



República Federativa do Brasil  
Ministério da Economia  
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

(21) BR 102020017264-6 A2



(22) Data do Depósito: 24/08/2020

(43) Data da Publicação Nacional: 08/03/2022

(54) **Título:** PROCESSO DE MARCA D'ÁGUA ROBUSTA PARA NUVENS DE PONTOS 3D ATRAVÉS DA TRANSFORMADA DE FOURIER SOBRE GRAFOS DE

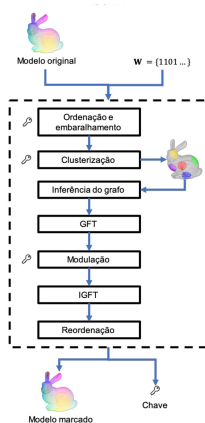
(51) **Int. Cl.:** H04N 1/32; G06T 17/00; G06T 1/00; G06F 21/16.

(52) **CPC:** H04N 1/3216; G06T 17/00; G06T 1/0021; G06F 21/16.

(71) **Depositante(es):** UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO.

(72) **Inventor(es):** FELIPE ALBERTO BARBOSA SIMÃO FERREIRA; JULIANO BANDEIRA LIMA.

(57) **Resumo:** PROCESSO DE MARCA D'ÁGUA ROBUSTA PARA NUVENS DE PONTOS 3D ATRAVÉS DA TRANSFORMADA DE FOURIER SOBRE GRAFOS. A presente invenção introduz um processo de inserção e extração de marca d'água para nuvens de pontos 3D. Diversas aplicações modernas fazem uso da reconstrução e/ou modelagem 3D de objetos complexos, como monumentos históricos e centros urbanos inteiros. Uma das formas mais comuns de representação desses modelos 3D é através de uma nuvem de pontos, que é um conjunto denso de pontos organizados de forma irregular em um sistema de coordenadas tridimensional. Em geral, o processo de aquisição desses modelos possui um custo elevado devido ao tamanho dos objetos e do equipamento necessário. Esse fator, motivou a invenção de uma técnica de marca d'água que garanta a proteção dos direitos autorais e que permita detectar cópias ilegais. O processo de marca d'água desta invenção se baseia na transformada de Fourier sobre grafos, que é uma ferramenta para processamento de sinais apresentada recentemente e que vem sendo aplicada em sinais dispostos sobre um domínio irregular arbitrário. Diferentemente de outros trabalhos relacionados à marca d'água para nuvens de pontos, em vez de inserir a sequência de bits nas coordenadas (...).



## **PROCESSO DE MARCA D'ÁGUA ROBUSTA PARA NUVENS DE PONTOS 3D ATRAVÉS DA TRANSFORMADA DE FOURIER SOBRE GRAFOS**

### **CAMPO DA INVENÇÃO**

[1] A presente invenção trata-se de um processo de marca d'água robusta para nuvens de pontos tridimensionais (3D) através da transformada de Fourier sobre grafos (GFT, do inglês *Graph Fourier Transform*). Devido ao alto custo para aquisição de modelos 3D em nuvens de pontos existe a necessidade de garantir a segurança e autenticidade desses objetos, no que diz respeito a proteção de direitos autorais e detecção de cópias ilegais, por exemplo. Esta invenção propicia a inserção de uma marca d'água, em objetos construídos por nuvens de pontos 3D, imperceptível a olho nu e robusta a ataques, intencionais ou não. O método também compreende um processo para a extração da marca d'água.

### **ANTECEDENTES DA INVENÇÃO**

[2] Modelos tridimensionais são vastamente utilizados em diversas aplicações (Alface e Macq, 2007; Koz, Triantafyllidis e Alatan, 2008) como imagens médicas (Klyuzhin e Sossi, 2017), varredura terrestre (Cai et al., 2019; Fedorenko, Gabdullin e Fedorenko, 2018), direção autônoma (Wang et al., 2017; Zeng et al., 2018), reconstrução em 3D de patrimônios culturais (Shao et al., 2018) e modelagem de cenas internas (Wang et al., 2018). Essas aplicações dependem da reconstrução e análise de um modelo 3D, como uma nuvem de pontos. Estes objetos podem ser adquiridos e modelados utilizando diferentes técnicas e equipamentos como fotogrametria, sensores LiDAR, sensoriamento remoto 3D via satélites e outros.

[3] Apesar das diversas possibilidades, a aquisição de uma nuvem de pontos 3D é normalmente realizada por um procedimento que possui um alto custo computacional e monetário, principalmente para modelos mais complexos. Isso motiva o desenvolvimento de métodos baseados em estratégias de ocultação de dados para garantir a autenticidade e a segurança com relação ao uso indevido e/ou não autorizado desses objetos.

[4] Neste cenário já é bem estabelecido o uso de técnicas de marca d'água para diversos tipos de mídia digital como imagem, áudio e vídeo (Huang et al., 2013; Tsai, 2016; Wang e Wang, 2005; Xiaoqing, 2015). Por outro lado, esquemas de marca d'água desenvolvidos especificamente para nuvens de pontos 3D ainda estão em um estágio inicial e possuem poucas propostas. Além disso, as técnicas de marca d'água convencionais (Koz, Triantafyllidis e Alatan, 2008) não são diretamente aplicáveis em nuvens de pontos (Agarwal e Prabhakaran, 2009).

[5] Na base de literatura de patentes brasileiras é possível encontrar documentos acerca de métodos para inserção e extração de marca d'água para diversos objetos digitais (por exemplo BR102018072097-0, BR112018012982-8, BR112018009757-8 e BR112015027089-1) mas não existem patentes de marca d'água para nuvem de pontos.

[6] Na literatura de patentes internacional, pode-se citar, por exemplo, o documento CN103824248B que propõe o uso da transformada *Surfacelet* para inserir os bits de uma sequência gerada de forma pseudoaleatória nos coeficientes de alta frequência. Esta patente trata de um método de marca d'água para modelos 3D em malha e não para nuvens de pontos. Diferentemente das nuvens de pontos, os modelos em malha já possuem informação de conectividade. Para a inserção da marca leva-se em consideração a transformada das superfícies formadas pela triangulação dos pontos.

[7] No documento CN 104281994A também é descrito um método de marca d'água para modelos 3D em malha. Este método leva em consideração a análise da curvatura da superfície do objeto para realizar a inserção da marca.

[8] Outras patentes de marca d'água para malhas 3D são descritas nos documentos CN103247017A, CN103198448A e US20160117792A1. O primeiro se baseia na conversão das coordenadas retangulares em coordenadas esféricas, o segundo se baseia na curvatura formada pela conexão entre os vértices em conjunto com um mapa caótico para geração da marca e o terceiro leva em consideração a estimativa da espessura local (*local thickness estimation*) para inserção da marca d'água.

[9] No documento de patente CN101178805 foi descrito um método de marca d'água cega para modelos 3D baseado em codificação de *octree*. Neste método a nuvem de pontos é inicialmente analisada com principal componente analysis (PCA) e em seguida é organizada em uma *octree*. Nós não vazios da *octree* são então selecionados para a inserção de uma marca d'água zero. Este tipo de marca d'água tem um objetivo diferente das marcas d'águas robustas, que é o proposto em nossa invenção.

