the target. This effect occurs due to the variable diameter of the laser beam, which is proportional to the distance between the laser scanner and the target, and is referred to as laser divergence or beam divergence (POPESCU, 2011).

5.2 MATERIAL AND METHODS

The TLS used in this study was an Ilris 3D Optech, class 1 with a diode laser that operated at an emission wavelength of 1535 nm (medium infrared). The active sensor operated based on the principle of time of flight. The maximum range of this TLS is 400 m for objects with a reflectance of 10% and 1200 m for objects with a reflectance of 80%. The linear accuracy is 7 mm, and the angular precision is 8 mm, both at a distance of 100 m from the equipment. The divergence of the laser is 0.00974° and causes, at a distance of 100 m from the equipment, a diameter of 5.58 cm (2.2 in). The TLS includes a digital camera of 3.1 megapixels that is located off-axis, causing parallax distortion in objects located less than 35 to 40 m from the equipment.

For a better understanding, Figure 25 illustrates the methodological steps adopted in this study.

Figure 25 - Methodological steps undertaken in this study



Source: The author

5.2.1 Modeling the edge effect

In order to acquire intensity data with an edge effect under controlled conditions, we used one target, a total station tripod, a planar white screen and a laser scanner. This target was designed to the camera calibration. The number of holes was chosen arbitrarily. The main goal was to acquire intensity data showing a large range of the edge effect. To that end, we placed a white screen behind a wooden board with 8 holes (Figure 26) in order to collect the laser return after collision with the wooden board and the white screen. The target was scanned at two distances from the TLS, 5 m and 10 m. Framework 3 shows the spacing between points, the number of points collected and the time necessary for the data acquisition. After acquisition, the intensity data of the point cloud were processed using 8-bits (256 gray levels), and the edge effect was modeled.

Framework 3 - Scans with controlled settings.

	Resolution (mm)	Number of points
Distance 5 m	0.5	480,244
	1.0	120,150
	1.5	53,550
	2.0	30,082
	3.0	13,500
	4.0	7,605
	5.0	4,860
	7.0	2,522
	10.0	1,224
Distance 10 m	0.6	387,138
	1.0	139,944
	1.6	54,912
	2.0	34,986
	3.0	15,572
	4.0	8,772
	5.0	5,658
	7.0	2,940
	10.0	1,449

Source: The author

Figure 26 - Experiment to generate the edge effect using a tripod, a target, a white screen and the laser scanner.



Source: The author

5.2.2 Method proposed: IRA

From the initial tests, we were able to generate the edge effect in a controlled manner. The results provided enough information in order to understand how this effect occurs and how it affects the intensity data. Using the data, we generated the intensity recovery algorithm (IRA).

The IRA was developed in two steps: segmentation and intensity recovery. Initially, a clustering k-means algorithm (MacQueen, 1967) was used to separate the intensity data values into different groups. The algorithm grouped the points distorted by edge effect into a specific class and could be used to recover intensity data.

The clustering based on the k-means algorithm performed classifications by partitioning the database in a k number of groups (Gan et al., 2007). Initially k centroids were defined as 3 groups based on the clustering algorithm. Each point of the cloud has an intensity value that is associated with the recorded intensity value returning from the target. For each point, the algorithm searched for the nearest centroid. In this case, the nearest centroid has an intensity value similar to the group of points. Thus, each point becomes part of the group of the nearest centroid. When all the points were grouped, the centroids were re-calculated to verify that each point belongs to the appropriate group.

The algorithm performs this operation repeatedly, *i.e.*, enters a loop until the values converge. Convergence takes place when point changes no longer occur between the groups, but convergence can also be determined other ways. Another way is to determine the maximum number of exchanges between groups or the maximum number of iterations. In this case the maximum number of iterations must be defined in order to limit the process, *i.e.*, the user enters the number of iterations and the result is dependent of this choice. After segmentation of the database into different groups, recovery of intensity data can be performed.

