

**Manual**

**ProcessaLAS**

**versão 1.0**

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>11</b>
<b>2. OBJETIVO.....</b>	<b>11</b>
<b>3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>12</b>
3.1 LAS.....	14
3.2 LAZ.....	15
3.3 LAX.....	15
3.4 ID.....	15
3.5 RETORNO.....	16
3.6 BOUNDING BOX.....	16
3.7 OFFSET VALUE.....	17
3.8 SCALE FACTOR.....	17
<b>4. MANUAL.....</b>	<b>17</b>
4.1 VISÃO GERAL.....	17
4.2 ABAS.....	18
4.3 INÍCIO.....	19
4.4 ANÁLISE.....	23
4.5 CLASSIFICAÇÃO DE RUÍDOS.....	30
4.5.1 Statistical Outlier Removal (SOR).....	34
4.5.2 Isolated Voxel Filter (IVF).....	35
4.6 CLASSIFICAÇÃO DO CHÃO.....	36
4.6.1 Cloth Simulation Filter (CSF).....	38
4.6.2 Progressive Morphological Filter (PMF).....	41
4.6.3 Multiscale Curvature Classification (MCC).....	43
4.7 MDT.....	44
4.7.1 K-Nearest Neighbour - Inverse Distance Weighting (KNN-IDW).....	46
4.7.2 Triangulated Irregular Network (TIN).....	47
4.7.3 Krigagem Universal (Kriging).....	48
4.8 MDS, NORMALIZAÇÃO E CHM.....	49
4.8.1 Point to Raster (P2R).....	52
4.8.2 Triangulated Irregular Network (TIN).....	53
4.8.3 Pit-free.....	54
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>55</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A obtenção de informações qualitativas e quantitativas de povoamentos florestais é um desafio de recursos humanos e logística, sendo, muitas vezes, um processo custoso e que tende a causar danos ao ecossistema. O sensoriamento remoto têm ganhado cada vez mais importância como resposta a este desafio (Nishiwaki, 2023), visto que há uma tendência de diminuição dos preços dos equipamentos, tornando-o mais competitivo.

Uma tecnologia que têm ganhado destaque é o LiDAR (*Light Detection And Ranging*), que, basicamente, é um emissor e receptor de pulsos laser, que varre determinada área e geram arquivos de estrutura tridimensional, conhecidos como nuvem de pontos. É reconhecida por disponibilizar dados acurados de forma rápida e de área extensa, conseguindo penetrar a copa das árvores e trazer informações importantes acerca da estrutura vertical e horizontal da floresta, métricas como altura, diâmetro e quantidade de árvores, além de dados sobre o relevo (Silva, 2017).

Tais equipamentos emitem de dezenas a centenas de milhares de pulsos laser por segundo, fazendo com que qualquer varredura, por menor que seja, gere arquivos massivos e que demandam alta capacidade técnica e computacional para processamento e geração de produtos digitais. Soma-se a isso a questão de que pouco ou quase nenhuma informação sobre processamento de dados LiDAR está compilada e disponível na internet, de graça e em português. Grande parte da capacidade técnica de processamento está em softwares privados, que tendem a ser um serviço custoso, ou em scripts complexos de programação, necessitando conhecimento aprofundado sobre a linguagem.

Dessa forma, urge a necessidade de um esforço no sentido de facilitar o entendimento acerca do processamento de nuvens de pontos e a configuração dos parâmetros dos algoritmos disponíveis e consolidados. Assim, a criação de interfaces que unifiquem esses processos surge como um caminho para otimização de aprendizados e fluxos de trabalho.

## 2. OBJETIVO

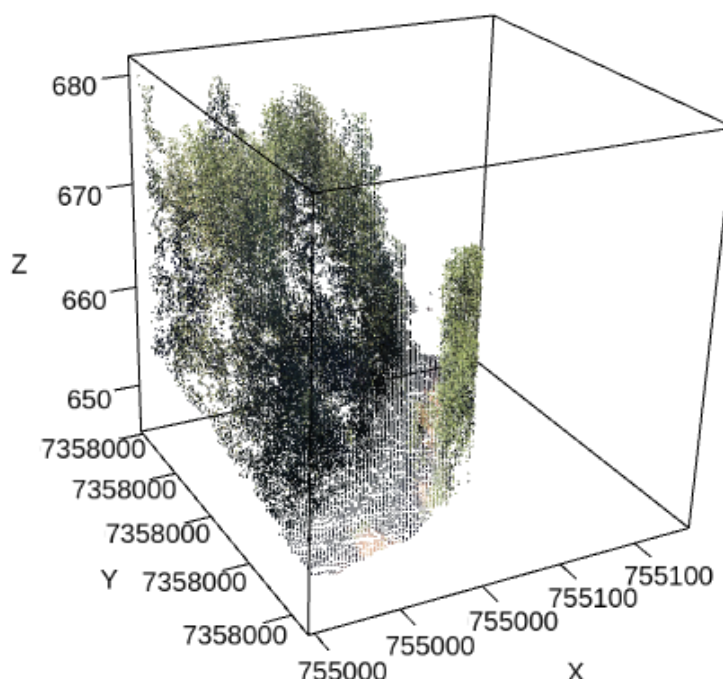
Facilitar o entendimento sobre a estrutura de arquivos de nuvens de pontos, sua análise, processamento inicial e geração de produtos digitais básicos, a partir de um aplicativo, de nome ProcessaLAS, que compila os principais algoritmos, seus parâmetros e uma janela para renderização das nuvens de pontos. Assim, dinamicamente, cada alteração

feita nos parâmetros terá um retorno em ambiente 3D interativo, fortalecendo o processo de aprendizagem.

### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nuvem de pontos é um conjunto de coordenadas tridimensionais (x, y, z). Cada ponto-coordenada é acompanhado de uma série de outros atributos adicionais, que variam conforme a tecnologia utilizada.

**Figura 1.** Nuvem de pontos com RGB (atributo adicional) obtida em um talhão de Pinus, junto ao aceiro.



Fonte: Autor.

Com o objetivo de padronizar o compartilhamento de nuvens de pontos entre diferentes sistemas operacionais e softwares, a *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing* (ASPRS) aprovou, em 2011, o formato LAS como base para essa interoperabilidade. A versão utilizada neste trabalho é a LAS 1.4 R15, a última aprovada. As especificações deste formato estão disponíveis no site oficial da associação.

De modo geral, os arquivos do formato LAS contém uma planilha, onde cada ponto é representado por uma linha e cada coluna representa um atributo, além dos metadados.

A principal tecnologia por trás da obtenção de nuvens de pontos é denominada *Light Detection And Ranging* (LiDAR), que consiste em um emissor e um receptor de pulsos laser na faixa espectral entre a luz visível e o infravermelho médio.

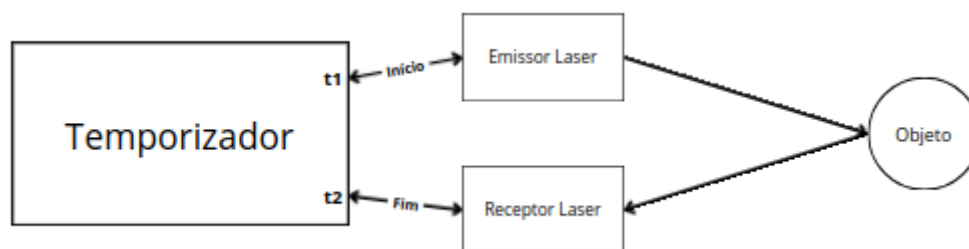
É considerado um equipamento de rápida obtenção de dados em alta resolução e muito importante na obtenção direta ou estimada de atributos florestais. No Brasil o principal uso está nas florestas plantadas, mas existem pesquisas na Amazônia, Caatinga e manguezais (Nishiwaki, 2023). Devido a sua capacidade de penetrar a copa das árvores é muito útil também na construção de modelos digitais de terreno, que servirão, por exemplo, aos estudos sobre padrões de drenagem, gestão de bacias hidrográficas e confecção de mapas topográficos.

Esse tipo de equipamento pode estar acoplado a uma série de plataformas de varredura:

- *Spaceborn LiDAR*
  - Satélites ou Estação Espacial Internacional
- *Airborne Laser Scanning* - ALS
  - Aeronaves e VANTs
- *Mobile Laser Scanning* - MLS
  - Veículos terrestres e embarcações
- *Backpack LiDAR*
  - Mochilas
- *Terrestrial Laser Scanning* - TLS
  - Sobre tripé, fixo.
- *Handheld Mobile Laser Scanning* - HMLS
  - Portátil, de mão

O equipamento LiDAR registra o tempo entre a emissão e a recepção do pulso laser, onde este, nesse meio tempo, se desloca até o alvo e é refletido, de acordo com suas propriedades de refletância. A distância entre o equipamento e o alvo é definida como a metade (ida e volta) do produto entre o tempo decorrido e a velocidade da luz (Chen, 2025). Essa informação de distância nos traz a perspectiva 1D do mecanismo.

**Figura 2.** Diagrama explicativo do mecanismo LiDAR.



Fonte: Adaptado de Chen, 2025.

Já a perspectiva 2D é obtida através do estabelecimento de um plano cartesiano centrado no equipamento LiDAR e na identificação dos ângulos de disparos dos pulsos laser. Com a distância e os ângulos é possível estabelecer as coordenadas cartesianas dos pontos. Para que esses pontos adquiram uma representação 3D, é necessário incorporar a informação de altitude e orientação do sensor (Altuntas, 2022). Em sistemas aerotransportados isso é realizado pela integração GNSS/IMU, que fornece a posição (x, y, z) e a altitude da plataforma a cada instante. Em sistemas móveis terrestres essa função pode ser desempenhada pela IMU, ou ainda pelo método de *Simultaneous Localization and Mapping* (SLAM), quando não há sinal GNSS disponível (Fasiolo, 2023).

Assim, emissão após emissão, o equipamento LiDAR vai identificando a sua própria posição e a dos pontos, montando a nuvem digital e tridimensionalmente.

A seguir serão apresentados, em subtítulos, explicações sobre alguns termos importantes à compreensão da tecnologia LiDAR.

### 3.1 LAS

Extensão padrão da indústria para a interoperabilidade entre sistemas para armazenamento e transferência de nuvens de pontos LiDAR (ASPRS, 2019). Apresenta a seguinte estrutura:

- *Public Header Block* (PHB)
  - Contém metadados gerais sobre o arquivo, como a versão do formato LAS, a quantidade de pontos na nuvem e as coordenadas mínimas e máximas (extensão).

- *Variable Length Records (VLRs)*
  - Seção opcional que armazena informações como o Sistema de Referência Espacial (CRS) utilizado.
- *Point Data Records*
  - A seção principal que lista as informações (coordenadas e atributos) para cada ponto da nuvem.

### 3.2 LAZ

Extensão compactada, sem perdas, de arquivos LAS. Facilita armazenamento e transferência, mas aumenta o tempo de processamento devido a necessidade de descompactação (Schleich, 2016).

### 3.3 LAX

Arquivo auxiliar e opcional que acompanha nuvens de pontos de extensão LAS ou LAZ. Armazena informações estruturais e espaciais (indexação), tornando mais eficiente o processamento ao otimizar operações (visualização, recorte, consulta, etc...) que exigem acesso a um subconjunto dos dados, retirando a necessidade de leitura da nuvem inteira. Especialmente efetivo com arquivos LAZ, já que pode auxiliar no sentido de descompactar apenas o subconjunto necessário de pontos (Rapidlasso, 2025).

### 3.4 ID

Arquivos do formato LAS tem vários tipos definidos nas suas especificações (ASPRS, 2019), que variam de 0 a 10, de acordo com a quantidade de atributos adicionais e o tamanho de cada registro, em *bytes*.

**Quadro 3.** Tipos de formatos de arquivos LAS.

ID	Atributos adicionais
0	Básico (X, Y, Z, Intensidade, Retorno, Classificação)
1	Básico + Tempo GPS
2	Básico + Cor (RGB)
3	Básico + Tempo GPS + Cor (RGB)
4	Básico + Tempo GPS + Forma de Onda
5	Básico + Tempo GPS + Cor (RGB) + Forma de Onda
6 a 10	LAS 1.4 - Suporte a múltiplos retornos, <i>scanner channel</i> e maior espaço em <i>bytes</i> para registro.

Fonte: Adaptado de ASPRS, 2019.