[10] No documento de patente CN102222315 foi descrito uma técnica de marca d'água cega baseada em partições de autosimilaridade. A nuvem de pontos é organizada em uma *octree* de no máximo  $k$  pontos em cada partição. Os bits da marca d'água são inseridos no ângulo médio formado pelo vetor direção de cada bloco de pontos. Este trabalho também foi publicado na literatura acadêmica em (Qi, Xie e Zhang, 2010).

[11] No documento de patente CN108564518 é apresentado um de marca d'água para nuvens de pontos 3D em que cada ponto é classificado em dois grupos mutuamente exclusivos de acordo com sua curvatura média. Cada ponto,  $v_i = (x_i, y_i, z_i)$ , é convertido em coordenada esférica,

$q_i = (r_i, \theta_i, \varphi_i)$ , baseado no baricentro de um dos grupos. Então, a marca d'água é inserida na distância radial,  $r_i$ , dos pontos. Este trabalho também foi apresentado na literatura acadêmica em (Liu *et al.*, 2018).

[12] Na literatura acadêmica também existem outras propostas de marca d'água para nuvens de pontos 3D. Na maioria delas é proposto um método no domínio espacial em vez de no domínio de alguma transformada e, além disso, todas elas inserem os bits da marca d'água nas coordenadas dos pontos. Em 2004, Cotting *et al.* propuseram a construção de um grafo Riemaniano baseado na distância Euclidiana dos  $k$ -vizinhos mais próximos de cada ponto. A matriz Laplaciana é construída e a representação no domínio da frequência da geometria da nuvem de pontos pode ser obtida pela decomposição do sinal em uma combinação linear de seus autovetores. Os bits da marca d'água são inseridos nas baixas frequências. No processo de extração da marca, é incluído um passo de registro para inibir os efeitos de transformações afins.

[13] Ainda em 2004, Ohbuchi, Mukaiyama e Takahashi propuseram outro método no domínio da transformada. Inicialmente, é gerado um modelo em malhas 3D a partir da nuvem de pontos. Em seguida, a Análise Espectral de Malhas (Karni e Gotsman, 2000) é aplicada para calcular as componentes de baixa frequência, que então são modificadas para inserir os bits da marca d'água.

[14] Em 2006, Luo, Lu e Pan apresentaram um método que explora a alta correlação entre pontos vizinhos para fazer a incorporação da marca. Inicialmente, grupos de 8 vizinhos mais próximos são formados a partir pontos selecionados aleatoriamente. Então, a transformada do cosseno discreta inteira é calculada para cada grupo e os coeficientes de alta frequência são modulados para inserção de um bit por grupo.

[15] Em 2009, Agarwal e Prabhakaran apresentaram um esquema de marca d'água cego e robusto para nuvens de pontos 3D. O processo se baseia em encontrar uma estrutura em árvore dos pontos e sem seguida são definidos grupos de pontos com base nessa estrutura. Usando esses grupos, a marca pode ser inserida ou extraída em uma ordem específica dos pontos, globalmente (intragrupo) ou localmente (intergrupo). A sequência de bits é codificada e decodificada em cada grupo baseado em uma extensão do método *Quantization Index Modulation* (QIM) (Chen e Wornell, 2001).

[16] Em 2015, Xiaoqing apresentou um método de marca d'água em que os bits são inseridos modificando a média da distribuição de características normalizada do modelo de nuvem de pontos. As coordenadas Cartesianas,  $v_i = (x_i, y_i, z_i)$ , são convertidas em coordenadas esféricas,  $q_i = (r_i, \theta_i, \phi_i)$ . Em seguida, um conjunto de distâncias,  $r_i$ , ordenado de forma ascendente, é dividido em vários grupos de tamanho igual a quantidade de bits da marca d'água. Cada grupo é normalizado, e um bit é inserido de acordo com um processo de modulação baseado na média dos valores de  $r_i$  de cada grupo.

#### [17] Processamento de Sinais sobre Grafos

[18] Em vários cenários, dados multivariados definidos em um domínio de grafo são produzidos constantemente. Desde redes de sensores e dispositivos de Internet das coisas até redes sociais ou ecológicas, são exemplos de estruturas modeladas por um grafo em que alguma variável pode ser definida sobre ele. Neste contexto, nos últimos anos vem se desenvolvendo a área de processamento de sinais sobre grafos (GSP, do inglês *Graph Signal Processing*), que provê ferramentas que levam em conta a estrutura subjacente sobre qual um sinal pode estar definido (Sandryhaila e Moura, 2014a).

[19] Um grafo pode ser identificado como um par ordenado  $G = (V, \xi)$ , em que o conjunto  $V$  contém os vértices do grafo e o conjunto de arestas  $\xi$  é um subconjunto de  $V^2$ ; o número de vértices em um grafo é dado por  $|V| = N$ . Então, definimos um sinal  $s$  sobre um grafo  $G$  como uma função discreta que mapeia o conjunto de vértices do grafo para um conjunto escalar, normalmente formado por números complexos ou reais,

$$s: V \rightarrow \mathbb{C} \mid s(v_i) = s_i,$$

tal que  $s$  pode ser visto como um conjunto pertencente a  $\mathbb{C}^N$  indexado pelos vértices de  $G$ . Com os vértices  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_N\}$  claramente rotulados, não é ambíguo representar o sinal como um vetor coluna  $s = (s_0, s_1, \dots, s_{N-1})^T, s_i \in \mathbb{C}, i = 0, 1, \dots, N - 1$  (10, 37, 38).

[20] No ramo de GSP originado da teoria espectral de grafos, que se restringe a grafos não-direcionados, a matriz Laplaciana  $L = D - A$ , em que  $A$  é a matriz de adjacência e  $D$  é a matriz de graus (uma matriz diagonal com o grau  $d_i$  como sua  $i$ -ésima entrada), tem grande importância;  $L$  pode ser vista como um operador diferença atuando no sinal  $s$ , atualizando cada amostra com a diferença entre o valor em um vértice e de seu vizinho. Tal interpretação foi usada por (Shuman *et al.*, 2013) para propor uma definição para a transformada de Fourier sobre grafos (GFT, do inglês *Graph Fourier Transform*). Eles começaram pelo fato de que a transformada de Fourier de tempo contínuo consiste de uma decomposição em uma base de autofunções do operador Laplaciano (segunda derivada) (Shuman *et al.*, 2013; Shuman, Ricaud e Vandergheynst, 2012). A GFT de um sinal  $s$  foi definida como sendo sua expansão em termos dos autovetores da matriz Laplaciana (do grafo sobre o qual o sinal é definido). Como  $L$  é sempre real e simétrica, então é diagonalizável e pode ser escrita como  $L = UTU^{-1}$ , e o par de equações da GFT é dado por

$$\tilde{s} \triangleq U^{-1}s \quad (\text{análise})$$

$$s = U\tilde{s}, \quad (\text{síntese})$$

com  $U$  contendo os autovetores em suas colunas e  $T$  consistindo de uma matriz diagonal preenchida com os autovalores da matriz Laplaciana.