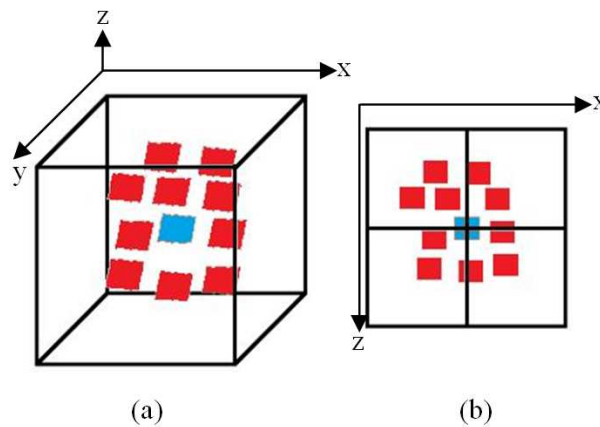
For recovering intensity data, we proposed Equation 27, which was implemented using the IRA.

$$I_c = \frac{I_m}{k} \quad (27)$$

For the equation, I_c is the corrected intensity value, I_m is the measured intensity value (value measured by the laser, ranging from 0 to 255 ND), and k is the estimated collision value of the laser pulse with the target, where $\{k \in \mathbb{R}; 0 < k \leq 1\}$.

Once the k value is defined, it is possible to restore the intensity value. Considering that Q is the set of all points of the database, P is then defined as the set of clustered points which belong to the edge effect group, p is a point from the set P , and q is a point from the set Q . For each point p that belongs to P , an Axis-Aligned Bounding Box (AABB) is created that is centered in p . The size of the AABB was defined with based the spacing between points of the laser configuration. All points q , from the set Q , are tested to verify if q is inside AABB. The AABB size is defined through the spacing between points, which generates the spacing variable. The scanning configuration is necessary in order to have a minimum number of points to calculate the collision approximation. If the q point is inside the AABB, then q is inserted in a quadtree of n levels created in the same AABB's position and with the same AABB's size. Figure 27 shows the AABB with the point p in the center in blue.

Figure 27 - Example of the AABB with quadtree level 1. (a) Shows the AABB with points inside. (b) It is the quadtree centered in the same place of the AABB with the AABB points inserted.



Source: The author

Using the number of points in each quadrant of the quadtree, the number of collision between the laser beam and the target is estimated. Each quadrant has a collision percentage which depends on the quadtree level (Equation 28). If the quadtree level n is 1, then the quadtree has 4 quadrants. In this case, each quadrant corresponds to 25% of a collision.

$$perc = \frac{1}{4^n} \quad (28)$$

For the equation, *perc* is the total collision percentage for each quadtree quadrant, and *n* is the quadtree level.

The collision percentage *est* is the more important element of the algorithm. Is in this part that is performed the calculation of collision estimated of the laser.

The value *est* is calculated by considering a weight of 25% for each one of the four quadrants of the AABB. The algorithm identifies which quadrant has the greatest number of points, and then it records the weight using 25% for the average intensity of the points in this quadrant. This is considered the reference quadrant. The calculation of the weight of the other quadrants is performed by taking into consideration the number of points existing in each quadrant relative to the reference quadrant.

5.2.3 Testing IRA

The algorithm was first tested with a forestry target, a guava tree (*Psidium guajava*). The choice was based on the availability of an appropriate target near the laboratory and on the tree's medium size (7 to 12 m) and regularly shaped leaves. The chosen tree was free from obstacles, so the probability of intensity data returning from other targets was eliminated. Thus, the edge effect would not result from another target, only from the tree. This tree was sampled approximately 40 meters from the laser scanner in order to avoid parallax distortion. After scanning, the point cloud file with 8-bits radiometric resolution that contained X, Y, Z and I was processed with IRA. The point cloud was initially classified into three groups (branches, leaves and the edge effect) using the k-mean-based algorithm. The intensity recovery algorithm was used next in order to generate two point clouds, the first segmented into three groups and the second segmented into three groups already processed with IRA.

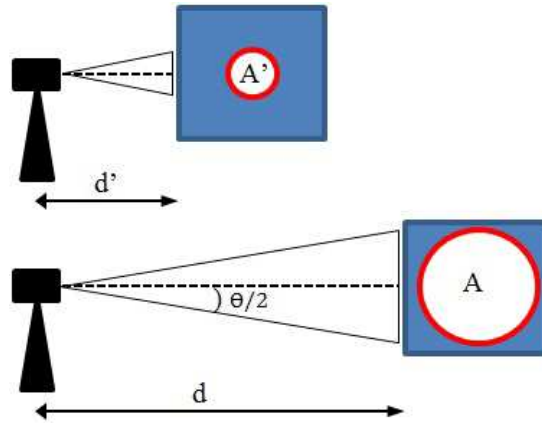
5.3 RESULTS AND DISCUSSION

5.3.1 Results of the edge effect test

The greater the distance between the laser and the target, the larger is the diameter of the laser beam. This occurs because the divergence of the beam is directly proportional to the distance. Generally, the points affected by the edge effect have a lower intensity value, as previously addressed by Kaasalainen et al. (2009, 2011), Seielstad et al. (2011) and Bordin et