### 3.5 RETORNO

Pulsos laser tem a propriedade de atravessar certas superfícies, a depender da densidade do alvo. Quando isso acontece, o pulso continua sua trajetória até a próxima superfície, e assim sucessivamente. Grande parte dos equipamentos LiDAR comerciais operam com capacidade para reconhecer e captar até 5 retornos de uma mesma emissão. Os equipamentos que conseguem captar mais de 5 retornos geram arquivos LAS dos tipos 6 a 10.

Assim, o primeiro retorno geralmente acontece nas superfícies mais altas, como uma folha da copa de uma árvore. Os retornos intermediários acontecem à medida que o pulso atinge outras superfícies mais baixas, como galhos e outras folhas. Por fim, o último retorno corresponde à superfície mais distante, geralmente o chão (Milenkovic, 2017).

### 3.6 BOUNDING BOX

Caixa delimitadora da nuvem de pontos. É definido por 6 coordenadas: Máximos e mínimos de X, Y e Z.

### 3.7 OFFSET VALUE

Valor de deslocamento. Utilizado para diminuir o peso do armazenamento das coordenadas ao reduzir a quantidade de caracteres nas colunas XYZ. Muitas vezes essas transformações ocorrem internamente, ou seja, ao abrir a planilha do arquivo LAS as coordenadas já estarão transformadas.

### 3.8 SCALE FACTOR

Define a precisão decimal da coordenada. Tem o mesmo intuito que o *Offset Value*, diminuir o peso do armazenamento. Após a aplicação deste último transforma a coordenada restante em número inteiro (ASPRS, 2019).

A coordenada real é reconstruída a partir do número inteiro gerado na última etapa com a seguinte fórmula:

$$X_{real} = (Inteiro\ de\ X * X\ Scale\ Factor) + X\ Offset\ Value$$

## 4. MANUAL

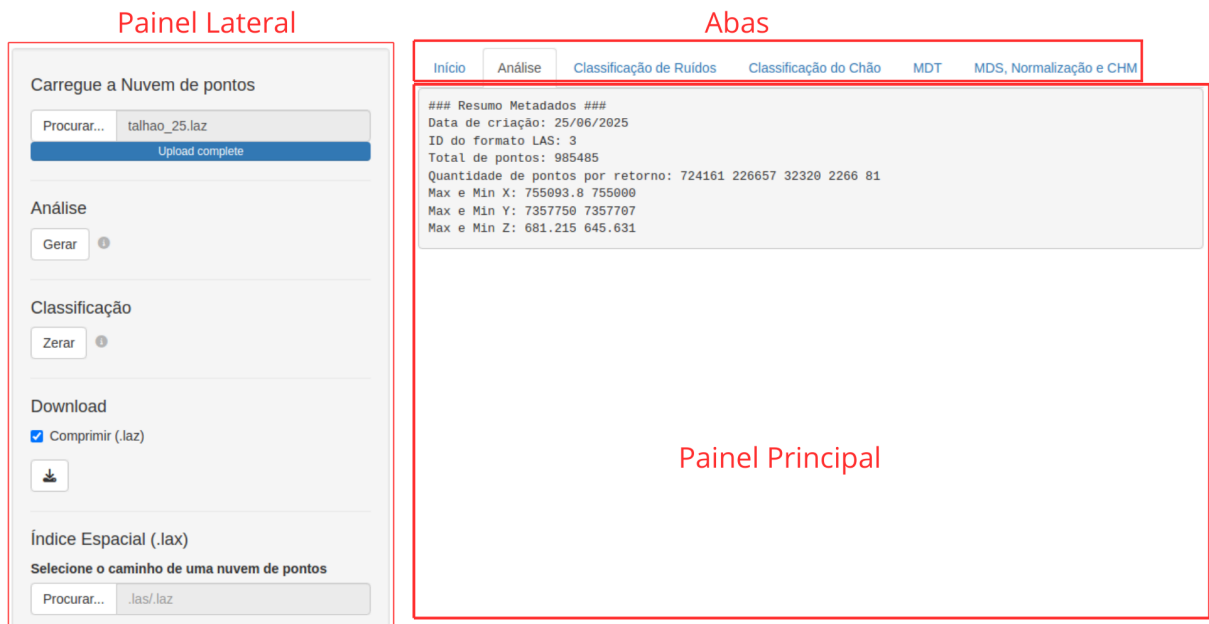
O ProcessaLAS foi construído com base no software R versão 4.5.0. Para o processamento da nuvem de pontos foram utilizados o pacote “lidR”, versão 4.2.2 (Roussel, 2025a), e “rlas”, versão 1.8.2 (Roussel, 2025b). A interface do aplicativo foi construída com o pacote “shiny”, versão 1.10.0 (Chang, 2024). Para a renderização tridimensional das nuvens de pontos foi utilizado o pacote “rgl”, versão 1.3.25 (Murdoch, 2025).

### 4.1 VISÃO GERAL

A interface do ProcessaLAS é dividida em três zonas de interação:

- Abas
  - Seleciona uma página/mecanismo de processamento.
- Painel Lateral
  - Inserção de arquivos e parâmetros, botões de ação e seção de ajuda rápida.
- Painel Principal
  - Renderização das nuvens de pontos em 3D e análises em texto.

**Figura 3.** Exemplo da interface de uma das abas do ProcessaLAS.



Fonte: Autor.

## 4.2 ABAS

São 6 abas disponíveis, cada uma traz sua interface própria, de acordo com o processamento a que se dedica. São elas:

- Início
  - Explicações acerca do funcionamento do ProcessaLAS.
  - Proposta de fluxo de trabalho.
- Análise
  - Entrada e saída da nuvem de pontos.
  - Visualização de metadados e dados resumidos/compilados.
  - Geração de índice espacial (LAX).
- Classificação de Ruídos
  - Algoritmos de classificação de pontos outlier:
    - *Statistical Outliers Removal* - SOR
    - *Isolated Voxels Filter* - IVF
  - Visualização da nuvem de pontos classificada.

- Saída da nuvem de pontos.
- Classificação do Chão
  - Algoritmos de classificação de pontos no chão:
    - *Cloth Simulation Filter* - CSF
    - *Progressive Morphological Filter* - PMF
    - *Multiscale Curvature Classification* - MCC
  - Visualização da nuvem de pontos classificada.
  - Saída da nuvem de pontos completa, apenas pontos chão ou apenas pontos não chão.
- MDT
  - Algoritmos para geração do Modelo Digital de Terreno (MDT):
    - *Inverse Distance Weighting* - IDW
    - *Triangulated Irregular Network* - TIN
    - Krigagem Universal
  - Visualização 3D do MDT.
  - Saída do MDT em formato TIF.
- MDS, Normalização e CHM
  - Algoritmos para geração do Modelo Digital de Superfície (MDS / CHM):
    - *Point to Raster* - P2R
    - *Triangulated Irregular Network* - TIN
    - *Pit-free*
  - Visualização 3D do MDS / CHM.
  - Saída do MDS / CHM em formato TIF.
  - Normalização da altitude (atributo Z) dos pontos em relação ao chão.
  - Saída da nuvem de pontos.

### 3.3 INÍCIO

Aqui você encontrará explicações sobre a divisão da interface do ProcessaLAS, os botões interativos e uma proposta de fluxo de trabalho/processamento.

No Painel Lateral estão disponíveis os 5 tipos de botões interativos:

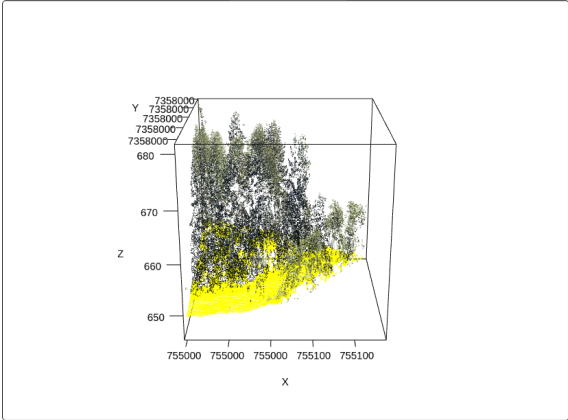
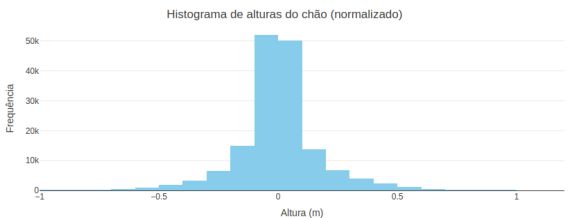
**Quadro 1.** Tipos de botões interativos do Painel Lateral.

Botão	Descrição
	Entrada da nuvem de pontos no aplicativo ou seleção de diretórios.
	Botão de ação. Realiza algum processamento. Símbolo “i” traz breves informações.
	Caixa de seleção binária. Selecionado é igual a Verdadeiro. Não selecionado é Falso.
	Botão de <i>download</i> de nuvens de pontos ou modelos digitais.
	Caixa de texto expansível ao clicar.

Fonte: Autor.

No Painel Principal estão disponíveis 3 formatos de exibição dos retornos dos processamentos:

**Quadro 2.** Tipos de formatos de exibição no Painel Principal.

Formato	Descrição
	<p>Janela de Visualização 3D com controle orbital da câmera.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Rotação: Segure e arraste o botão direito do mouse</li> <li>- Zoom: Gire ou pressione o scroll do mouse e o movimento.</li> </ul>
<pre>### Resumo Metadados ### Data de criação: 25/06/2025 ID do formato LAS: 3 Total de pontos: 985485 Quantidade de pontos por retorno: 724161 226657 32328 2266 81 Max e Min X: 755093.8 755099 Max e Min Y: 7357759 7357787 Max e Min Z: 681.215 645.631</pre>	<p>Caixa de texto com retorno de métricas após processamentos ou análises.</p>
	<p>Histograma interativo.</p>

Fonte: Autor.

O ProcessaLAS foi projetado para um fluxo didático de processamentos, mas isso não impede seu uso fragmentado, ou seja, é possível pular algumas etapas, a depender da nuvem de pontos carregada.

Podemos dividir o processamento da nuvem de pontos em 5 etapas:

- 1. Análise
  - Obtenção de métricas de todos os atributos de um arquivo LAS.
  - Essencial para a verificação da qualidade do sensoriamento e para a configuração dos parâmetros dos algoritmos nos processamentos posteriores.

- 2. Classificação de pontos
  - Identifica o tipo de superfície que determinado ponto representa.
  - A classificação de ruídos procura pontos que, por diversos motivos, não representam a superfície alvo e, portanto, podem representar um problema para o bom funcionamento dos algoritmos. Não é um passo obrigatório.
  - A classificação de chão procura os pontos que representam a superfície do terreno e são a base de alguns processos posteriores. É um passo obrigatório.
- 3. Modelos Digitais
  - Gera rasters, em formato TIF, que representam determinada superfície.
  - Modelos digitais de terreno (MDT) representam a superfície do terreno, excluindo os objetos sobre este. Depende de pontos classificados como chão (classe 2) para ser processado. Seus pixels, geralmente, contém valores em altitude no atributo Z.
  - Modelos digitais de superfície (MDS) representam a superfície do terreno, incluindo os objetos sobre este. Utiliza os pontos mais altos por pixel ou os pontos de primeiro retorno. Seus pixels, geralmente, contém valores em altitude no atributo Z.
- 4. Normalização
  - A partir do MDT, os valores de altitude (Z) da nuvem de pontos são normalizados.
  - Isso significa que a elevação do terreno é subtraída de cada ponto, transformando altitudes em alturas relativas ao solo.
  - Dessa forma, o terreno passa a ser o plano zero, permitindo a medição direta da altura da vegetação.
- 5. Modelo Digital de Altura do Dossel (CHM)
  - *Canopy Height Model* (CHM), ou Modelo Digital de Altura do Dossel, é como um MDS só que gerado a partir de uma nuvem de pontos com altura normalizada.
  - Representa a altura das copas das árvores.

- É o arquivo base para processamentos mais complexos, que não estão disponíveis no ProcessaLAS, como a individualização de árvores e obtenção de sua altura e diâmetros de indivíduos.

### 3.4 ANÁLISE

O primeiro passo para o uso do ProcessaLAS consiste na entrada da nuvem de pontos. Somente arquivos da extensão LAS ou LAZ (versão comprimida) são aceitos. Há um limitador para o tamanho do arquivo que pode ser carregado no ProcessaLAS, imposto pelo *framework* do Shiny e configurado a 512 MB.