[21] Nesta invenção, nós tratamos os pontos de uma nuvem 3D como os vértices de um grafo  $G$  cujas arestas são inferidas com o uso de uma estratégia específica que será descrita mais adiante neste documento. Os atributos (como cor, por exemplo) dos pontos são tratados como um sinal  $s$  sobre  $G$ , para o qual a GFT pode ser aplicada. Deste ponto em diante, denotamos a aplicação da transformada e sua inversa como  $GFT(G, s)$  e  $IGFT(G, \tilde{s})$ , respectivamente.

### **OBJETIVO DA INVENÇÃO**

[22] O objetivo da invenção é inserir uma marca d'água formada por uma sequência de bits nos atributos dos pontos de uma nuvem 3D por meio de um processo bem estabelecido de passos e com base na transformada de Fourier sobre grafos propiciando proteção de direitos autorais e autenticidade de modelos 3D formados por uma nuvem de pontos.

### **SUMÁRIO DA INVENÇÃO**

[23] Esta invenção propicia um esquema não-cego de marca d'água para nuvens de pontos 3D com base na transformada de Fourier sobre grafos. Conforme mencionado anteriormente, o processo de aquisição de modelos 3D complexos é, normalmente, custoso. O mapeamento tridimensional de forma precisa de um ambiente urbano inteiro (Toschi et al., 2017), por exemplo, pode necessitar de um veículo aéreo equipado com algum tipo de sensor a laser; recursos similares podem ser também necessários para a completa reconstrução em 3D de artefatos históricos

para posterior estudo (Menna et al., 2016). Esses são alguns possíveis casos em que seja desejado garantir direitos de proteção autoral e detectar cópias ou distribuições ilegais. Neste contexto, o uso de um detector de marca d'água informado (não-cego) melhora substancialmente o desempenho do detector (Cox et al., 2007).

[24] A presente invenção se baseia em inferir a informação de conectividade entre os pontos de uma nuvem 3D e representa-lo como um grafo; também é considerado um sinal sobre tal grafo, cujas amostras assumem valores numéricos correspondendo ao atributo associado a cada ponto da nuvem. Em seguida é calculada a GFT para representar o sinal no domínio espectral do grafo em que a marca será inserida.

[25] É importante notar que esta invenção também é inovativa no sentido de que a marca d'água é inserida nos atributos da nuvem de pontos, enquanto na maioria dos trabalhos anteriores a inserção é realizada nas coordenadas dos pontos. Mais especificamente, nós utilizamos os valores numéricos que correspondentes as cores associadas a cada ponto como um sinal sobre o grafo, que é esperado ser um sinal suave devido a similaridade das amostras (Ortega et al., 2018; Ribeiro e Lima, 2018). Consequentemente, o método proposto é robusto contra qualquer distorção espacial que possa ser causada por um ataque (intencional ou não). Além disso, nossos experimentos indicam que o método é robusto contra vários outros ataques como reordenação, transformações afins (rotação, translação, escalonamento e cisalhamento), adição de ruído e recorte.

[26] São objetos da presente invenção um processo para inserção e outro para extração da marca d'água. Em ambos, um grafo com base na posição dos pontos é inferido e são criados agrupamentos de pontos. Para cada agrupamento é calculada a GFT utilizando a informação de cor dos

pontos como sinal sobre o grafo e então a marca pode ser inserida ou extraída de acordo com o processo a ser executado.

[27] Estes objetos da presente invenção serão mais bem compreendidos e valorizados a partir da descrição detalhada da invenção e de seus exemplos que têm como objetivo apenas ilustrar um dos inúmeros meios de se realizar a invenção, não limitando, portanto, seu escopo.

### **BREVE DESCRIÇÃO DAS FIGURAS**

[28] A Figura 1 apresenta o fluxograma da etapa de inserção.

[29] A Figura 2 apresenta o fluxograma da etapa de extração.

[30] A Figura 3 apresenta os modelos de nuvem de pontos 3D utilizados nos testes para avaliação de desempenho da invenção. Os modelos são (a) *Bunny* (35.947 pontos), (b) *Guy* (66.860 pontos), (c) *Vase* (147.420 pontos) e (d) *Lion Statue* (536.240 pontos).

[31] A Figura 4 apresenta a imagem binária utilizada como marca d'água nos testes da invenção.

[32] A Figura 5 apresenta o modelo 3D *Vase* sob ataques de transformações afins (linha superior) e respectivas marcas extraídas (linha inferior). As transformações afins aplicadas foram (a) rotação, (b) escalonamento e (c) cisalhamento, e, respectivamente, as marcas extraídas obtiveram PSNR / BER de (d) PSNR: inf / BER: 0, (e) PSNR: inf / BER: 0 e (f) PSNR: inf / BER: 0.

[33] A Figura 6 apresenta imagens de marca d'água extraídas (de tamanho 32 x 32) após modelo 3D ser atacado com adição de ruído sob diferentes amplitudes. As marcas d'água foram extraídas do modelo 3D *Bunny* após adição de ruído de (a) 0% (PSNR = inf), (b) 2% (PSNR = 30,10 dB), (c) 5% (PSNR = 19,31 dB), (d) 10% (PSNR = 18,34 dB), (e) 20%

(PSNR = 13,57 dB), (f) 30% (PSNR = 8,96 dB), (g) 40% (PSNR = 7,32 dB) e (h) 50% (PSNR = 6,62 dB).

[34] A Figura 7 apresenta imagens de marca d'água extraídas (de tamanho 64 x 64) após modelo 3D ser atacado com adição de ruído sob diferentes amplitudes. As marcas d'água foram extraídas do modelo 3D *Guy* após adição de ruído de (a) 0% (PSNR = inf), (b) 2% (PSNR = 30,10 dB), (c) 5% (PSNR = 18,64 dB), (d) 10% (PSNR = 17,80 dB), (e) 20% (PSNR = 11,45 dB), (f) 30% (PSNR = 8,33 dB), (g) 40% (PSNR = 6,75 dB) e (h) 50% (PSNR = 5,81 dB)

[35] A Figura 8 apresenta imagens de marca d'água extraídas (de tamanho 128 x 128) após modelo 3D ser atacado com adição de ruído sob diferentes amplitudes. As marcas d'água foram extraídas do modelo 3D *Lion Statue* após adição de ruído de (a) 0% (PSNR = inf), (b) 2% (PSNR = 32,14 dB), (c) 5% (PSNR = 19,81 dB), (d) 10% (PSNR = 19,33 dB), (e) 20% (PSNR = 14,11 dB), (f) 30% (PSNR = 9,20 dB), (g) 40% (PSNR = 7,03 dB) e (h) 50% (PSNR = 5,93 dB)

[36] A Figura 9 apresenta marcas d'água de tamanho 64 x 64 extraídas após o modelo 3D ser atacado sob diferentes condições de percentual de recorte. Os modelos foram atacados com recorte de (a) 5%, (c) 15%, (e) 30%, (g) 40% e (i) 50%. Respectivamente, as marcas extraídas obtiveram PSNR de (b) inf, (d) inf, (f) 12,12 dB, (h) 7,83 dB e (j) 5,90 dB.