al. (2013b). The distance also reduces the intensity values. The edge effect and the distortions in the intensity data, in this case, occurred due to the divergence of the laser beam and the influence of distance (Bordin et al., 2013b), although Eitel et al., (2010) did not identify distortions in intensity caused by distance ranging from 1.1 to 2.6 m from the target. This occurs because the beam spreads more as the distance increases between the target and the laser scanner. The greater the distance of the target is from the scanner, the greater is the distribution of the radiation over the area, or the same amount of radiation interacts with a greater area of the target (Figure 28). This relationship is shown by Equation 29, where shorter distances might cause non-significant distortions.

Figure 28 - Variation of the area (A and A') of interaction of radiation from the laser beam with the distance (d and d') between the sensor and the target.



Source: The author

$$A = \pi \left(\frac{2 d \operatorname{tg} \frac{\theta}{2}}{2} \right)^2 \quad (29)$$

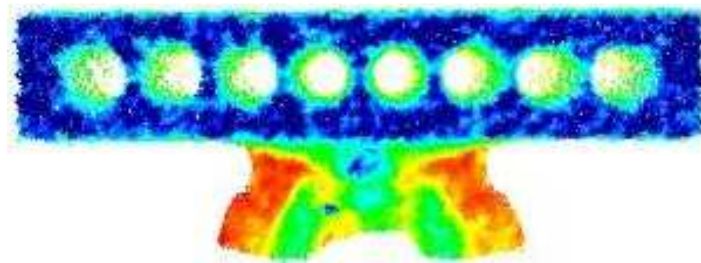
A is the area illuminated by the laser beam as a function of the distance, d is the distance between the sensor and the target, and θ is the divergence angle of the laser beam.

In this test, we have identified two types of the distortions in the point cloud data caused by the edge effect. The first type is that the edge effect affects the data by causing distortions in the intensity values. The second type is that the edge effect shifts points in the space along the y-axis.

The modification of intensity values occurs when the sensor records the return of the intensity as a mixture of data from the obstacle behind the target (white screen) together with data from the target (wood board with holes) as a unique value. The aperture of the sensor

receives the radiation that returns of two targets during the range of time (Δt). An average of both values is recorded in the file. This is registered as an intensity mixture of radiation from the two targets. In Figure 29, the green points inside the circles and in the outer portion of the wood board had distortions in their intensity values caused by the edge effect. Overall, the points affected by the edge effect had lower values than the others, as indicated by Eitel et al. (2010).

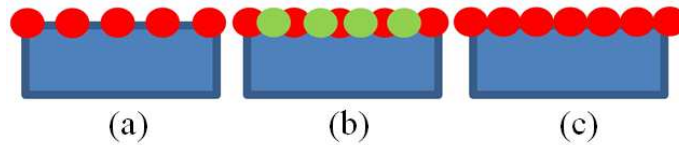
Figure 29 - Edge effect generated in the initial test. The green points inside the circles and around the blue rectangle represent the edge effect seen in the 3D point cloud. Figure in false color.



Source: The author

Moreover, we observe that the configuration of the spatial resolution during a scan also contributes to the distortion of intensity values. There are three possible situations that can be observed. If we consider the first situation shown as Figure 30 a, the edge of the rectangle is scanned, and we note that the distance between the centers of the beam is greater than the diameter of the beam, resulting in unrecorded data. In the second situation shown as Figure 30 b, the distance between the centers of the beam is smaller than the diameter of the beam, so the borders of the beams overlap and result in noise in the intensity data of the point cloud. In the third situation shown as Figure 30 c, the distance between the centers of the beam is equal to the diameter of the beam and leads to the best case scenario because all the area is sampled and no noise is generated in the point cloud.

Figure 30 - Different resolutions of the data acquired with the laser scanner. a) The distance between the centers of the beam is greater than the diameter of the beam. b) The distance between the centers of beam is smaller than the diameter of the beam. c) The distance between the centers of the beam is equal to the diameter of the beam.