Assim que o arquivo for carregado no ProcessaLAS, será exibido (Figura 3), no Painel Principal, uma caixa de texto com as informações do metadados (contidas na seção PHB), sendo elas:

- Data de criação do arquivo LAS
- ID do formato LAS
- Total de pontos
- Quantidade de pontos por retorno
- Máxima e mínimo dos valores das coordenadas X, Y e Z

Após a leitura dos metadados do arquivo o próximo passo é a geração da análise dos dados contidos na seção *Point Data Records*, ou seja, os pontos e seus atributos adicionais. Esse mecanismo é acionado com o **botão de ação número 1**, “Gerar”, disponibilizado no Painel Lateral, conforme esquematizado abaixo:

**Figura 4.** Interface da aba “Análise”, com os números de 1 a 4 representando os botões de ação.

The interface shows the 'Análise' tab selected. On the left, there are four numbered buttons: 1 (Gerar), 2 (Zerar), 3 (Download), and 4 (Criar). The right panel displays the following analysis results:

```

### XYZ ###
Sistema de Coordenadas: 32722 - WGS 84 / UTM zone 22S
Total de pontos: 985485
Lado X bbox (m): 93.79
Lado Y bbox (m): 42.93
Área bbox (m²): 4026.65
Área ocupada por pontos (m²): 2661
Pontos por m² (primeiros retornos / área ocupada por primeiros retornos): 272
Distância linear entre primeiros retornos em m (Nominal Post Spacing): 0.061
Altura Z bbox (m): 35.58
Volume bbox (m³): 143284.4
Voxels de 1m³ com pelo menos 1 ponto: 22203
Média de Pontos por Voxel (1m³, exceto vazios): 44
Mediana de Pontos por Voxel (1m³, exceto vazios): 21
Desvio padrão de Pontos por Voxel (1m³, exceto vazios): 55
Scale Factor: 0.001 0.001 0.001
Offset Value: 754692.8 7357669 0
Mínimo e Máximo de X: 755000 755093.8
Mínimo e Máximo de Y: 7357707 7357750
Mínimo e Máximo de Z: 645.631 681.215

### Intensity ###
Válido? Sim
Mínimo e Máximo: 0 38912

### Return Number e Number Of Returns ###
ReturnNumber válido? Sim
NumberOfReturns válido? Sim
Máximo de retornos: 5
Pontos por retorno: 724161 226657 32320 2266 81

### Scan Direction Flag ###
Válido? Não
Quantos pontos 0 e 1? 985485 0

```

Fonte: Autor.

Ao gerar a análise, várias métricas serão calculadas, compiladas e categorizadas por atributo, cada uma remetendo às colunas que compõem um arquivo LAS. Toda vez que a nuvem de pontos for salva dentro do aplicativo, esta seção de análise será atualizada.

**Figura 5.** Montagem de um *data frame* típico de arquivos LAS.

X	Y	Z	gpstime	Intensity	ReturnNumber	NumberOfReturns	ScanDirectionFlag	EdgeOfFlightline	
755000.1	7357731	677.168	434809407	2048	1	4	0	0	
755000.0	7357731	676.057	434809407	9472	1	1	0	0	
755000.2	7357731	668.956	434809407	512	2	2	0	0	
755000.2	7357731	673.909	434809407	3072	1	2	0	0	
Classification	Synthetic_flag	Keypoint_flag	Withheld_flag	ScanAngleRank	UserData	PointSourceID	R	G	B
1	FALSE	FALSE	FALSE	23	0	0	20992	22016	19456
1	FALSE	FALSE	FALSE	23	0	0	18944	20224	15104
1	FALSE	FALSE	FALSE	21	0	0	6400	7424	7168
1	FALSE	FALSE	FALSE	22	0	0	26112	26368	21760

Fonte: Autor.

A primeira seção é denominada XYZ e traz uma série de informações relacionadas aos pontos-coordenadas, à *bounding box* e sua ocupação:

- Sistema de coordenadas
- Total de pontos
- Dimensões da *Bounding Box*

- Lado X:
  - $X_{\text{máximo}} - X_{\text{mínimo}}$
- Lado Y:
  - $Y_{\text{máximo}} - Y_{\text{mínimo}}$
- Área:
  - $\text{Lado } X * \text{Lado } Y$
- Altura Z:
  - $Z_{\text{máximo}} - Z_{\text{mínimo}}$
- Volume:
  - $\text{Área} * \text{Altura } Z$
- Área ocupada por pontos ( $\text{m}^2$ )
  - Somatório de todos os pixels, de resolução 1, com pelo menos 1 ponto.
- Pontos por  $\text{m}^2$  (primeiros retornos / área ocupada por primeiros retornos)
  - Apenas os pontos de primeiro retorno foram utilizados, em conjunto com a área que ocupam.
- Distância linear entre pontos (*Nominal Post Spacing*)
  - Inverso da raiz quadrada de “Pontos por  $\text{m}^2$ ”
- Quantidade de Voxels ( $1 \text{ m}^3$ ) ocupados por pontos, média e mediana de pontos por voxel e seu desvio-padrão.
- Mínimos e Máximos de XYZ
- *Scale Factor*
- *Offset Value*

A próxima seção se refere ao *Intensity*, medida adimensional da magnitude do pulso laser refletido (Eken, 2025). É influenciado pelos seguintes parâmetros:

- Distância até o alvo
  - A energia do pulso laser diminui com a distância percorrida.
- Ângulo de incidência
  - Disparos perpendiculares refletem mais energia.
- Albedo
  - Superfícies claras e reflexivas retornam mais energia.

A aplicação prática desse atributo se encontra na possibilidade de diferenciação de superfícies (necessitando de algoritmo de classificação), como a identificação das faixas pintadas no asfalto, que servem como guia para veículos.

A análise desse atributo retorna:

- Validade
  - Se 95% de pontos contém valores maiores que zero.
- Mínimo e Máximo

Em seguida há a seção para Return Numbers e Numbers of Returns. O primeiro remete à identificação de qual a sequência do retorno daquele pulso laser, enquanto o segundo remete a quantos retornos aquele pulso laser gerou. Por exemplo, um ponto pode ter sido o segundo retorno (*Return Number*) de um total de 4 retornos (*Numbers of Return*), de um mesmo disparo.

A análise desse atributo retorna:

- Validade
  - Se 95% de pontos contém valores maiores que zero.
- Máximo de retornos
  - Valor máximo encontrado em *Numbers of Return*.
- Pontos por retorno
  - Contagem de pontos começando pelo primeiro retorno e terminando no último.

A próxima seção se refere ao atributo Scan Angle Rank, que denota a direção do scanner quando da emissão do pulso laser. Os dois valores possíveis são 0, para direções com ângulos negativos, e 1, para direções com ângulos positivos. Quando o scanner do equipamento LiDAR não inclui um componente rotativo então recebe 0 em todos os pontos (ASPRS, 2019).

A análise do atributo retorna:

- Validade
  - Se 95% de pontos contém valores maiores que zero.
- Quantidade de pontos 0 e 1, respectivamente.

A próxima seção se refere ao atributo *Edge of Flight Line*, que tem dois valores possíveis: 0 e 1. Um ponto só recebe valor 1 quando este está no limite do escaneamento, ou seja, é a última emissão antes que o scanner se volte à direção contrária. Esses pontos tendem a apresentar defeitos posicionais, devido à questão da baixa energia de refletividade (vide *Intensity*). Quando o scanner do equipamento LiDAR é do tipo 360° de varredura, então todos os pontos recebem o valor zero (ASPRS, 2019).

A análise do atributo retorna:

- Validade
  - Se 95% de pontos com valores maiores que zero.
- Quantidade de pontos 0 e 1

A próxima seção se refere ao atributo *Classification*, que categoriza, por meio de algoritmos, cada um dos pontos em objetos ou superfícies diferentes. As categorias foram pré-definidas pela ASPRS:

**Quadro 4.** Classes de pontos definidas pela ASPRS.

Classe	Significado
0	Nunca classificado
1	Não classificado
2	Chão
3	Vegetação baixa
4	Vegetação média
5	Vegetação alta
6	Edificação
7	Ruído Baixo
8	Ponto-chave*
9	Água
10	Reservado**
11	Reservado**
12	Sobrepostos***
18	Ruído Alto
13-31	Reservado**

Fonte: Adaptado de ASPRS, 2019.

\* = Pontos essenciais para descrição da superfície.

\*\* = Classe reservada para futuras definições ou softwares específicos.

\*\*\* = Pontos localizados em áreas de sobreposição de vôos adjacentes.

A análise do atributo retorna:

- Verificação
  - Se há pontos com valores diferentes de 0.
- Identificação das classes
- Quantidade de pontos classificados como “chão” (classe 2).
- Densidade de pontos chão.
  - Razão entre a quantidade de pontos chão e a área da *bounding box*.
- Desvio padrão da densidade de pontos chão por m<sup>2</sup>.
- Mediana do atributo Z (altitude) dos pontos chão.
- Verificação de Normalização
  - Considera como normalizada se a mediana de Z for menor ou igual a 0.5 metros.

A próxima seção se refere ao atributo User Data, que é de uso livre pelo usuário.

A análise do atributo retorna:

- Verificação
  - Se há algum valor em algum ponto.

A próxima seção se refere ao atributo Point Source ID, que remete à origem do ponto, definido a partir de um recorte temporal específico. Pode ser uma linha de vôo de um drone ou uma rota de um equipamento mobile, por exemplo.

A análise do atributo retorna:

- Verificação
  - Quantidade de fontes distintas.

A próxima seção se refere ao atributo GPS Time, que registra o tempo exato da emissão do pulso laser a partir do sistema *GPS Week Time*, que é a contagem de segundos a partir do dia 6 de janeiro de 1980, marco do início do sistema.

A análise do atributo retorna:

- Validade
  - Se existe a coluna e se mais de 95% dos dados são maiores que 0.

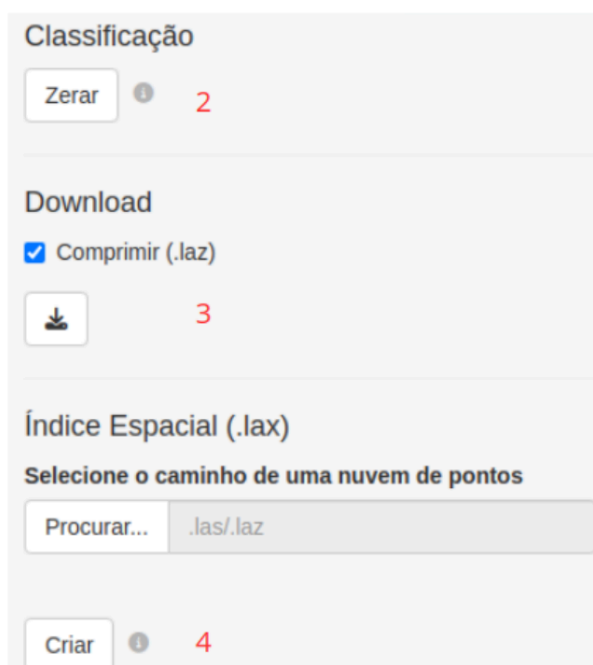
A última seção da análise se refere aos atributos RGB, que remetem à cor de cada ponto. Cada uma das cores primárias (*Red*, *Green* e *Blue*) é uma coluna e contém sua respectiva intensidade para aquele ponto. A combinação desses três valores define a cor final.

A análise do atributo retorna:

- Validade
  - Se existem as colunas e se mais de 95% dos dados são maiores que 0.
- Verificação de simulação
  - Alguns equipamentos LiDAR simulam valores de RGB para colorir os pontos em relação à sua altitude.

O **botão de ação número 2** (Figura 4 e 6), “Zerar”, atribui o valor 0 na coluna *Classification* para todos os pontos. Ou seja, reiniciará toda e qualquer classificação prévia.

**Figura 6.** Destaque da Interface na aba “Análise”, com os números de 2 a 4 representando os botões de ação.



Fonte: Autor.

O **botão de ação número 3** (Figura 4 e 6) fará o *download* da nuvem de pontos, com todas as alterações realizadas e salvas. O arquivo poderá ser baixado com extensão LAS ou LAZ (comprimido), a partir da seleção da caixa de seleção.

O **botão de ação número 4** (Figura 4 e 6) criará um arquivo novo que fará a função de índice dos pontos, de extensão LAX. Para que o novo arquivo seja criado é necessário selecioná-lo a partir do botão “Procurar...”, ou seja, qualquer arquivo LAS ou LAZ pode ser selecionado. O arquivo carregado no aplicativo não será usado (caso não seja selecionado nesse processo).