[37] A Figura 10 apresenta (a) um modelo *Vase* marcado após sofrer ataque de adição de ruído com 50% de amplitude e (b) a marca d'água extraída sob estas condições.

[38] A Figura 11 apresenta os modelos 3D originais (a) *Bunny*, (c) *Guy*, (e) *Vase* e (g) *Lion Statue*, e, respectivamente, versões marcadas em (b), (d), (f) e (h).

## **BREVE DESCRIÇÃO DAS TABELAS**

[39] A Tabela 1 apresenta as configurações dos parâmetros que foram usados nos testes para cada modelo de nuvem de pontos considerado. O símbolo “x” em algumas células da tabela indica que tal configuração foi usada em testes para o respectivo modelo.

[40] A Tabela 2 apresenta resultados de BER para os testes de robustez contra ataques de adição de ruído considerando a extração de uma marca de 1.024 bits.

[41] A Tabela 3 apresenta resultados de BER para os testes de robustez contra ataques de adição de ruído considerando a extração de uma marca de 4.096 bits.

[42] A Tabela 4 apresenta resultados de BER para os testes de robustez contra ataques de adição de ruído considerando a extração de uma marca de 16.384 bits.

[43] A Tabela 5 apresenta resultados de BER para os testes de robustez contra ataques de recorte considerando a extração de uma marca de 1.024 bits.

[44] A Tabela 6 apresenta resultados de BER para os testes de robustez contra ataques de recorte considerando a extração de uma marca de 4.096 bits.

[45] A Tabela 7 apresenta resultados de BER para os testes de robustez contra ataques de recorte considerando a extração de uma marca de 16.384 bits.

[46] A Tabela 8 apresenta resultados de imperceptibilidade em termos de PSNR e RMSE.

### **DESCRIÇÃO DETALHADA DA INVENÇÃO**

[47] Inserção da marca d'água

[48] Para realizar a inserção da marca d'água, “pequenos” grupos de pontos são considerados e uma réplica da marca é inserida em cada um.

Isso evita a necessidade de calcular a GFT para um número grande de amostras, o que teria um alto custo computacional. Ainda, a replicação da marca em grupos de pontos da nuvem aumenta a robustez do método contra alguns ataques, como o de recorte. Os mesmos grupos gerados na etapa de inserção devem ser utilizados na etapa de extração.

[49] O processo de inserção é dividido nos seguintes passos: (1) ordenar e sem seguida embaralhar os pontos (isto é importante contra ataques de reordenação e transformações afins); (2) criar grupos de pontos (são realizados dois níveis de agrupamento, cujos detalhes são descritos mais a frente neste mesmo documento); (3) para cada grupo de segundo nível, um grafo é inferido levando em consideração a distância entre cada par de pontos (as arestas obtidas pela inferência do grafo são importantes para o cálculo da GFT); (4) a GFT é calculada para cada grafo usando os valores numéricos das cores dos respectivos pontos como sinal sobre o grafo e os bits da marca d'água são inseridos nos coeficientes da GFT; (5) a transformada inversa é calculada e os pontos são reordenados de acordo com a ordenação original.

[50] Sequências pseudoaleatórias são usadas por todo processo, então a chave secreta para a correta extração da marca d'água corresponde a semente utilizada para gerar tais sequências. A Figura 1 apresenta o fluxograma da etapa de inserção. O método recebe uma nuvem de pontos com informação de cor e a marca d'água como uma sequência de bits  $W$ , e retorna a nuvem de pontos marcada e uma chave. Na Figura 1, o símbolo de chave indica os passos em que sequências pseudoaleatórias são geradas; cada região colorida do modelo 3D como saída do passo de agrupamento indica um grupo de primeiro nível diferente. Neste caso, foram utilizados cinco grupos, mas esta quantidade pode ser um parâmetro definido pelo usuário. A seguir são apresentados os detalhes de cada passo.

[51] Ordenação e embaralhamento

[52] No primeiro passo, é utilizado um determinado critério para ordenar o conjunto de pontos. Este passo é importante para evitar ou diminuir o impacto de ataques de reordenação. Este ataque é possível pois, os pontos são organizados em um arquivo na forma de uma lista de coordenadas 3D e informações de atributo. Se o procedimento de marca d'água depende da ordem em que os pontos estão organizados no arquivo, um atacante poderia simplesmente modificar esta ordem e a marca seria perdida. Note que mudanças na ordem não afetam a aparência visual da nuvem de pontos, já que as coordenadas dos pontos em si e seus atributos são preservados. Então, para prevenir este tipo de ataque, é proposto primeiramente ordenar a lista de pontos pela norma- $L^2$  das coordenadas espaciais ponderadas pelo índice de suas posições. Para ser mais claro, seja  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_N\}$  um conjunto de  $N$  pontos e  $p_i = \{x_i, y_i, z_i\}$  indica as três coordenadas espaciais do  $i$ -ésimo ponto. Então, a norma- $L^2$  de  $p_i$  é

$$|p_i| = \sqrt{x_i^2 + 2y_i^2 + 3z_i^2}.$$

[53] Após o cálculo das normas- $L^2$  de cada ponto, os pontos são ordenados em ordem decrescente com base no valor de sua norma- $L^2$ . Em seguida, são embaralhados por um gerador de números pseudoaleatórios. A lista de pontos é embaralhada para evitar que a ordem de inserção dos bits da marca d'água seja facilmente descoberta. Alguns detalhes importantes com relação a este passo são: (1) a chave,  $k$ , do embaralhamento deve ser armazenada para seu uso na etapa de extração e (2) a ordem original dos pontos também deve ser armazenada para que seja possível reverter-la ao fim da etapa de inserção.

[54] Agrupamento

[55] Os bits da marca d'água não são inseridos em todos os pontos da nuvem. Em vez disso, grupos de pontos são usados e a marca é replicada em cada um deles. Isto reduz a capacidade de inserção do método, mas, por outro lado, o custo computacional para calcular a GFT é também reduzido. Outra vantagem é que ao inserir múltiplas cópias da mesma marca d'água em diferentes grupos de pontos a torna mais robusta contra ataques como o de recorte e o de adição de ruído local.

[56] O agrupamento é realizado em duas fases. A nuvem de pontos  $P$  é inicialmente dividida em  $M$  grupos disjuntos  $C_i$ , cujos pontos são determinados por meio de um ponto “semente” a partir do qual o respectivo grupo “se expande”. O número de pontos que um grupo pode conter é denotado por  $Q$ . Primeiramente,  $M$  pontos são escolhidos de forma pseudoaleatória e cada um é determinado como a “semente” de um grupo distinto. Depois que as “sementes” são determinadas, dá-se início a um processo iterativo: a cada iteração, para cada ponto “semente”, um novo ponto mais próximo em termos da distância Euclidiana é adicionado ao grupo correspondente. Apenas pontos que ainda não foram adicionados a um grupo (incluindo os pontos “sementes”) podem ser selecionados. Este procedimento é finalizado quando todos os grupos conterem um limite de  $Q$  pontos.