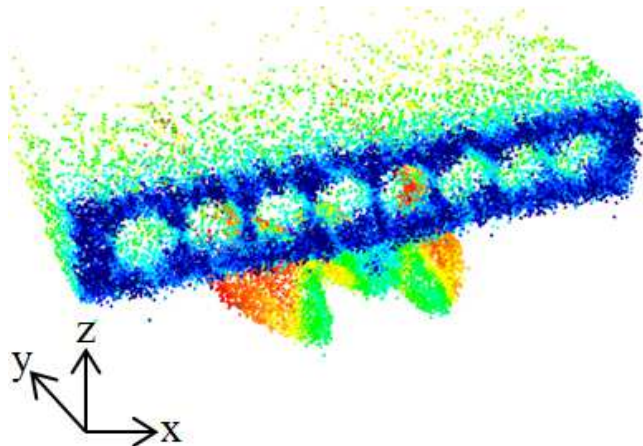


Source: The author

In the second type of distortion, we note that points of the cloud shift in the space, as shown in Figure 31. This distortion occurs on the y-axis because the sensor calculates the distance of the point based on the average return time of the pulse that returns from both the target and the white screen.

The study of the edge effect is a very complex subject that requires a range of complementary experiments to address the topic; therefore, the distortion of points in the space will not be addressed. This study is focused on understanding distortion of intensity data values.

Figure 31 - Edge effect generated in the initial test. The green points in the cloud are shifted in space on the y-axis. Figure in false color.



Source: The author

5.3.2 Results of the IRA

In our study, we analyzed the edge effect on a whole tree. The tree point clouds used in the test had initially 1,082,996 points. After processing and classifying initial intensity values, using a modified k-mean algorithm for three groups (branches, leaves and edge effect), the points were classified according to the image shown in Figure 32 a. As result of the classification, 151,542 points were characterized as branches (red color, 13.99% of all points), 390,200 points were characterized as an edge effect (blue color, 36.03% of all points) and 541,254 points were characterized as leaves (green color, 49.98%). The goal of this classification was to segment the points of the edge effect prior to processing the data in order to recover lost intensity values. Figure 32 b verifies that the algorithm satisfactorily identified the edge effect (blue color). After the classification, the points that were characterized as an edge effect were processed by the IRA in order to recover branch or leaf points, whose intensities were affected by the edge effect.

After IRA processing, the points were further characterized as those shown in Figure 32 b, with 221,901 points classified as branches (red color, 20.49% of all points), 250,844 points classified as an edge effect (blue color, 23.16% of all points) and 610,251 points classified as leaves (green color, 56.35%).

Data processing of the edge effect points by the IRA resulted in the recovery of 139,356 points or approximately 35.71% of lost intensity values. These 139,356 points were classified as 68,997 points for leaves and 70,359 points for branches. The results suggest that if we use intensity data values to correlate an environmental variable (e.g., chlorophyll, carbon, or water content), we would obtain results containing errors that could be minimized using IRA as shown in Table 1.

Figure 32 a and 32 b visually show the result of minimizing the edge effect presented in Table 1. In Figure 32 a, the quantity of blue points is visibly greater than those shown in Figure 32 b. The Table 1 summarizes results obtained after IRA processing. The edge effect is represented as blue, the leaves as green, and the branches as red in the Figure 32 b.