#### 4.5 CLASSIFICAÇÃO DE RUÍDOS

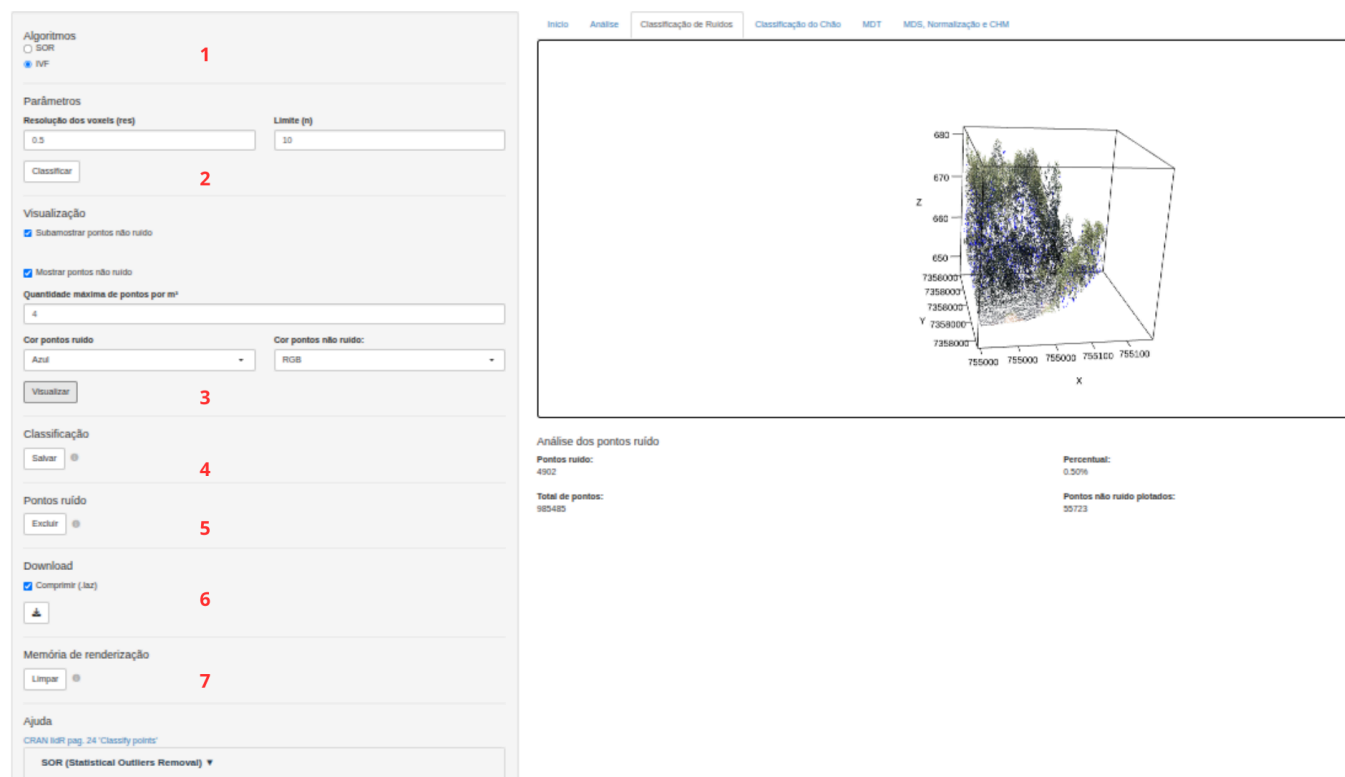
É definido como o processo de identificação de pontos que não representam feições reais das superfícies alvo do sensoriamento. Tais pontos tendem a atrapalhar a eficiência de algoritmos e processamentos.

Como já visto, a ASPRS definiu a classificação de número 7 (Baixo) e 18 (Alto) para pontos ruído. A distinção entre eles reside na diferença de altitude em relação ao solo, sendo que algumas rotinas de processamento consideram a classificação 7 como ruído em geral, sem distinguir em relação a altitude. Os algoritmos de classificação de ruídos disponíveis no pacote “lidR”, já citado, trabalham com ruídos altos (*high noise*), de classificação 18.

Os pontos ruído tendem a ser excluídos da nuvem de pontos ou ignorado nos processamentos posteriores. No caso específico do ProcessaLAS, os pontos ruído devem ser excluídos para que não sejam usados.

No Painel Lateral encontraremos 7 seções com funcionalidades distintas, conforme esquematização abaixo:

**Figura 7.** Interface da aba “Classificação de ruídos”. No Painel Lateral os números de 1 a 7 representam as seções de processamento. No Painel Principal estão a janela de visualização e, logo abaixo, a análise da classificação.



Fonte: Autor.

Na **seção número 1** (Figura 7), de nome “Algoritmos”, pode-se escolher entre dois algoritmos de classificação de ruídos e, logo abaixo, na **seção número 2** (Figura 7), de nome “Parâmetros”, pode-se trocar e testar os valores dos parâmetros respectivos.

Uma nova nuvem de pontos, agora classificada, será criada após o acionamento do **botão de ação “Classificar”**, ficando disponível apenas neste aba, até que seja salva. Uma análise será disponibilizada abaixo da janela de visualização, no Painel Principal, com as seguintes métricas:

- Pontos ruído
  - Quantidade de pontos classificados como ruído.
- Total de pontos
  - Quantidade total de pontos (ruídos e não ruídos).
- Percentual
  - Percentual de pontos ruído em relação ao total de pontos.
- Ponto não ruído plotados

- Quantidade de pontos não ruído plotados (com ou sem subamostragem). Aparece apenas após a renderização.

Na **seção de número 3** (Figura 7 e 8), de nome “Visualização”, temos os controles de renderização e visualização da nuvem de pontos.

**Figura 8.** Destaque da Interface na aba “Classificação de ruído”, com os números de 3 e 4 representando os botões de ação.

Fonte: Autor.

O **primeiro checkbox**, de nome “Subamostrar pontos não ruído”, refere-se a subamostragem dos pontos não classificados como ruído, reduzindo-os em quantidade e, portanto, necessitando menor processamento para visualização.

O algoritmo de subamostragem seleciona o ponto mais próximo do centro do voxel. O ProcessaLAS calcula a aresta ideal de um voxel para que os pontos renderizados não superem o limite estabelecido em “**Quantidade máxima de pontos por m³**”. Considerando que o mínimo de pontos por metro cúbico é 1, a lógica é a seguinte:

$$PPMC = \frac{1 \text{ ponto}}{L^3}$$

$$L^3 = \frac{1 \text{ ponto}}{PPMC}$$

$$L = \sqrt[3]{\frac{1 \text{ ponto}}{PPMC}}$$

Sendo:

PPMC = Pontos por metro cúbico. Entrada do aplicativo.

L = Aresta (resolução) de um cubo (voxel). Entrada do algoritmo de subamostragem.

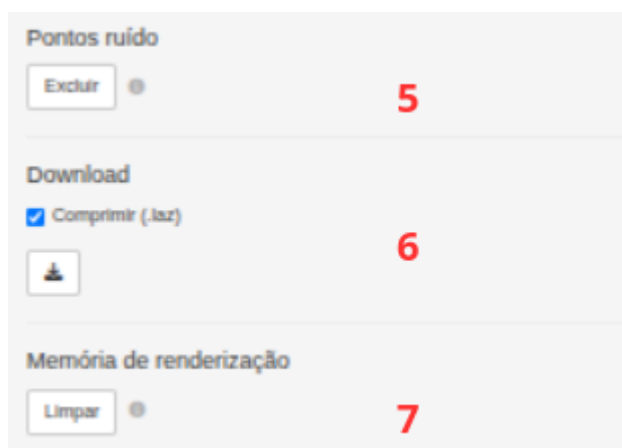
O **segundo checkbox**, de nome “Mostrar pontos não ruído”, controla a presença de pontos não ruído na janela de visualização, no Painel Principal. Se selecionado mostra os pontos não ruído, se não selecionado então os oculta.

As duas entradas restantes são “**Cor pontos ruído**” e “**Cor pontos não ruído**”, que controlam a cor dos pontos na janela de visualização, respectivamente, dos pontos ruído e dos não ruído. A visualização da nuvem de pontos, com todas as configurações selecionadas, será acionado com o **botão de ação “Visualizar”**.

Na **seção de número 4** (Figura 7 e 8), de nome “Classificação”, temos o **botão de ação “Salvar”**, que salvará a última classificação de ruídos realizada, substituindo a nuvem de pontos carregada no aplicativo. Depois desse passo a nuvem pode ser usada em outras abas.

Na **seção de número 5** (Figura 7 e 9), de nome “Pontos ruído”, temos o **botão de ação “Excluir”**, que retira os pontos classificados como ruído e salva a nuvem de pontos, tornando-a disponível nas outras abas.

**Figura 9.** Destaque da Interface na aba “Classificação de ruído”, com os números de 5 e 7 representando os botões de ação.



Fonte: Autor.

Na **seção de número 6** (Figura 7 e 9), de nome “Download”, temos um **checkbox**, que controla a alternativa de comprimir (LAZ) a nuvem de pontos, e um **botão de ação estilizado**, que fará o *download* do último arquivo LAS salvo dentro do aplicativo.

Na **seção de número 7** (Figura 7 e 9), de nome “Memória de renderização”, temos o **botão de ação “Limpar”**, que excluirá o arquivo LAS classificado desta aba específica, fazendo com que a memória e a capacidade de processamento utilizado na visualização da nuvem de pontos seja liberada. Para que seja possível visualizar novamente é necessário refazer a classificação.

Os algoritmos, e parâmetros, disponíveis são:

#### 4.5.1 Statistical Outlier Removal (SOR)

Análise estatística sobre a vizinhança de cada ponto, classificando os que não se encaixam em um critério relacionado à distribuição das distâncias.

Para cada ponto calcula-se a média da distância para os ‘*k*’ pontos mais próximos (vizinhança). A partir daqui pode performar de duas formas:

##### *Desvio padrão* (PCL, 2025)

- Considera como normal a distribuição das distâncias médias.
- São classificados como ruído todos os pontos com distância média acima do limite:

$$\text{média} + m * \text{desvio padrão}$$

- Ideal para nuvens com densidade de pontos constante.

##### *Quantílico* (Robin, 2025)

- Não assume distribuição.
- Todos os pontos com distância média acima do quantil de ordem ‘*m*’ são classificados como ruído.
- Ideal para quando se tem experiência com o equipamento e o alvo.

#### **Parâmetros**

##### *Quantidade de vizinhos* (*k*)

- Número inteiro positivo.

- Quantidade de pontos vizinhos que serão considerados para a obtenção da distância média.
- Um valor de parâmetro apropriado depende da densidade de pontos, mas, basicamente:
  - Quanto menor a quantidade de pontos vizinhos ( $k$ ) mais focado em ruídos isolados.
  - Quanto maior a quantidade de pontos vizinhos ( $k$ ) mais global é a análise, apesar de exigir maior capacidade de processamento.

#### *Quantílico*

- Lógico.
- Seleciona qual método de classificação.
- Quando ‘não’ o método *Desvio Padrão* será utilizado.
- Quando ‘sim’ o método *Quantílico* será utilizado.

#### *Multiplicador/Quantil (m)*

- Número racional positivo.
- Quando *Desvio Padrão*:
  - Multiplicador do desvio padrão da distribuição das distâncias médias dos pontos.
  - Quanto menor, mais agressiva é a classificação.
  - 1 Desvio Padrão  $\approx$  68% dos pontos; 2 Desvios Padrão  $\approx$  95% dos pontos; 3 Desvios Padrão  $\approx$  99,7% dos pontos.
- Quando *Quantílico*:
  - Quantil limite em que a distância média pode se encontrar.
  - Quanto menor, mais agressiva é a classificação.

### **4.5.2 Isolated Voxel Filter (IVF)**

Análise geométrica a partir de uma grade tridimensional (voxels), classificando pontos que não se encaixam em um critério de conectividade espacial.

Em cada voxel da grade é contabilizado o total de pontos em seu interior. Os pontos dentro do voxel são classificados como ruído quando a soma dos pontos do próprio voxel mais os 26 circundantes ( $3 \times 3 \times 3$ ) é menor que o limite ‘ $n$ ’.

Consideravelmente mais rápido (exige menor processamento) que SOR.