[57] Na segunda fase do agrupamento, cada grupo  $C_i$  é novamente dividido em  $M'$  subgrupos,  $c_{ij}$ , de  $Q'$  pontos, em que  $M' < M$ ,  $Q' < Q$  e  $c_{ij}$  é o  $j$ -ésimo subgrupo do grupo  $C_i$ . Se  $Q' \nmid Q$ , algum subgrupo terá menos que  $Q'$  pontos. O processo de agrupamento é o mesmo do anterior, com a limitação de que os pontos de cada subgrupo  $c_{ij}$  devem pertencer ao grupo  $C_i$ . É importante enfatizar que cada grupo  $C_i$  irá receber uma réplica da marca d'água que será “espalhada” pelos seus respectivos subgrupos (mais detalhes são apresentados a seguir); nós escolhemos utilizar dois

níveis de agrupamento com o propósito de facilitar a produção de subgrupos espacialmente adjacentes.

[58] Inferência do grafo

[59] Para realizar o cálculo da GFT é necessário inferir conexões entre pares de pontos da nuvem. Em outras palavras, é preciso inferir a topologia do grafo (arestas) usando a informação provida pela nuvem de pontos: coordenadas dos pontos e/ou atributos. Para cada subgrupo, inferimos um grafo  $G = (V, \xi)$  adicionando uma aresta entre cada ponto (vértice) e seus  $k$ -vizinhos mais próximos em termos da distância Euclidiana. O peso da aresta entre dois pontos  $p_i$  e  $p_j$  é dado por

$$\text{peso}(i, j) = e^{\frac{-\text{dist}(p_i, p_j)}{\sigma^2}},$$

em que  $\text{dist}(p_i, p_j)$  é a distância Euclidiana quadrática,

$$\text{dist}(p_i, p_j) = (x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2,$$

e

$$\sigma = \frac{\sum_{(i,j) \in \xi} \text{dist}(p_i, p_j)}{|\xi|},$$

em que  $|\xi|$  é o número de arestas do grafo  $G$ .

[60] Modulação

[61] Os bits da marca d'água são inseridos ao modular a amplitude dos coeficientes da GFT. Cada grafo  $G$  inferido de um subgrupo possui no máximo  $Q'$  vértices dispostos em posições identificadas pelas coordenadas  $(x, y, z)$  e para o qual uma informação de cor  $(r, g, b)$  no espaço de cores RGB é atribuída. Podemos então mapear o último em três sinais distintos  $s_r$ ,  $s_g$  e  $s_b$  sobre  $G$ , correspondendo aos canais de cor vermelho, verde e azul, respectivamente. Isso nos permite calcular as três seguintes GFTs:

$$\mathbf{S}_r = \text{GFT}(G, \mathbf{s}_r), \quad \mathbf{S}_g = \text{GFT}(G, \mathbf{s}_g) \quad \text{e} \quad \mathbf{S}_b = \text{GFT}(G, \mathbf{s}_b).$$

Por questões de segurança e robustez, os bits  $w_i \in \{0,1\}, i = 1,2, \dots, n$ , da marca d'água  $\mathbf{W} = (w_1, w_2, \dots, w_n)$  são repetidos de acordo com uma taxa  $t$ , produzindo o vetor

$$\mathbf{W}' = \left( \overbrace{w_1, w_1, \dots, w_1}^{t \text{ vezes}}, w_2, w_2, \dots, w_2, \dots, w_n, w_n, \dots, w_n \right).$$

[62] A repetição de cada bit da marca d'água a torna mais robusta contra ruídos ao calcular o bit médio no passo de demodulação da etapa de extração. Ainda, antes da modulação, o vetor  $\mathbf{W}'$  é mapeado em um vetor  $\widetilde{\mathbf{W}} = (\widetilde{w}_1, \widetilde{w}_2, \dots, \widetilde{w}_{nc})$  cujas componentes

$$\widetilde{w}_i = \begin{cases} -1, & w_i = 0 \\ 1, & w_i = 1 \end{cases}$$

são inseridas em cada grupo  $C_i, 1 \leq i \leq M$ . Então, considerando um grupo  $C_i$  dividido em  $M'$  grafos  $G_{ij}, 1 \leq j \leq M'$ , com  $Q'$  vértices, a seguinte condição deve ser mantida:

$$3M'Q' \geq nt.$$

[63] Em seguida, o vetor  $\widetilde{\mathbf{W}}$  é dividido em  $M'$  segmentos; as componentes de tais segmentos são inseridas nos  $3Q'$  coeficientes das três GFTs (com relação a  $\mathbf{S}_r, \mathbf{S}_g$  e  $\mathbf{S}_b$ ) de comprimento  $Q'$  de cada grafo  $G_{ij} \in C_i$ . Então, o esquema proposto nesta invenção pode inserir até  $\frac{3M'Q'}{t}$  bits em uma nuvem de pontos  $P$ .

[64] Por motivos de simplificação, considere a modulação dos coeficientes da GFT de um grafo  $G$  qualquer, pertencente a um grupo  $C$ , pelo  $j$ -ésimo segmento de  $\widetilde{\mathbf{W}}$ . Os coeficientes  $\mathbf{S}_r$  são modulados conforme

$$\widehat{\mathbf{S}}_r = \mathbf{S}_r + \widetilde{\mathbf{W}}_r^{(j)} \alpha \mathbf{X},$$

em que

$$\widetilde{\mathbf{W}}_r^{(j)} = \{\widetilde{w}_l, j+1 \leq l \leq j+Q'\}$$

e  $X$  é uma sequência pseudoaleatória formada por 1's e  $-1$ 's. A amplitude da modulação é controlada por  $\alpha = \theta\beta$ , em que  $\beta$  é um parâmetro definido pelo usuário e

$$\theta = \max(\min(\mathbf{R}) + \max(\mathbf{R}), \min(\mathbf{G}) + \max(\mathbf{G}), \min(\mathbf{B}) + \max(\mathbf{B})),$$

em que  $\mathbf{R}$ ,  $\mathbf{G}$  e  $\mathbf{B}$  são vetores com as componentes vermelho, verde e azul de cada ponto de toda a nuvem. Em geral, valores mais altos de  $\beta$  aumenta a robustez da marca d'água ao custo de uma maior degradação da nuvem de pontos marcada. Analogamente, os coeficientes  $S_g$  e  $S_b$  são modulados por

$$\hat{S}_g = S_g + \widetilde{W}_g^{(j)} \alpha X,$$

e

$$\hat{S}_b = S_b + \widetilde{W}_b^{(j)} \alpha X,$$

em que

$$\widetilde{W}_g^{(j)} = \{\widetilde{W}_l, j + Q' + 1 \leq l \leq j + 2Q'\}$$

e

$$\widetilde{W}_b^{(j)} = \{\widetilde{W}_l, j + 2Q' + 1 \leq l \leq j + 3Q'\}.$$

[65] Após a modulação dos coeficientes é calculada a IGFT, os novos valores de cor são atribuídos aos respectivos pontos da nuvem, a ordenação dos pontos é reorganizada de acordo com a original.