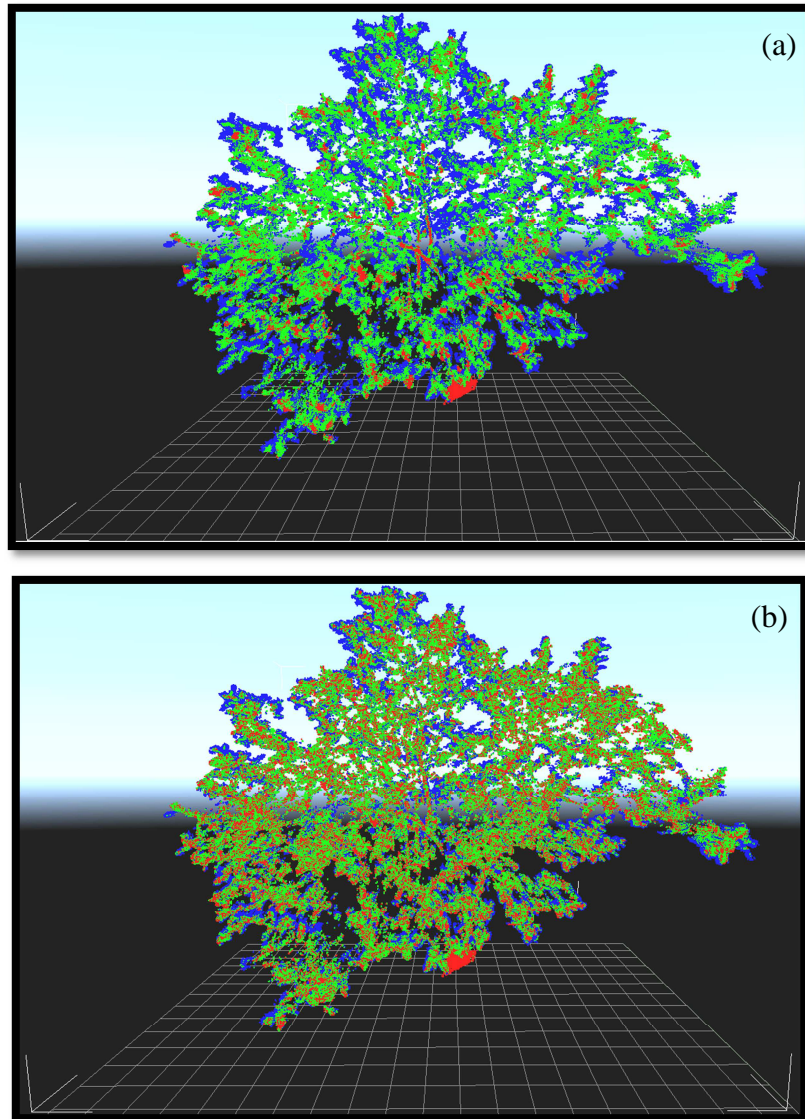
Table 1 - The table summarizes results obtained after IRA processing. The edge effect is represented as blue, the leaves as green, and the branches as red in the Figure 32.

Classes	Point cloud segmented (Number of points) Figure 32 a	%	Point cloud processed by IRA (Number of points) Figure 32 b	%	Point cloud difference before/after processing by IRA	% Difference
Edge effect	390,200	36.03	250,844	23.16	139,356	35.71
Leaves	541,254	49.98	610,251	56.35	68,997	112.75
Branches	151,542	13.99	221,901	20.49	70,359	146.43
Total	1,082,996	100	1,082,996	100		

Source: The author

Analyzing the results, we determined that branches were more affected by the edge effect than leaves. This was expected because the diameter of the majority of branches is smaller than the diameter of the leaves. In other words, the smaller the target, the more the target will be affected by the edge effect. If the leaves were smaller than the branch diameters, leaves would have been more affected. The IRA was shown to be more effective for recovery of leaves points, restoring 35.71% of points distorted by the edge effect in this study.

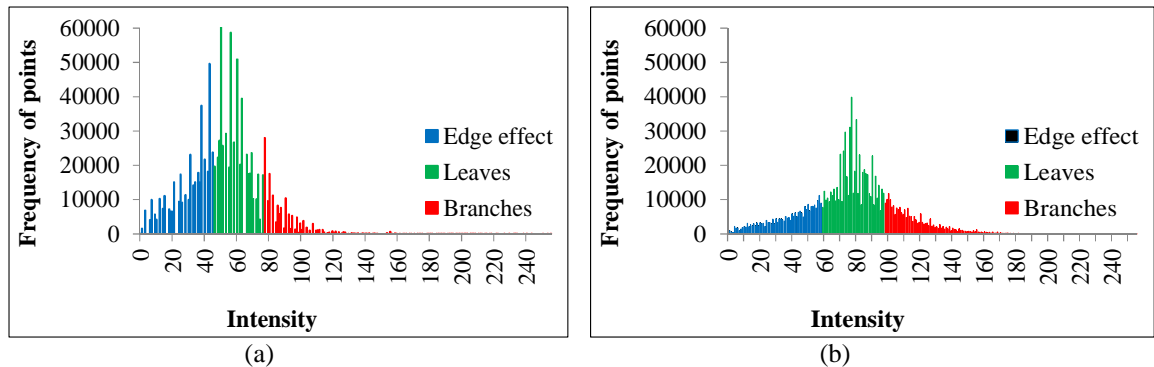
Figure 32 - Point clouds of the tree as a 3D image before (a) and after (b) recovering intensity lost due to the edge effect. The tree before processing (a) shows a large number of blue edge effect points, whereas the tree after processing (b) shows a reduced number of blue edge effect points. Figure in false color.