### **Parâmetros**

#### *Resolução dos voxels (res)*

- Número racional positivo.
- Resolução (aresta) do voxel.
- Resoluções muito baixas podem classificar estruturas pequenas como ruído, enquanto que resoluções muito altas podem falhar em detectar ruídos agrupados.

#### *Limite (n)*

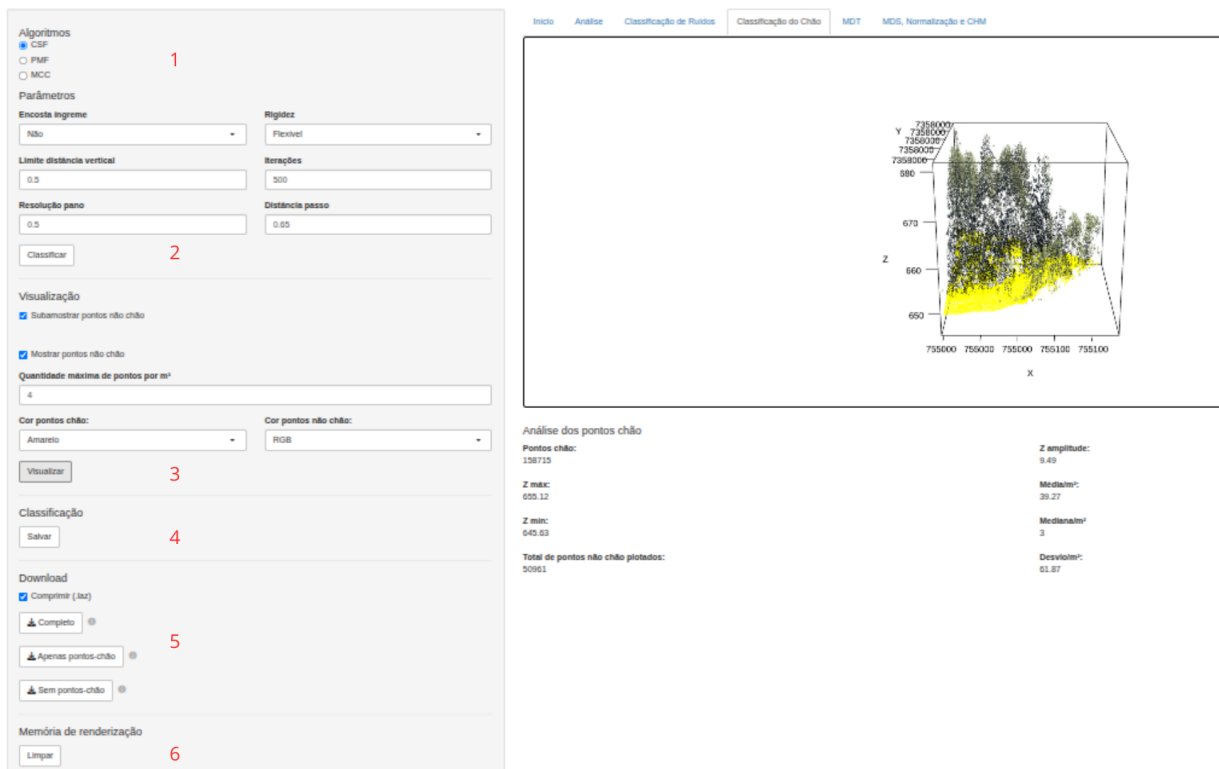
- Número inteiro.
- O máximo de pontos dentro dos 27 voxels para ser classificado como ruído.
- Quanto menor menos agressivo.

## **4.6 CLASSIFICAÇÃO DO CHÃO**

Definido como o processo de identificação de pontos no chão. Etapa crítica para a qualidade dos produtos gerados em processos posteriores, sendo que são obrigatórios para a geração do MDT. A ASPRS determinou a classificação de número 2 para os pontos chão.

No Painel Lateral encontraremos 6 seções com funcionalidades muito parecidas ou iguais as funcionalidades exploradas na aba anterior, “Classificação de Ruídos”, conforme esquematização abaixo:

**Figura 10.** Interface da aba “Classificação de chão”. No Painel Lateral os números de 1 a 6 representam as seções de processamento. No Painel Principal estão a janela de visualização e, logo abaixo, a análise da classificação.



Fonte: Autor.

A análise gerada, no Painel Principal, a partir do acionamento do **botão de ação “Classificar”**, exibirá as seguintes métricas:

- Pontos chão
  - Quantidade de pontos classificados como chão.
- Z máx
  - Valor mais alto do atributo Z (Altitude) dos pontos chão.
- Z mín
  - Valor mais baixo do atributo Z (Altitude) dos pontos chão.
- Z amplitude
  - $Z_{max} - Z_{min}$
- Média, Mediana e Desvio Padrão / m²
  - Métricas obtidas a partir da rasterização de uma nuvem de pontos apenas com os pontos chão.
- Total de pontos não chão plotados

- Quantidade de pontos não chão plotados (com ou sem subamostragem).

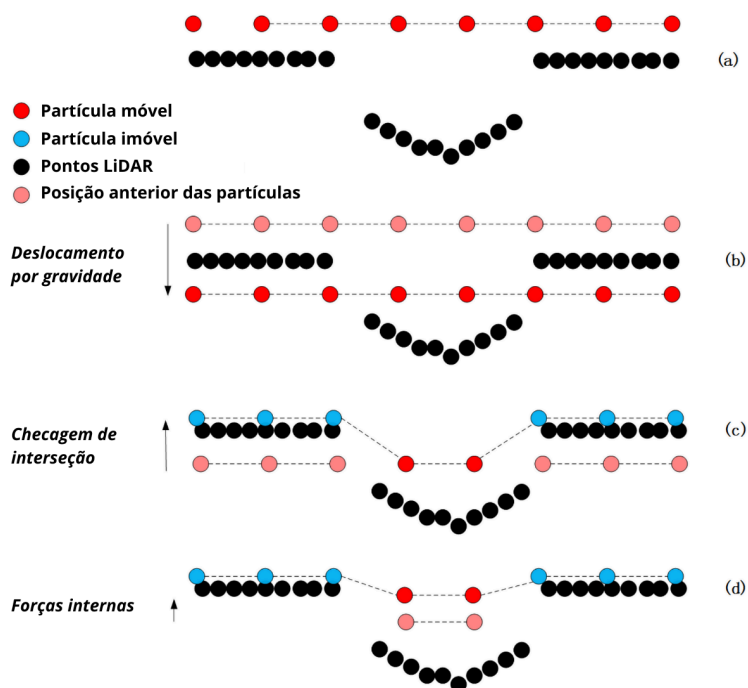
Os algoritmos, e seus parâmetros, disponíveis para a classificação dos pontos chão são:

#### 4.6.1 Cloth Simulation Filter (CSF)

Baseado em um processo de simulação física. Vira a nuvem de pontos de ponta-cabeça e joga um pano por cima, que cai a uma certa velocidade. O pano é repleto de nós que se adequam aos primeiros pontos que encontram, à uma determinada rigidez.

A simulação do tecido utiliza técnicas, com algumas modificações, da computação gráfica. O tecido é composto por uma série de partículas, de massa constante, que se interconectam com relações de força elástica. Essas partículas só podem se movimentar verticalmente e, quando colidem com pontos, se reajustam por cima dos mesmos, tornando-se imóveis. As partículas que não colidiram com nenhum ponto são influenciadas por uma certa resistência elástica, que seria a rigidez do pano (Zhang et al., 2016).

**Figura 11.** Representação gráfica dos principais passos do algoritmo CSF.



Fonte: Traduzido de Zhang et al., 2016.

Na Figura acima podemos visualizar o funcionamento do algoritmo. Na etapa (a) o pano é colocado acima dos pontos. Em (b) as partículas caem influenciadas pela gravidade a um determinado intervalo temporal. Em (c) as que ficam abaixo dos pontos chão, são movidas para cima dos mesmos e imobilizadas. Por fim, em (d) as partículas que ainda podem se mover são influenciadas por forças internas (força elástica).

Os dois parâmetros que mais merecem atenção no ajuste deste modelo são: *Encosta íngreme* e *Rigidez*. O autor deste algoritmo condiciona a escolha deles com base em características qualitativas do terreno, que são organizadas na tabela abaixo:

**Quadro 5.** Parâmetros sugeridos de acordo com características qualitativas do terreno.

Qualidade	Parâmetros	
	<i>Encosta Íngreme</i>	<i>Rigidez</i>
Terreno plano ou com declive suave	Não	3
Com declives acentuados (margem do rio, vala, terraços)	Sim	2
Encostas altas e íngremes (fosso, penhasco)	Sim	1

Fonte: Adaptado de Zhang et al., 2016.

## Parâmetros

### *Encosta íngreme*

- Lógico.
- Indica se é necessário realizar pós-processamento da classificação devido ao mau encaixe do pano sobre taxas acentuadas de declividade.
- A força elástica, partícula a partícula, restringe o pano de encaixar em curvaturas acentuadas da superfície.
- As partículas suspensas pela força elástica são deslocadas para sobre os pontos no chão, quando respeitam certo critério de diferença de altura entre pontos adjacentes e partícula-ponto.
- Ideal para terrenos acidentados, encostas íngremes, margens de rio, valas, fosso e penhascos.

### *Limite distância vertical*

- Racional positivo.
- Limite de distância vertical entre o pano e o ponto, para que este último seja classificado como chão.
- Governa a classificação de pontos chão, por ser a última instância classificadora.
- Segundo testes realizados por Zhang et al. (2016) o valor de 0.5 foi o que mais reduziu o erro de classificação.

### *Resolução pano*

- Racional positivo.
- Distância horizontal entre duas partículas.
- Segundo testes realizados por Zhang et al. (2016) o valor de 0.5 foi o que mais reduziu o erro de classificação.
- Intimamente relacionado ao tempo de processamento, já que determinará a quantidade de partículas do pano.

### *Rigidez*

- Controla a rigidez da força elástica entre partículas.
- Quando uma partícula é imobilizada e a adjacente não, esta última recebe resistência elástica, sendo ajustado com um recuo. (Figura 11, passo d)
- O valor 1 faz com que o recuo seja metade da distância entre a partícula imobilizada e a móvel, ideal para terrenos acidentados.
- O valor 2 faz com que o recuo seja  $\frac{3}{4}$  da distância.
- O valor 3 faz com que o recuo seja  $\frac{7}{8}$  da distância, ideal para terrenos planos.

### *Iterações*

- Inteiro positivo.
- O algoritmo simula a queda do pano, e, a cada passo, calcula a variância da distância vertical de todas as partículas com os pontos. Cada passo e cálculo desse é uma iteração.

- O algoritmo pára quando a variância da altura é pequena o suficiente ou quando atinge o limite estabelecido neste parâmetro.
- Segundo Zhang et al (2016), com 150 iterações o algoritmo tende a alcançar baixíssimos níveis de variância.

#### *Distância passo*

- Racional positivo.
- Controla o deslocamento das partículas pela gravidade a cada iteração.
- Segundo testes realizados por Zhang et al. (2016) o valor de 0.65 foi o que mais reduziu o erro de classificação.
- Valores menores aumentam consideravelmente o tempo de processamento e podem gerar erros maiores quando o passo é tão pequeno que as iterações não são suficientes para que as partículas encontrem pontos.