[66] Tendo todo o processo de inserção da marca d'água descrito é importante mencionar que a capacidade máxima de inserção da invenção proposta é de  $\frac{3N}{Mt}$ , em que  $N$  é a quantidade de pontos do modelo 3D,  $M$  é a quantidade de grupos formados e  $c$  é a taxa de replicação de bit.

[67] Extração da marca d'água

[68] Na Figura 2 é apresentado o fluxograma da etapa de extração da marca d'água. O método recebe como entradas o modelo 3D original, o modelo marcado e a chave utilizada na etapa de inserção; uma sequência de bits formado por réplicas da sequência de bits original é retornada. A

etapa de extração é similar a etapa de inserção no que diz respeito aos passos de ordenação e embaralhamento, agrupamento e inferência do grafo. Tais passos devem produzir os mesmos resultados daqueles obtidos na etapa de inserção para permitir a correta extração dos bits da marca d'água.

[69] No passo de ordenação e embaralhamento, a nuvem de pontos original é ordenada, embaralhada e em seguida a ordem resultante é aplicada a nuvem de pontos marcada. Esse passo soluciona possíveis problemas ocasionados por transformações afins. No passo de agrupamento, para a formação dos grupos deve ser levado em consideração a posição espacial dos pontos do modelo original. Os índices dos pontos pertencentes a cada grupo são usados para compor os grupos da nuvem marcada. Similarmente, no passo de inferência do grafo, os grafos são inferidos com base na nuvem de pontos original e a informação de conectividade é passada para o modelo marcado baseando-se também nos índices dos pontos. Lembre-se que devido ao passo de ordenação e embaralhamento, ambos modelos estão igualmente ordenados. Desta forma, o ponto no índice 1 do modelo original corresponde ao ponto no índice 1 do modelo marcado, e assim sucessivamente. Adicionalmente, a etapa de extração executa dois novos passos: reconstrução e validação de ordem. Esses passos são importantes para aumentar a robustez contra ataques de remoção de pontos e reordenação, respectivamente. O passo de demodulação corresponde ao inverso do processo de modulação executado na etapa de inserção; este passo é responsável pela extração de fato dos bits da marca d'água. Mais detalhes são apresentados a seguir.

[70] Reconstrução da nuvem de pontos

[71] Alguns ataques como o de recorte pode excluir alguns pontos da nuvem para destruir traços da marca d'água. Porém, já que o método

proposto também recebe como entrada a nuvem original, então é possível recuperar os pontos faltantes na nuvem marcada. Se o número de pontos da nuvem original é maior que o número de pontos da nuvem marcada, nós realizamos um procedimento simples para reconstruí-la: para cada ponto da nuvem original é verificado se ele está presente ou não na nuvem marcada, considerando a distância Euclidiana; se um determinado ponto não estiver presente, insira o ponto da nuvem original (incluindo seus atributos) na nuvem marcada.

[72] Validação de ordem

[73] Esse passo é necessário para mitigar o ataque de reordenação. Para cada ponto da nuvem original, o ponto mais próximo na nuvem marcada, considerando a distância Euclidiana, é procurado. Se os índices de cada dupla de pontos não forem o mesmo, isso significa que a ordenação do objeto marcado foi modificada e é necessário reposicionar o ponto corretamente. Ao fim deste procedimento, o índice de cada ponto do modelo original e seu respectivo ponto no modelo marcado será o mesmo.

[74] Demodulação

[75] Cada grupo  $C_i, 1 \leq i \leq M$ , possui componentes de  $\widetilde{W}$  inseridos nos atributos (cor) dos grafos  $G_{ij}, 1 \leq j \leq M'$  correspondentes. Seja  $\hat{S}$  e  $S$  os coeficientes da GFT do grafo  $G_{ij}$  marcado e do original, respectivamente, e considere o canal de cor vermelho como sinal sobre o grafo. O símbolo  $\hat{w}_j \in \{-1, 1\}$  é calculado por

$$\hat{w}_j = \text{sin} \left( \sum_{i=jt}^{(j+1)t-1} (\hat{S}_i - S_i) X_i \right).$$

[76] Note que

$$(\hat{S}_i - S_i) X_i = (\tilde{w}_i \alpha X_i) X_i = \tilde{w}_i \alpha X_i^2,$$

$\alpha > 0$  e  $X_i \in \{-1, 1\}$ , isto é,  $X_i^2 = 1$ . Logo, ao calcular o símbolo  $\hat{w}_j$ , estamos de fato calculando

$$\hat{w}_j = \text{sin} \left( \sum_{i=jt}^{(j+1)t-1} \tilde{w}_i \right).$$

[77] Então,

$$w_j = \begin{cases} 0, & \hat{w}_j = -1 \\ 1, & \hat{w}_j = 1 \end{cases}$$

é o bit  $w_j \in \{0, 1\}$  da marca d'água. Este processo deve ser realizado para cada canal de cor e grafo  $G_{ij} \in C_i$ , e as cadeias de bits extraídos devem ser concatenados para compor a marca d'água  $W$ . Esta rotina resultará em tantas cadeias de bits quanto for o número de grupos criados. Para resultar em uma única sequência, no final do passo de demodulação, todas as cadeias de bits devem ser unificadas em uma única. Para cada índice nas sequências, os bits são unificados na forma daquele que aparece em maior frequência nas cadeias.

[78] Realização de testes

[79] Para testar a invenção proposta executamos diversas simulações com o objetivo de avaliar seu grau de robustez contra ataques, imperceptibilidade e para realizar uma comparação com outras propostas já publicadas na literatura. Nas simulações utilizamos 4 modelos 3D diferentes; eles são apresentados na Figura 3. A marca d'água utilizada é apresentada na Figura 4 na forma de uma imagem binária bidimensional; esta imagem foi convertida em uma sequência de bits, linha por linha e da esquerda para a direita. Foram utilizadas três versões da marca com diferentes tamanhos: 32 x 32 (1.024 bits), 64 x 64 (4.096 bits) e 128 x 128 (16.384 bits).

[80] As simulações foram realizadas considerando a taxa de replicação  $t = 10$ , grafos com  $Q' = 320$  vértices e amplitude de modulação  $\beta \in \{0,01; 0,02\}$ . A Tabela 1 apresenta os parâmetros utilizados nas simulações para cada nuvem de pontos de acordo com o número de

agrupamentos, tamanho dos grupos e o tamanho da marca d'água. Com relação aos ataques, a adição de ruído foi implementada de acordo com

$$s_{\text{novo}} = s_{\text{antigo}} + a \times \phi \times \text{rand}(\cdot),$$

em que  $s_{\text{novo}}$  e  $s_{\text{antigo}}$  é uma componente do sinal depois e antes da adição do ruído, respectivamente,  $a \in [0,1]$  é a amplitude do ruído e  $\text{rand}(\cdot)$  é um número gerado de forma pseudoaleatória entre 0 e 1.