Source: The author

For a better understanding of how the algorithm processed the data, histograms are presented to show the variation of the intensity values before and after processing (Figure 33). The recovery 35.71% intensity data is directly correlated to the recovery of the radiation that has been lost; therefore, points originally classified as edge effect may continue to belong to this group even after the processing. This result explains recovery of the intensity data 35.71% of points. In fact, part of the database classified as edge effect continues to be part of the group edge effect after processing.

Figure 33 - Distribution of intensities of the point cloud before column (a) and after column (b) segmentation and processing by IRA.



Source: The author

The histograms in Figure 33 show the variation of the intensity of the point cloud of the entire tree in 8 bits before (Figure 33 a) and after processing (Figure 33 b). The histograms show a normal distribution with the greatest number of points having intensities between 0 and 100 before IRA processing. The average intensity was approximately 52.99 with a standard deviation of 22.55 in digital number (ND). After processing, the normal distribution of the histogram showed a greater range of intensities between 0 and 140 (Figure 33 b).

Algorithm processing provides interesting information that can be seen in Figure 33. The points that were identified as branches were also the points with the greater intensity values, i.e., the branches reflected a greater amount of radiation for mid-infrared wavelengths than the leaves. Thus, the average intensity values of the leaves ranged from 58.68 to 78.34 ND after IRA processing and showed a standard deviation of 8.19 to 9.90, respectively (Table 2).

Table 2 - Average and standard deviation of intensity values before and after the IRA.

	Tree intensity (ND)		Branches intensity (ND)		Edge effect intensity (ND)		Leaves intensity (ND)	
	Average	Standard deviation	Average	Standard deviation	Average	Standard deviation	Average	Standard deviation
Before	52.99	22.55	90.00	16.80	30.72	11.67	58.68	8.19
After	77.07	29.23	117.21	18.47	38.47	15.12	78.34	9.90

Source: The author

5.4 FINAL REMARKS

The results presented in this study demonstrate that TLS intensity can be used to distinguish tree elements, such as branches, leaves and edge effects, and could be used to develop a useful application to estimate and/or quantify carbon and biomass composition. Based upon the intensity data, the point cloud elements showed different characteristics that were identified by k-means clustering. Experiments performed in a controlled mode are fundamental to understanding how the edge effect in the point cloud occurs. From our results, we have identified two types of distortions that occur in point cloud data. The first type affects the data by causing distortions in intensity values. The second type creates an edge effect that shifts the points in the space on the y-axis. In addition, we developed an IRA for minimizing the edge effect. By processing the data with the IRA, we recovered 35.71% of the intensity values that were affected by the edge effect. This result shows that the use of the IRA on intensity data values decreases distortions caused by edge effect. This algorithm will aid in the development of methodologies to study the correlation between TLS intensity and physical and chemical characteristics for forestry and other targets and applications. The ability to identify a correlation between TLS intensity and properties such as water, carbon and sulfur content in trees could lead to the creation of more efficient and cheaper methodologies to quantify physical and chemical characteristic, using remote and non-destructive data collecting techniques.

The algorithm developed for minimizing the edge effect is our first attempt to address the problem regarding edge effect in LIDAR data; therefore, more research must be conducted to test and improve processing LIDAR data. The utilization of a structure composed of an octree rather than a quadtree might be an alternative method to improve results. In terms of clustering, algorithms that use classification other methods should also be tested.

REFERENCES

- Baltsavias, E. P. (1999). Airborne laser scanning: basic relations and formulas, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54, 199-214, doi: 10.1016/S0924-2716(99)00015-5.
- Béland, M., Widlowski, J., Fournier, R. A. Jean-François Côté, Verstraete, Michel M. (2011). Estimating leaf area distribution in savanna trees from terrestrial LiDAR measurements, *Agricultural and Forest Meteorology*, 151, 1252-1266, doi: 10.1016/j.agrformet.2011.05.004.

Bordin, F.; Teixeira, E. C.; Rolim, S. B. A.; Tognoli, F. M. W.; Veronez, M. R.; Silveira Junior, L. G.; Souza, C. F. N. (2013a). Methodology for acquisition of intensity data in forest targets using terrestrial laser scanner, *IERI Procedia* 5, 238-244, doi:10.1016/j.ieri.2013.11.098.