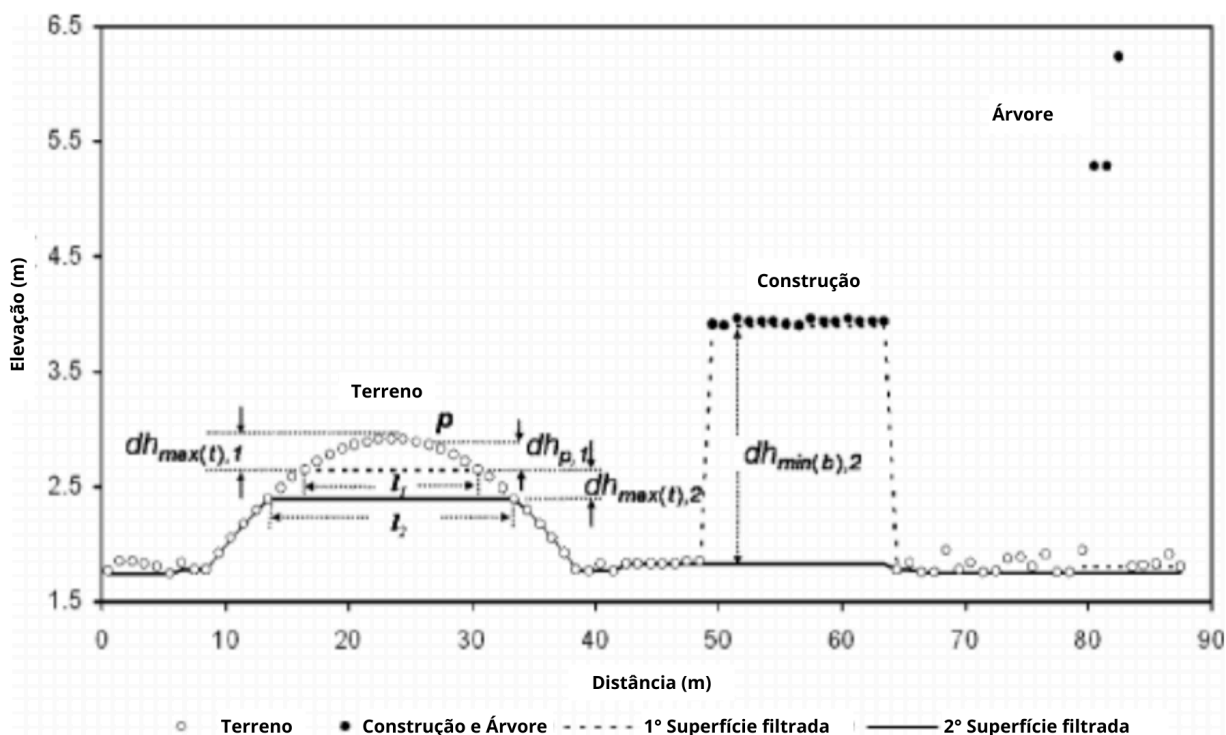
### **4.6.2 Progressive Morphological Filter (PMF)**

Baseado em Morfologia Matemática. Tem como premissa que objetos não-terrestres têm dimensões menores que as feições terrestres.

Primeiro a nuvem de pontos é rasterizada. Os pixels recebem as coordenadas e o menor valor de altitude respectivo. Uma janela ( $ws$ ), que cresce a cada iteração, varre a nuvem de pontos realizando uma operação denominada “abertura” que é a combinação de duas outras operações: “erosão”, que consiste na substituição do valor dos pixels com base no menor valor da vizinhança, e “dilatação”, que é a substituição do valor dos pixels com base no maior valor da vizinhança. O efeito prático é a eliminação de objetos não-terrestres com dimensões menores que o tamanho da janela (erosão), e, em seguida, a restauração da forma do terreno (dilatação).

A classificação dos pontos chão acontece com o cálculo da distância entre o ponto e a superfície raster gerada na operação de “abertura”, se a distância é menor que o limite ( $th$ ) então o ponto é considerado chão. Este parâmetro também tende a ser progressivo, ou seja, aumenta a cada iteração (Zhang et al., 2003).

**Figura 12.** Mecanismo do algoritmo PMF.



Fonte: Traduzido de Zhang et al. (2003).

A Figura acima ilustra duas varreduras sucessivas. A primeira, representada pela linha pontilhada, aconteceu com uma janela de 15 metros, que não foi o suficiente para excluir o edifício. Com o aumento progressivo da janela na segunda varredura, representada pela linha contínua, foi possível englobar o edifício e excluí-lo da superfície que representa o terreno. No exemplo denominado “Terreno” podemos perceber que superfícies de acentuada declividade podem ser excessivamente suavizadas.

## Parâmetros

### *Tamanho da janela (ws)*

- Lista de números racionais positivos.
- Controla o tamanho e o crescimento da aresta da janela de varredura, ao longo das iterações.
- Apenas objetos menores que a aresta da janela de varredura serão removidos.
- Podem ser obtidos através de fórmulas de crescimento linear ou exponencial.

- *Linear:*
- $w_k = 2kb + 1$
- Sendo:  $w_k$  = tamanho da janela no passo  $k$ ;  $k = 1, 2, \dots, M$  ;  $b$  = tamanho da janela inicial ;
- Aumenta a janela gradativamente, preservando bem as formas do terreno. É necessário maior capacidade de processamento.

*Exponencial:*

- $w_k = 2b^k + 1$
- Reduz a quantidade de iterações necessárias, mas é mais agressivo.

*Limite (th)*

- Lista de números racionais positivos, de mesmo tamanho que a lista de “Tamanho da janela (ws)”.
- Controla o limite aceitável de diferença de altura entre um ponto e a superfície gerada pela varredura para que seja classificado como chão.
- Pode ser obtido através de uma relação matemática entre a maior diferença de altitude, dentro da janela, o declive e o tamanho da janela.
- De modo geral, quanto menor a janela, menor o limite, já que as variações de altitude tendem a ser menores. Ou seja, quanto maior a declividade, maior o limite necessário.

#### 4.6.3 Multiscale Curvature Classification (MCC)

Baseado na curvatura local entre um conjunto de pontos e outro adjacente. Tem como premissa que o terreno tem curvatura local baixa ou negativa, enquanto que objetos acima do terreno apresentam curvaturas positivas e abruptas.

O primeiro passo do algoritmo é, utilizando o atributo  $Z$  dos pontos, interpolar um raster, representando a superfície, com o algoritmo TPS (*Thin Plate Spline*) que consiste na busca da menor curvatura local, entre um ponto e os 12 outros mais próximos, resultando em curvaturas suaves. A única variável desse modelo (TPS) é  $\lambda$  (*Tamanho da janela (s)*), a resolução do raster interpolado.

Em seguida um filtro de média (*mean kernel*) de 3x3 pixels varre o raster, substituindo o valor  $Z$  original por um valor médio suavizado. O valor do *Limite de curvatura (t)* é somado

aos pixels do raster, formando uma nova superfície, que acompanha a curvatura suavizada gerada e representa um limite. Todos os pontos que estão acima desse limite são considerados não-chão e são retirados para as próximas análises.

O algoritmo repete o mesmo processo, mais duas vezes, alterando a resolução do pixel (escala) da interpolação do raster pelo TPS. A primeira escala é  $0,5\lambda$ , a segunda é  $\lambda$  e a última  $1,5\lambda$ . O *Limite de curvatura (t)* tem 0,1 somado nas duas repetições subsequentes (Evans, 2007).

## Parâmetros

### *Tamanho da janela (s)*

- Racional positivo.
- Parâmetro de escala ( $\lambda$ ) utilizado no algoritmo TPS.
- Define a resolução dos pixels que serão interpolados sucessivamente.
- É indicado que o valor deste parâmetro seja próximo da distância linear entre primeiros retornos (*Nominal Post Spacing*).
- Quanto mais densa a nuvem de pontos, menor deve ser o tamanho da janela.

### *Limite de curvatura (t)*

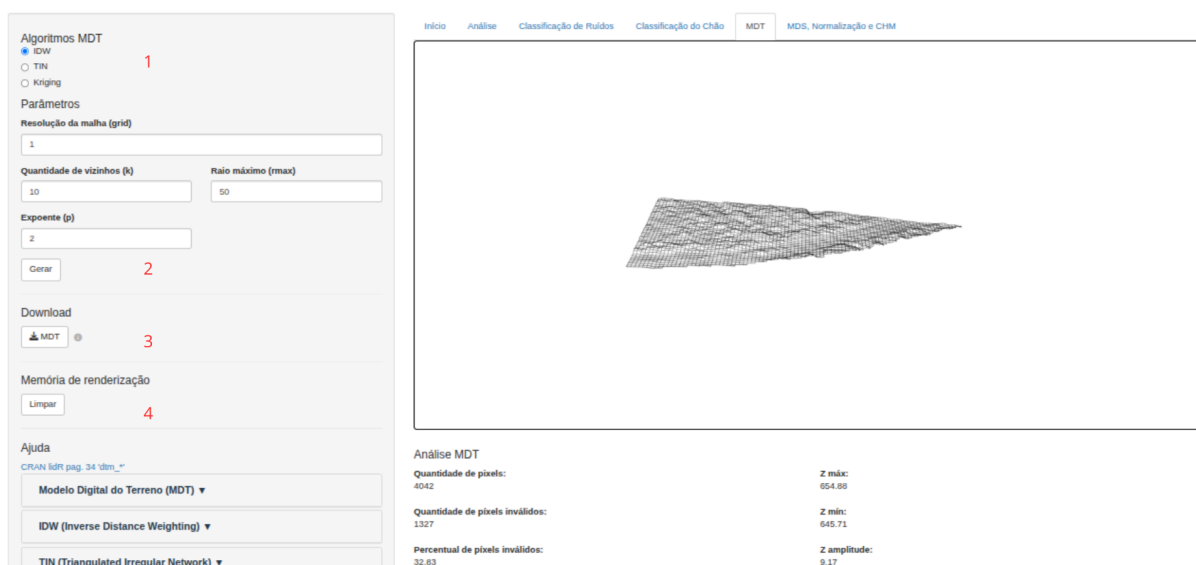
- Racional positivo.
- Controla a classificação de pontos não chão.
- Serve como buffer na superfície interpolada pelo TPS, fazendo com que pontos que não estão dentro do limite do buffer sejam classificados como não-chão.
- Valores baixos são mais conservadores e evitam a inclusão de vegetação baixa como pontos chão. Valores altos são necessários para declives acentuados.

## 4.7 MDT

Nesta aba processaremos o primeiro produto digital de uma nuvem de pontos: um Modelo Digital de Terreno, abreviado MDT.

MDT é a representação, em arquivo raster, da superfície de um terreno, excluindo os objetos sobre este, a partir de uma série de aplicações matemáticas (Mendonça, 2018). O arquivo raster gerado têm, em seus pixels, os valores de altitude do terreno. Apenas os pontos classificados como chão são utilizados nos algoritmos disponíveis no ProcessaLAS.

**Figura 13.** Interface da aba “MDT”. No Painel Lateral os números de 1 a 4 representam as seções de processamento. No Painel Principal estão a janela de visualização e, logo abaixo, a análise do modelo.



Fonte: Autor.

As **seções de número 1 e 4** (Figura 13) funcionam com os mesmos mecanismos que as seções de mesmo nome da aba “Classificação de Ruídos”, já explorados neste trabalho.

A **seção de número 2** (Figura 13), de nome “Parâmetros”, têm o funcionamento muito semelhante às outras seções, nas outras abas, com a diferença de que apresenta o parâmetro “Resolução da malha (*grid*)”, que define a aresta do pixel, influenciando diretamente na qualidade e assertividade do MDT gerado, além do **botão de ação “Gerar”**, que gera o MDT propriamente e também o renderiza na janela de visualização, no Painel Principal, realizando uma análise com as seguintes métricas:

- Quantidade de pixels
  - De toda a extensão da *bounding box*.
- Quantidade e percentual de pixels inválidos
  - Pixels que não receberam interpolação por ausência de pontos.

- Z máximo, mínimo e amplitude

A **seção de número 3** (Figura 13), de nome “*Download*”, contém um **botão de ação estilizado**, que baixará um arquivo TIFF respectivo ao último MDT gerado.

Os algoritmos, e seus parâmetros, disponíveis para a modelagem digital do terreno são:

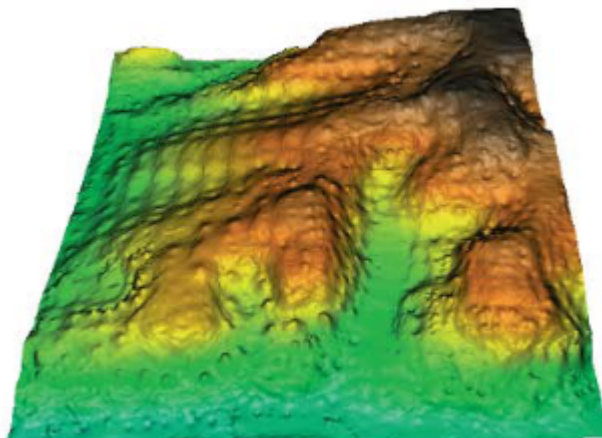
#### 4.7.1 K-Nearest Neighbour - Inverse Distance Weighting (KNN-IDW)

São dois algoritmos processando em conjunto. O IDW é baseado na suposição de que o valor de um ponto não amostrado (onde o pulso laser não bateu) pode ser estimado a partir da média ponderada dos pontos à uma certa distância ou uma certa quantidade de pontos mais próximos, sendo o KNN o algoritmo que realiza esta última função.