[81] A sequência de operações realizadas nas simulações foram as seguintes: (1) inserção da marca d'água; (2) quantização da cor (de 0 a 255); (3) ataque; (4) quantização da cor (de 0 a 255); (5) extração da marca d'água. Os passos **2** e **4** são importantes para simular o armazenamento dos modelos no formato de arquivo.

[82] Para avaliação de desempenho utilizamos as métricas de taxa de erro de bit (BER, do inglês *Bit Error Rate*) e a relação sinal-ruído de pico (PSNR, do inglês *Peak Signal-to-Noise Error*) nas marcas d'água extraídas para avaliação de robustez, isto é

$$\text{BER} = \frac{\text{bits incorretos}}{\text{total de bits}}$$

e

$$\text{PSNR} = 10 \log_{10} \left( \frac{255^2}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\bar{w}_i' - \bar{w}_i)^2} \right)$$

em que  $\bar{w}_i'$  é o inverso do bit extraído  $w_i'$  e  $\bar{w}_i$  é o inverso do bit da sequência original  $w_i$ . O PSNR é diretamente proporcional (quanto maior melhor) com o desempenho do método enquanto o BER é inversamente proporcional (quanto menor melhor).

[83] Para avaliação da imperceptibilidade, que é capacidade de inserir informação em um objeto alterando minimamente suas características visuais, utilizamos o PSNR e a raiz do erro quadrático médio (RMSE, do inglês *Root Mean Square Error*).

[84] Teste 1: robustez

[85] Com fins de avaliação da robustez da invenção proposta, analisamos três categorias de ataques: reordenação, alteração de valor, remoção de amostra. Ataques na categoria de alteração de valor são: transformações afins (rotação, escalonamento, cisalhamento e translação) e adição de ruído. Um exemplo de ataque que promove a remoção de amostrar é o ataque de recorte. Entre estes ataques, os únicos que afetam a correta extração da marca d'água são a adição de ruído e o recorte. Todos os outros ataques são completamente inutilizados pelo esquema proposto.

[86] Na Figura 5 são apresentados alguns exemplos de ataques de transformação afim e a respectiva marca extraída. O valor de PSNR e BER da marca d'água extraída foi de infinito e 0 (zero), respectivamente, para todos os casos.

[87] Com relação a adição de ruído, as Tabelas 2, 3 e 4 apresentam os resultados de BER para marcas de tamanho 1024, 4096 e 16384 bits, respectivamente, após a ataques de adição de ruído na informação de cor dos pontos da nuvem marcada. Como esperado, um fator de modulação de amplitude mais baixo ( $\beta = 0,01$ ) torna o método menos robusto em comparação com fatores mais altos ( $\beta = 0,02$ ). Note que para todos os casos apresentados nas tabelas, mesmo com amplitudes de ruído de até 5% ainda são obtidos valores de BER na ordem de  $10^{-3}$  e  $10^{-2}$  para a maioria dos casos.

[88] Nas Figuras 6, 7 e 8 são apresentados exemplos de marcas d'água extraídas de tamanho 1024, 4096 e 16384 bits, respectivamente, de acordo com a amplitude de ruído usado no ataque. Nas figuras também é indicado o valor de PSNR das marcas extraídas. Note que mesmo para altas amplitudes (30% ou 40%, por exemplo) ainda é possível identificar visualmente a marca d'água extraída. É importante mencionar

que de uma maneira geral, utilizar amplitudes de ruído acima de 2,5% como ataque é impraticável, pois a degradação do modelo provocada pelo ataque o torna inutilizável para a maioria das aplicações. Utilizamos amplitudes de até 50% apenas para deixar clara a robustez do método.

[89] Com relação ao ataque de recorte, as Tabelas 5, 6 e 7 apresentam os resultados de BER de forma similar aos apresentados para a adição de ruído. Note que na maioria dos casos, os piores resultados obtidos são da ordem  $10^{-2}$ . Apenas para percentuais de recorte elevados, de 30% em diante, os resultados são, em alguns casos, da ordem de  $10^{-1}$ . É importante mencionar que a qualidade da marca d'água extraída após um ataque de recorte está diretamente relacionada com a posição de cada agrupamento. Para um melhor resultado, é importante que os grupos estão bem distribuídos em torno do modelo 3D.

[90] Na Figura 9 é apresentado visualmente o ataque de recorte para diferentes percentuais de remoção de pontos e sua respectiva marca d'água extraída. Mesmo removendo uma quantidade elevada de pontos, como 30% e 40%, ainda é possível identificar visualmente a marca extraída.

[91] Também é importante mencionar que qualquer alteração no posicionamento dos pontos não afeta a capacidade de extração da marca d'água. Um exemplo é apresentado na Figura 10, em que um dos modelos 3D utilizados recebe um ataque de adição de ruído na posição dos pontos com amplitude de ruído de 50%. Como pode ser visualizado, o ataque é suficiente para degradar fortemente o modelo 3D, mas, ainda assim, a marca d'água é extraída sem apresentar erros.

[92] Teste 2: imperceptibilidade

[93] Também foi avaliado o quanto a inserção da marca d'água afeta visualmente os objetos marcados quando comparados aos modelos

originais. Na Figura 11 são apresentados, na coluna da esquerda, modelos originais e, na coluna da direita, o respectivo modelo marcado. Para cada modelo, foi realizada a inserção da marca com o maior tamanho possível que cada modelo suporta devido sua quantidade de pontos (dentre os três tamanhos avaliados). Para o modelo *Bunny* foi utilizada uma marca de 1.024 bits, para os modelos *Guy* e *Vase* foi utilizada uma marca de 4,096 bits e para o modelo *Lion Statue* foi utilizado uma marca de 16,384 bits. O fator de modulação da amplitude usado foi  $\beta = 0,02$ . Essa configuração para o teste foi utilizada de forma a produzir o maior impacto visual possível dentre as configurações recomendadas na Tabela 1. Ainda assim, comparando visualmente a nuvem de pontos marcada e a original, não é percebida diferenças e os modelos parecem idênticos. Para corroborar a avaliação visual, na Tabela 8 são apresentados os resultados de PSNR e RMSE dos modelos após inserção da marca com diferentes configurações. Note que o PSNR mais baixo obtido é de 34,93 dB e RMSE mais alto é de 4,57; estes são bons resultados em se tratando de medidas para informação de cor de uma maneira geral.

[94] Teste 3: análise comparativa

[95] Inicialmente, é importante deixar claro que encontramos uma série de restrições com relação à comparação do método proposto com outros já publicados na literatura; não conseguimos encontrar um trabalho que utilize configurações de simulação similar com a que utilizamos. Nenhuma das técnicas de marca d'água para nuvem de pontos já publicadas realiza a inserção de bits nos atributos dos modelos; em vez disso, a marca é inserida nas coordenadas espaciais dos pontos (Agarwal e Prabhakaran, 2009; Cotting et al., 2004; Liu et al., 2018; Luo, Lu e Pan, 2006; Ohbuchi, Mukaiyama e Takahashi, 2004; Qi, Dong-qing e Da-fang, 2010; Xiaoqing, 2015). Ainda, os modelos usados nos testes possuem poucos pontos quando comparados a modelos reais. O modelo com o maior número de

pontos usados nestes trabalhos é de aproximadamente 71.000 pontos (Cotting et al., 2004). Na presente invenção, realizamos testes com modelos de 35.947 até 536.240 pontos. O uso de modelos diferentes é outro fator que dificulta a comparação. Com relação ao tamanho da marca d'água, também não encontramos trabalhos que inseriam uma grande quantidade de bits, ou ao menos uma quantidade próxima da que foi testada na nossa invenção. A marca de maior tamanho utilizada nos trabalhos anteriores foi de 150 bits (Liu et al., 2018); na presente invenção foram testadas marcas de até 16.384 bits. Apesar de todas essas limitações, estabelecemos um critério que nos permitisse realizar uma comparação justa entre diferentes métodos de marca d'água: levamos em consideração a relação entre o tamanho da marca d'água e a quantidade de pontos da nuvem marcada.