Bordin, F.; Teixeira, E. C.; Rolim, S. B. A.; Tognoli, F. M. W.; Souza, C. N.; Veronez, M. R. (2013b). Analysis of the influence of distance on data acquisition intensity forestry targets by a LIDAR technique with terrestrial laser scanner, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XL-2/W1, 99-103, doi:10.5194/isprsarchives-XL-2-W1-99-2013, 2013.

Burton, D.; Dunlap, D. B.; Wood, L. J.; Flaig, P. P. (2011). Lidar intensity as a remote sensor of rock properties, *Journal of Sedimentary Research* 81, 339-347, doi:10.2110/jsr.2011.31.

Colwell, R. N. *Manual of Remote Sensing*. (1983). American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, Falls Church. Virginia, 2.

Dassot M., Colin A., Santenoise P., Fournier M., Constant T. (2012). Terrestrial laser scanning for measuring the solid wood volume, including branches, of adult standing trees in the forest environment. *Computers and Electronics in Agriculture* 89: 86–93

Eitel, J. U. H. ; Vierling, L. A.; Long, D. S. (2010). Simultaneous measurements of plant structure and chlorophyll content in broadleaf saplings with a terrestrial laser scanner, *Remote Sensing of Environment* 114 (10) 2229-2237, doi:10.1016/j.rse.2010.04.025.

Gan, G.; Ma, C.; Wu, J. (2007). *Data clustering: theory, algorithms and applications*. Philadelphia, PA: ASA-SIAM.

Hofle, B.; Pfeifer, N. (2007). Correction of laser scanning intensity data: Data and model-driven approaches, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* (62), 415-433, doi: 10.1016/j.isprsjprs.2007.05.008.

Hyypä, J., & Inkinen, M. (1999). Detecting and estimating attributes for single trees using laser scanner. *The photogrammetric journal of Finland*, 16(2), 27-42.

Hyypä, J., Inkinen, M. (1999). Detecting and estimating attributes for single trees using laser scanner. *Photogrammetric Journal of Finland* 16, 27-42.

Hyypä, J., Schardt, M., Haggrén, H., Koch, B., Lohr, U., Paananen, R., ... & Karjalainen, M. (2001). HIGH-SCAN: The first European-wide attempt to derive single-tree information from laserscanner data.

Hyypä, J.; Kelle, O.; Lehikoinen, M.; Inkinen, M. (2001). A segmentation-based method to retrieve stem volume estimates from 3-D tree height models produced by laser scanners. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 39, 969-975.

Inocencio, L. C.; Veronez, M. R.; Tognoli, F. M. W.; Souza, M. K.; Silva, R. M.; Junior, L. G. S.; Silveira, C. L. B. (2014). Spectral pattern classification in LIDAR data for rock identification in outcrops, *The Scientific World Journal*, v. 2014, p. 1-10.

Kaasalainen, S.; Jaakkola, A.; Kaasalainen, M.; Krooks, A.; Kukko, A. Analysis of incidence angle and distance effects on terrestrial laser scanner intensity: Search for correction methods, *Remote Sensing* 3 (2011) 2207-2221, doi:10.3390/rs3102207.

Kaasalainen, S.; Krooks, A.; Kaartinen, H. (2009). Radiometric calibration of terrestrial laser scanners with external reference targets. *Remote Sensing*, v. 1, p. 144-158.

Keightley, K. E.; Bawden, G. W. 3D volumetric modeling of grapevine biomass using tripod LiDAR. *Comput. Electron. Agr.* 2010, 74, 305–312.

Leader, J.C. (1979). Analysis and prediction of laser scattering from rough-surface materials, *Journal of the Optical Society of America*, 69, 610-628.

MacQueen, J. B. (1967). Some methods for classification and analysis of multivariate observations, in *Proceedings of 5th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, vol. 1, pp. 281–297, University of California Press, Berkeley, Calif, USA.

Popescu, S. C. (2011). Lidar Remote Sensing, in: *Advances in Environmental Remote Sensing: Sensors, Algorithms, and Applications*, 57-84.

Rosell, J. R., & Sanz, R. (2012). A review of methods and applications of the geometric characterization of tree crops in agricultural activities. *Computers and Electronics in Agriculture*, 81, 124e141.