Ou seja, o valor, em altitude, de cada píxel do raster será estimado a partir da altitude dos pontos mais próximos, sendo que quanto mais longe menor peso o ponto terá na média ponderada (MITAS, 2005).

Apresenta tendência de criar máximos locais, conforme exemplo na figura abaixo:

**Figura 14.** Interpolação de um exemplo de MDT utilizando o algoritmo IDW.



Fonte: Mitas, 2005.

#### Parâmetros

##### *Quantidade de Vizinhos (k)*

- Inteiro positivo.

- Quantidade máxima de pontos mais próximos que serão considerados no cálculo da média ponderada.
- Mitas (2005) indica um valor entre 10 e 30.

#### *Raio máximo ( $r_{max}$ )*

- Racional positivo.
- Raio máximo de uma esfera onde será realizada a busca dos pontos mais próximos.
- Altamente relacionado com a densidade da nuvem de pontos. A partir de certo tamanho de raio, não produz diferença no raster gerado.
- Raios menores podem limitar a quantidade de pontos vizinhos encontrados.

#### *Expoente ( $p$ )*

- Racional positivo.
- Expoente da potência que regula o peso de cada ponto na média ponderada. É inversamente proporcional à distância, ou seja, quanto maior a distância menor é seu peso.
- O valor 2 é um equilíbrio clássico.
- Valores menores fazem com que os pontos distantes mantenham um peso considerável na média ponderada.
- Valores maiores tendem a considerar apenas os pontos mais próximos, tornando insignificantes os mais longes.

### **4.7.2 Triangulated Irregular Network (TIN)**

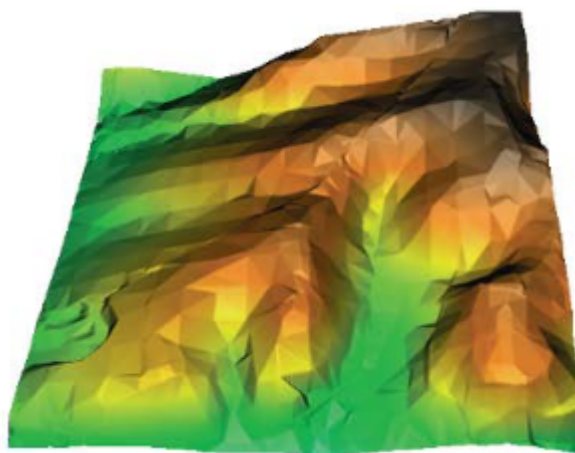
Abordagem geométrica. Utiliza a Triangulação de Delaunay, que consiste na conexão de pontos a partir de uma rede de triângulos, considerando o princípio de que não pode haver nenhum outro ponto dentro do círculo circunscrito ao mesmo triângulo. É um algoritmo simples, já que não apresenta parâmetros, e de rápido processamento.

A conexão entre os pontos-vértice é feita linearmente, sendo considerado um método menos preciso em relação aos não-lineares, já que não consegue garantir uma conexão suave ao longo do terreno, criando uma tendência de aspecto facetado ou anguloso (Figura abaixo),

mas, apesar disso, consegue representar bem descontinuidades, como vales e cristas (MITAS, 2005).

As bordas dos MDTs gerados tendem a apresentar deformações, devido a insuficiência de pontos para a triangulação. Para superar esse problema é necessário realizar a extrapolação dessas áreas utilizando os outros algoritmos: KNN-IDW e Kriging. Apenas o primeiro está disponível no ProcessaLAS.

**Figura 15.** Interpolação de um exemplo de MDT utilizando o algoritmo TIN.



Fonte: Mitas, 2005.

### Parâmetros

- O algoritmo TIN não necessita de parâmetros.

#### *Alterar parâmetros da Extrapolação?*

- Quando negativo utiliza o algoritmo KNN-IDW com os parâmetros padrão do pacote *lidR*.
- Quando afirmativo abre para configuração dos parâmetros do algoritmo KNN-IDW.

### 4.7.3 Krigagem Universal (Kriging)

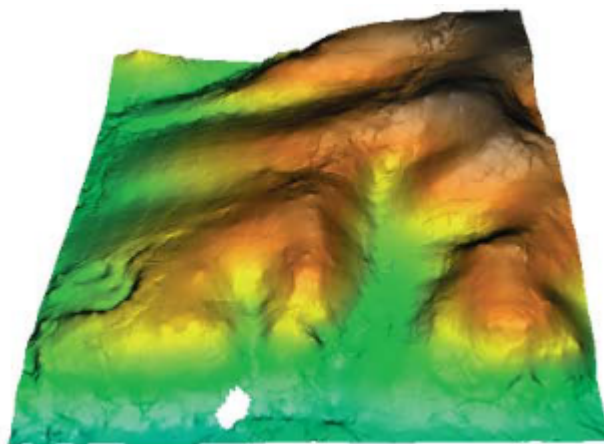
Abordagem estatística, de configuração complexa. Assume que a média, ao longo da superfície, apresenta uma tendência, ou seja, não é estacionária, que existe uma correlação positiva entre distância e variância e que a superfície analisada é a realização de uma função

aleatória, sendo necessário que para cada nuvem de pontos se faça uma modelagem de um semivariograma, ou seja, a quantificação da dependência espacial entre os pontos (MITAS, 2005).

No caso do ProcessaLAS não é possível modelar o semivariograma e nem alterar os parâmetros da krigagem. Isso faz com que seja utilizada a krigagem ordinária na interpolação da superfície.

A krigagem é realizada em conjunto com o algoritmo KNN, assim utiliza apenas uma quantidade determinada de pontos mais próximos. Este é o único parâmetro configurável.

**Figura 16.** Interpolação de um exemplo de MDT utilizando Krigagem.



Fonte: Mitas, 2005.

### **Parâmetros**

- A Krigagem não apresenta parâmetros, no contexto específico do ProcessaLAS.

#### *Quantidade de Vizinhos (k)*

- Inteiro positivo.
- Quantidade máxima de pontos mais próximos que serão considerados na Krigagem.

#### 4.8 MDS, NORMALIZAÇÃO E CHM

Nesta aba serão produzidos outros dois produtos digitais básicos: o Modelo Digital de Superfície (MDS) e o Modelo Digital de Altura de Dossel (CHM).

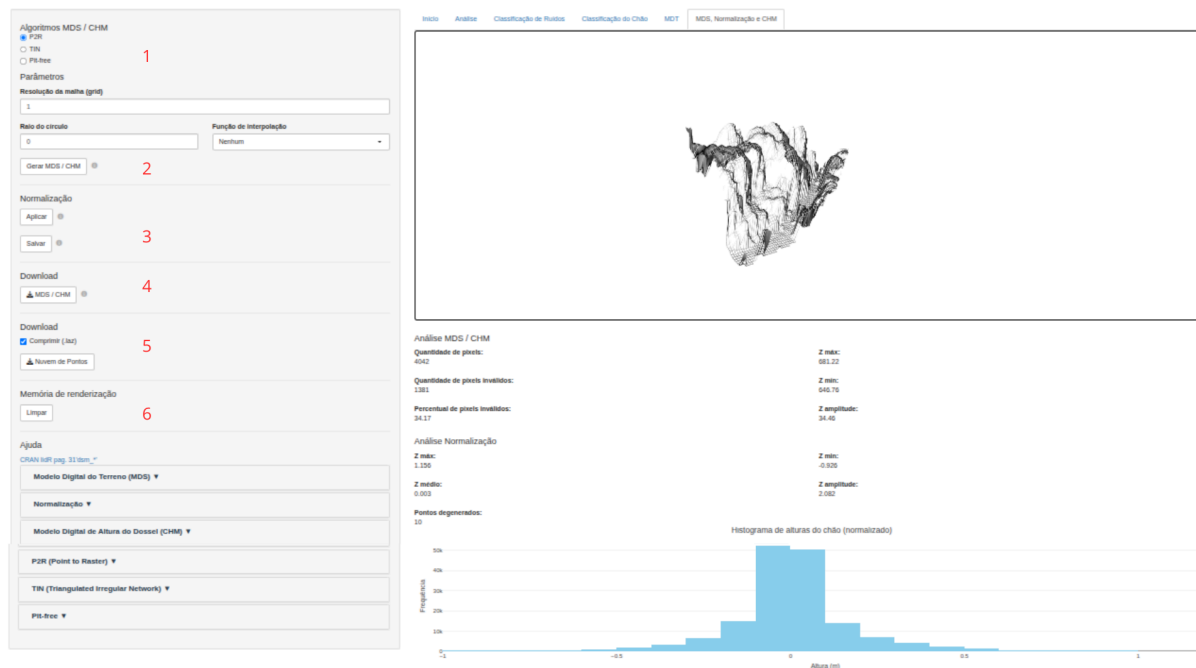
Um MDS é a representação da superfície de um terreno, incluindo os objetos sobre este. Ou seja, no raster gerado, os pixels conterão os valores de altitude do terreno, quando livre de objetos, e da altitude do topo dos objetos, quando presentes. Os algoritmos disponíveis no ProcessaLAS utilizam os pontos mais altos por pixel ou os pontos de primeiro retorno.

No contexto florestal, um MDS representa o dossel de determinada floresta. Como os valores dos pixels estão em altitude, há uma tendência de que os algoritmos e métodos utilizados na extração de métricas florestais sejam prejudicados devido a escala dos valores. Para contornar esse problema é necessário transformar esses valores de altitude para valores de altura em relação ao terreno. Existem dois métodos mais consolidados para executar essa transformação: a primeira, que não é utilizada no ProcessaLAS, é a subtração do MDS pelo MDT, resultando em um modelo digital com as alturas relativas ao solo, a segunda, essa sim utilizada neste aplicativo, é através da normalização da altura dos pontos da nuvem.

Normalização é o processo pelo qual os valores que representam a altura dos pontos (atributo Z), que geralmente estão em altitude, são subtraídos pelos valores de altitude de um MDT, fazendo com que os pontos assumam valores de altura relativa ao nível do terreno. O princípio da normalização consiste na consideração de que o terreno está a uma altura de 0 metros. Um novo atributo denominado “Zref” é criado e serve como referência para o caminho inverso, a desnormalização da nuvem de pontos (Roussel, 2025b). Esse método, apesar de essencial, pode gerar deformações de posicionamento nos pontos ao forçar a altura zero no terreno (Vega, 2014).

O modelo digital gerado a partir da normalização da nuvem de pontos é o Modelo Digital de Altura do Dossel, ou *Canopy Height Model* (CHM), muito parecido ao MDS, com a única diferença sendo a altura ser em relação ao nível do terreno e não do mar (altitude).

**Figura 17.** Interface da aba “MDS, Normalização e CHM”. No Painel Lateral os números de 1 a 6 representam as seções de processamento. No Painel Principal estão a janela de visualização e, logo abaixo, a análise do modelo.



Fonte: Autor.

As seções de número 1, 5 e 6 (Figura 17) funcionam com os mesmos mecanismos que as seções de mesmo nome da aba “MDT” e outras abas de processamento.

A seção de número 2 (Figura 17), de nome “Parâmetros”, têm o funcionamento muito semelhante à aba “MDT”, com a diferença de que, se a nuvem de pontos não estiver normalizada, então será gerado um MDS, caso a nuvem de pontos esteja normalizada, então será gerado um CHM.

A seção de número 3 (Figura 17), de nome “Normalização”, contém um botão de ação “Aplicar”, que cria uma nova nuvem de pontos normalizada a partir do último MDT gerado, sua análise e um histograma, além de um botão de ação “Salvar”, que salva a nuvem de pontos normalizada no aplicativo, fazendo-a disponível em outras abas.

O histograma da normalização demonstra a distribuição das alturas dos pontos chão, métrica essencial para a verificação da qualidade do processamento. O cenário ideal é que grande parte dos pontos estejam próximos da altura zero.

A análise da normalização traz as seguintes métricas:

- Z máximo, mínimo, média e amplitude
- Quantidade de pontos degenerados
  - Definidos como pontos chão com as mesmas coordenadas X e Y mas diferentes Z. Tais pontos podem ser fonte de problemas na modelagem do terreno.

A **seção de número 4** (Figura 17), de nome “*Download*”, contém um **botão de ação estilizado**, de nome “MDS / CHM”, que baixará um arquivo TIF respectivo ao último Modelo Digital gerado.

Os algoritmos, e seus parâmetros, disponíveis para a modelagem digital da superfície são:

#### 4.8.1 Point to Raster (P2R)

Abordagem sobre valores extremos. Impõe um raster sobre a nuvem de pontos e identifica quais pontos estão dentro de cada pixel, determinando o valor do mesmo a partir da altura do ponto mais alto.

Esse método pode gerar pixels vazios, sem pontos, e/ou com valores mais baixos que seus vizinhos, resultando em buracos no raster, por exemplo quando o ponto mais alto de determinado pixel for em um galho interno da copa, ou no chão. Para contornar esse problema, Roussel, 2025b, implementou um ajuste que adiciona 8 pontos ao redor do ponto mais alto, densificando a nuvem de pontos e tornando o MDS / CHM mais suave, ou com curvas menos abruptas.

Já os pixels vazios são interpolados a partir das funções KNN-IDW, TIN e Krigagem, já apresentadas neste trabalho

#### Parâmetros

##### *Raio do círculo*

- Racional positivo.
- Raio do círculo onde serão criados 8 pontos ao redor do ponto mais alto por pixel.
- Densifica a nuvem de pontos, tornando o modelo digital mais suave nas suas curvas e menos propenso a buracos.

- Relaciona-se diretamente com a resolução do píxel da malha raster e com o *Nominal Post Spacing*.

#### *Função de interpolação*

- Estima o valor de píxels vazios, ou seja, sem pontos.
- As funções disponíveis são: KNN-IDW, TIN e Krigagem.
- O funcionamento de cada uma das funções já foi detalhado na explicação da aba “MDT”.

### **4.8.2 Triangulated Irregular Network (TIN)**

Tem o mesmo princípio e funcionamento parecido que o TIN da aba “MDT”, com a diferença de que, na aba atual, há opção para escolher entre usar os pontos mais altos por píxel ou os pontos de primeiro retorno, a partir dos quais será realizada a triangulação, além de ser possível configurar um limite de tamanho para o lado do triângulo, evitando, assim, que pontos nas bordas ou muito distantes, separados por grandes vazios por exemplo, formem triângulos e degenerem o modelo digital.

#### **Parâmetros**

##### *Máximo lado do triângulo*

- Racional positivo.
- Limite do tamanho aresta do triângulo formado entre pontos.
- Evita degenerações, no modelo digital, a partir de grandes vazios ou bordas da nuvem de pontos.

##### *Ponto mais alto por píxel*

- Lógico.
- Seleciona qual método de escolha dos pontos que serão usados na triangulação.
- Quando ‘não’ são utilizados todos os pontos de primeiro retorno.
- Quando ‘sim’ são utilizados apenas os pontos mais altos por píxel, requerendo, assim, menor esforço de processamento.

### 4.8.3 Pit-free

Algoritmo desenvolvido para superar os problemas com os buracos de um modelo digital, já explorados na explicação inicial desta aba. É indicado exclusivamente para nuvens de pontos com altura normalizada, ou seja, gera um CHM.

Utiliza os pontos de primeiro retorno e o algoritmo TIN para criar uma série de modelos digitais, o primeiro com todos os pontos, depois, os outros, com cada um respeitando uma sequência de um limiar mínimo de altura, ou seja, apenas os pontos de primeiro retorno acima do limiar serão utilizados na geração do respectivo modelo digital. Num segundo momento, sobrepõe todos modelos digitais gerados e os filtra em um novo a partir da seleção dos valores mais altos (Khosravipour, 2014).

O resultado é um modelo digital onde os extremos menores são suavizados por causa do limiar mínimo escalável e da filtragem, diminuindo a tendência de buracos. Neste algoritmo também é implementado o ajuste de densificação dos pontos a partir da criação de 8 outros pontos ao redor de um círculo com raio definido, como no algoritmo P2R.

### Parâmetros

#### *Limiar de corte vertical*

- Lista de racionais positivos.
- Cada valor desta lista representa o limite mínimo de altura para considerar o ponto válido para a triangulação. Ou seja, apenas pontos com altura maior que o limite definido serão usados, sucessivamente.
- Diretamente relacionada com a qualidade do CHM gerado.
- Limiar de partida da lista deve ser 0 para representar o terreno onde não há árvores.
- Limiar final da lista não deve ser superior que a altura da maior árvore.
- Intervalos curtos entre limiares geram CHMs mais suaves e com menos buracos, mas exigem mais processamento.
- Intervalos longos entre limiares tendem a ser processados mais rapidamente, mas menos robusto contra buracos.

#### *Máximo lado do triângulo*

- Racional positivo.
- Limite do tamanho da aresta do triângulo formado entre pontos.
- Evita degenerações, no modelo digital, a partir de grandes vazios ou bordas da nuvem de pontos.

#### *Raio do círculo*

- Racional positivo.
- Raio do círculo onde serão criados 8 pontos ao redor do ponto mais alto por píxel.
- Densifica a nuvem de pontos, tornando o modelo digital mais suave nas suas curvas e menos propensa a buracos.
- Relaciona-se diretamente com a resolução do píxel da malha raster e com o *Nominal Post Spacing*.

#### *Ponto mais alto por pixel*

- Lógico.
- Seleciona qual método de escolha dos pontos que serão usados na triangulação.
- Quando ‘não’ são utilizados todos os pontos de primeiro retorno.
- Quando ‘sim’ são utilizados apenas os pontos mais altos por píxel, requerendo, assim, menor esforço de processamento.

## **5. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

O desenvolvimento do ProcessaLAS atinge o objetivo proposto de democratizar o acesso ao processamento de dados LiDAR, oferecendo uma alternativa gratuita e intuitiva aos softwares proprietários e sendo uma ponte para as linhas de comando de programação. A integração bem-sucedida da biblioteca *lidR* num ambiente *Shiny* proporciona praticidade operacional, facilitando etapas críticas de pré-processamento para estudantes e profissionais da engenharia florestal.

Como perspectiva futura sugere-se a inclusão de abas para visualização da nuvem de pontos com filtragens por atributo, detecção individual e contagem de árvores e obtenção de métricas.

## REFERÊNCIAS

ALTUNTAS, C. ***Point Cloud Acquisition Techniques by Using Scanning LiDAR for 3D Modelling and Mobile Measurement***. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XLIII-B2, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2022-967-2022>

ASPRS – American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. **LAS Specification, Version 1.4 – R15**. Bethesda, Maryland: ASPRS, 2019.

CHANG W.; CHENG J.; ALLAIRE J.; SIEVERT C.; SCHLOERKE B.; XIE Y.; ALLEN J.; MCPHERSON J.; DIPERT A.; BORGES B.; **shiny: Web Application Framework for R**. doi:10.32614/CRAN.package.shiny, R package version 1.10.0, 2024.

CHEN, H.; XI, T.; WANG, L. **Exploration of the Evolution of LiDAR Technology**. Journal of Electronic Research and Application, v. 9, n. 5, 2025. DOI: 10.26689/jera.v9i5.12196.

EVANS, Jeffrey S.; HUDAK, Andrew T.; **A Multiscale Curvature Algorithm for Classifying Discrete Return LiDAR in Forested Environments**. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, v. 45, n. 4, p. 1029–1038, abr. 2007.

EKEN, Recep. **Modeling and Estimating LIDAR Intensity for Automotive Surfaces Using Gaussian Process Regression: An Experimental and Case Study Approach**. Applied Sciences, Basel, v. 15, n. 6, art. 2884, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/6/2884>. Acesso em: 1 dez. 2025.

FASIOLO, D.; SCALERA, L.; MASET, E. **Comparing LiDAR and IMU-based SLAM approaches for 3D robotic mapping**. Robotica, p.1–17. 2023. DOI: 10.1017/S026357472300053X.

KHOSRAVIPOUR, A.; SKIDMORE A.; ISENBURG M.; WANG T.; HUSSIN Y. **Generating Pit-free Canopy Height Models from Airborne Lidar**. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, v. 80, n. 9, p. 863-872, 2014.

MENDONÇA, Rafael Lopes; PORTUGAL, José Luiz. **Filtragem de Dados LiDAR de Área com Relevo Acidentado para Geração de Modelo Digital do Terreno**. Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ, Rio de Janeiro, v. 41, n. 3, p. 568–579, 2018. DOI: [http://dx.doi.org/10.11137/2018\\_3\\_568\\_579](http://dx.doi.org/10.11137/2018_3_568_579).

MILENKOVIC, Milutin. **Description of natural surfaces by laser scanning**. Master's Thesis, Technische Universität Wien (TU Wien), 2017.

MITAS, L.; MITASOVA, H. Spatial Interpolation. *In*: LONGLEY, P. A. et al. (org.). **Geographic Information Systems: Principles, Techniques, Management and Applications**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 2005. v. 1, cap. 34, p. 481-492. Disponível em: [https://www.geos.ed.ac.uk/~gisteac/gis\\_book\\_abridged/files/ch34.pdf](https://www.geos.ed.ac.uk/~gisteac/gis_book_abridged/files/ch34.pdf). Acesso em: 29 dez. 2025.

MURDOCH D.; ADLER D.; **rgl: 3D Visualization Using OpenGL**. R package version 1.3.25, <https://github.com/dmurdoch/rgl>, 2025.

NELSON, R. **How did we get here? An early history of forestry lidar**. Can. J. Remote Sensing, Vol. 39, S1, pp. S1S12, 2013. DOI: <https://doi.org/10.5589/m13-011>.

NISHIWAKI, A. A. M.; MOURA, M. S. B. de; GALVÍNCIO, J. D.; OLIVEIRA, C. P. de; SILVA, E. A.; LIMA, J. R. de S.; ANTONINO, A. C. D.; SOUZA, E. S. de; MENEZES, R. S. C.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; DOMINGUES, T. F. **Uso do LiDAR na estimativa de atributos florestais: uma revisão**. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 16, n. 1, p. 505–527, 2023. DOI: 10.26848/rbgf.v16.1.p505-527.

POINT CLOUD LIBRARY (PCL). **StatisticalOutlierRemoval background**. [S. l.]: PCL, [202-?]. Disponível em: [https://pointclouds.org/documentation/tutorials/statistical\\_outlier.html](https://pointclouds.org/documentation/tutorials/statistical_outlier.html). Acesso em: 12 dez. 2025.

RAPIDLASSO GMBH. **LAX file creation: Spatial indexing of LiDAR data**. [S.l.]: Rapidlasso, 2025. Disponível em: <https://rapidlasso.de/lasindex-spatial-indexing-of-lidar-data/>. Acesso em: 9 dez. 2025.

ROBIN, Jean-Romain. **lidR: Airborne LiDAR Data Manipulation and Visualization for Forestry Applications**. Versão [4.2.2]. [S.l.]: Comprehensive R Archive Network (CRAN), [2025]. Manual de Referência. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/lidR/lidR.pdf>. Acesso em: 12 dez. 2025.

ROUSSEL J.; DE BOISSIEU F.; **rlas: Read and Write 'las' and 'laz' Binary File Formats Used for Remote Sensing Data**. doi:10.32614/CRAN.package.rlas, R package version 1.8.2, 2025a.

ROUSSEL J.; AUTY D.; **Airborne LiDAR Data Manipulation and Visualization for Forestry Applications**. R package version 4.2.0, 2025b.

SILVA, Iasmin L. G.; SILVA, Carlos A.; KLAUBERG, Carine; MELLO, José M. M. **Deteção de árvores individuais em área florestal mista de coníferas por meio de dados LiDAR aerotransportando**. Advances in Forestry Science, p 107-112, 2017.

SCHLEICH, Julian et al. **Realistic Benchmarks for Point Cloud Data Management Systems**. Advances in 3D Geoinformation (pp.1-30), 2016.

VEGA, C.; HAMROUNI A. ; MOKHTARI S.; MOREL J. ; BOCK J.; RENAUD J.-P. ; BOUVIER M.; DURRIEU S.. **PTrees: A point-based approach to forest tree extraction from lidar data**. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation Vol. 33, pág. 98-108, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.05.001>.

WEHR, A., & LOHR, U. **Airborne laser scanning—An introduction and overview**. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 54, issues 2-3, pág. 68-82, 1999.

ZHANG, Keqi; CHEN, Shisheng;. **A Progressive Morphological Filter for Removing Nonground Measurements From Airborne LIDAR Data**. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, v. 41, n. 4, p. 872–882, 2003.

ZHANG, Wuming; QI, Jianbo; WAN, Peng; WANG, Hongtao; XIE, Donghui; WANG, Xiaoyan; YAN, Guangjian. **An Easy-to-Use Airborne LiDAR Data Filtering Method Based on Cloth Simulation.** Remote Sensing, v. 8, n. 6, p. 501, 2016.