Seielstad, C.; Stonesifer, C.; Rowell, E.; Queen, L. (2011). Deriving fuel mass by size class in douglas-fir (*pseudotsugamenziesii*) using terrestrial laser scanning, *Remote Sensing*, 3, 1691-1709, doi: 10.3390/rs3081691.

Wagner, W., Hyyppä, J., Ullrich, A., Lehner, H., Briese, C., Kaasalainen, S. (2008). Radiometric calibration of full-waveform small-footprint airborne laser scanners *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37, 163–168.

Wehr, A., Lohr, U. (1999). Airborne laser scanning an introduction and overview, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 54, 68-82, doi: 10.1016/50924-2716(99)00011-8.

CAPÍTULO 6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em termos de considerações gerais ao longo do desenvolvimento da Tese destacam-se que a tecnologia LIDAR empregada em um sistema LST está em constante evolução e pode ser considerada, de acordo com a literatura, uma das ferramentas mais promissoras em relação às técnicas de aquisição de dados 3D. As informações obtidas por meio desse sistema possuem grande potencial de utilização e aplicação em diversas áreas. Os resultados apresentados neste estudo demonstram que a intensidade de retorno do pulso laser advinda do LST pode ser usada para distinguir elementos de alvos florestais (troncos, galhos e folhas), pois os dados da nuvem de pontos estudados nesta pesquisa mostraram características diferentes ao serem classificados pelo algoritmo k-média. Por possibilitar a visualização e o escaneamento dos alvos sem o contato direto, com alcance de distâncias na casa de metros e até de quilômetros, o LST seria uma opção para a aquisição de informações para alvos que estivessem inacessíveis. A característica do LST de gerar cenas em 3D, com dados de intensidade e de cor, possibilita o armazenamento das informações para o acompanhamento da evolução desses alvos. Porém, a coleta de dados, a programação e processamento computacional e o efeito de borda, podem ser considerados pontos críticos no planejamento e execução de projetos que utilizam dados de laser para a caracterização de alvos florestais. Assim, esta pesquisa demonstrou que os experimentos controlados foram fundamentais para a compreensão e o desenvolvimento de metodologias de modo a minimizar possíveis fontes de erros inerentes ao sistema.

Pontualmente, os principais resultados obtidos indicaram que:

- a) Para o LST Ilris 3D da Optech a distância mínima para imageamento de alvos florestais foi de 5m e o processamento da intensidade de retorno do laser com resolução radiométrica de 8 bits proporcionou uma caracterização geométrica do alvo com efeito visual de melhor qualidade se comparado com o processamento de 16 bits;
- b) A distância entre o LST e o alvo florestal influenciou na aquisição dos dados de intensidade de retorno do laser e que para cada equipamento é necessário elaborar um modelo matemático de calibração compatível com o seu respectivo comprimento de onda;

- c) Os resultados dos experimentos realizados sobre o efeito de borda possibilitaram identificar dois tipos de distorções que ocorreram nos dados da nuvem de pontos adquiridos com o LST. O primeiro afetou os valores de intensidade de retorno do laser e o segundo criou um efeito que deslocou os pontos no espaço. Para minimizar este efeito foi desenvolvido um algoritmo que possibilitou recuperar automaticamente os valores de intensidade de retorno do laser (IRA) minimizando em até 35,7% o efeito de borda no imageamento dos alvos florestais estudados.

Assim, conforme as considerações gerais e pontuais ao longo do desenvolvimento desta Tese foi possível concluir que, para o uso do LST na caracterização de alvos florestais, é necessário desenvolver outros métodos para minimizar o efeito de borda aprimorando o algoritmo IRA com outras abordagens computacionais e matemáticas que poderão ser desenvolvidos em estudos futuros.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se para trabalhos futuros:

- a) comparar os resultados obtidos nessa pesquisa com outros modelos de LST;
- b) estudar outras metodologias e algoritmos para a classificação e segmentação entre as diferentes partes da árvore e o efeito de borda;
- c) comparar equipamentos com diferentes comprimentos de onda e princípios de funcionamento;
- d) propor metodologias para o estudo da floresta, ou seja, quando a quantidade de árvores for maior;
- e) melhorar o processamento de dados testando estruturas compostas por octree ao invés de quadtree. A estrutura octree pode ser um método alternativo para melhorar os resultados do algoritmo;