[96] Por exemplo, em (Liu et al., 2018), os autores realizaram testes com ataques de recorte de 10%, 30% e 50%, e obtiveram valores de correlação iguais a 0,91, 0,85 e 0,65, respectivamente, para um modelo de 5.326 pontos. Nestes testes foi utilizada uma marca de 150 bits, o que representa 2,82% do número de pontos do modelo. Nossa invenção resulta em coeficientes de correlação iguais 1,00, 1,00 e 0,97 para 10%, 30% e 50% de recorte, respectivamente, em um modelo de 35.947 pontos. Nesses testes utilizamos uma marca de 1.024 bits, o que representa 2,85% do total de pontos. Em (Liu et al., 2018), a robustez contra ataques de rotação também é avaliada. Os testes foram realizados rotacionando o eixo X em 30°, 60° e 90°; foram obtidos valores de coeficiente de correlação de 1,00 a 0,95. Em nosso método, é possível obter uma correlação igual a 1,00 independente do ângulo de rotação aplicado. De fato, conforme apresentado anteriormente, qualquer transformação afim aplicada não afeta a marca d'água extraída.

[97] Em (Bors e Luo, 2013; Liu et al., 2018; Qi, Dong-qing e Da-fang, 2010), a robustez contra adição de ruído é avaliada utilizando amplitudes de ruído de até 0,5%, o que resulta em valores de BER iguais a 0,17, 0,34 e 0,15. Em (Ohbuchi, Mukaiyama e Takahashi, 2004), foram consideradas amplitudes de ruído de até 2,5% e o valor de BER mais baixo foi de aproximadamente 0,05. Em (Ohbuchi, Mukaiyama e Takahashi, 2004), foi usado nos testes um modelo de 8.485 pontos com uma marca d'água de 32 bits (0,38% do total de pontos). Em nosso trabalho, obtivemos BER igual a 0 (zero) para todos os modelos com amplitude de ruído até 0,5% e valores de BER na ordem de  $10^{-2}$  para amplitudes de 2,5% até 5%. Em (Xiaoqing, 2015), são usados modelos com 17.225 e 10.002 pontos e uma marca d'água de 64 bits (isto é, 0,37% e 0,64%, respectivamente, do total de pontos). Apesar do tamanho da marca d'água ser proporcionalmente menor do que o usado em nossa invenção, nós ainda conseguimos melhores resultados contra ataques de adição de ruído e recorte. Em (Xiaoqing, 2015), amplitudes de ruído acima de 1% promovem resultados de coeficientes de correlação entre 0,73 e 0,97. Por outro lado, nosso trabalho proporciona um coeficiente de correlação igual a 1,00 para até 1% de amplitude de ruído. Além disso, para até 5% de amplitude nossa invenção proporciona obter um coeficiente de correlação de 0,97 para todos os modelos testados.

[98] Com relação a ataques de recorte, o trabalho (Xiaoqing, 2015) obteve valores de coeficiente de correlação igual a 1,00 para 20,25% de recorte, de 0,88 até 0,97 para 45,28% de recorte, e de 0,41 até 0,75 para 72,28% de recorte. Nosso método obteve 1,00, 1,00 e 0,55 para 20,25%, 45,28% e 72,28% de recorte. Lembre-se que, enquanto a marca no nosso trabalho representa 2,82% do total de pontos, no trabalho (Xiaoqing, 2015), a marca representa um máximo de 0,64% do total de pontos. Assim como o nosso trabalho, o método apresentado em (Xiaoqing, 2015), afirma

ser possível recuperar completamente a marca após qualquer transformação afim e ataques de reordenamento.

[99] Neste documento de patente apresentamos resultados de imperceptibilidade em termos de PSNR e RMSE. Mais especificamente, com respeito a valores de intensidade de cor, os valores de PSNR dos objetos marcados estão entre 34,93 dB e 54,93 dB. Esses são resultados significativos para métodos de marca d'água próprios para imagens digitais de 8 bits por pixel, como pode ser verificado em (Asikuzzaman e Pickering, 2018; Bhowmik, Oakes e Abhayaratne, 2016; Lie, Lin e Cheng, 2006; Mekarsari et al., 2018; Su et al., 2014; Wang, Ni e Huang, 2012), por exemplo. Como os métodos de marca d'água já existentes para nuvem de pontos inserem os bits da marca nas coordenadas, não é possível realizar uma comparação direta com nosso método; a extensão dos valores (coordenadas vs intensidade de cor) é bastante diferente. Em nosso caso, usamos amostras com intensidade de cor entre 0 e 255 (8 bits por pixel). Quanto as coordenadas, valores entre 0 e 5, por exemplo são comuns. Para realizar uma compara relativamente justa, nós normalizamos o intervalo [0,255] de inteiros, obtendo valores no intervalo [0,1] de números reais; isto produziu valores de RMSE na ordem de  $10^{-3}$  para  $\beta = 0,01$  e  $10^{-2}$  para  $\beta = 0,02$ , para todos os modelos e tamanhos de marca d'água usados em nossos experimentos. Nos trabalhos em (Bors e Luo, 2013; Liu et al., 2018; Qi, Dong-qing e Da-fang, 2010), todos os valores de RMSE obtidos foram da ordem de  $10^{-3}$ .

[100] Apesar da comparação realizada não ser de maneira ideal, a análise realizada nos permite posicionar nossa abordagem em relação a outras técnicas já publicadas. De maneira geral, nosso método obtém um ganho considerável em respeito a robustez contra ataques quando comparado aos demais métodos. É possível recuperar a marca d'água com BER da

ordem de  $10^{-3}$  mesmo para amplitudes de ruído acima de 2,5%, por exemplo; isso não é alcançável em outros trabalhos. O mesmo ocorre quando avaliamos os ataques de recorte, em que um coeficiente de correlação de 0,97 é obtido mesmo quando 50% dos pontos são removidos; em (Liu et al., 2018), por exemplo, os autores obtiveram um resultado de 0,65 para o mesmo percentual de recorte. Com relação a imperceptibilidade, o método proposto apresenta uma leve perda em comparação com outros métodos. Os resultados de RMSE são obtidos com uma diferença da ordem de apenas  $10^{-1}$  em comparação aos outros trabalhos avaliados. Então, entendemos que nossa invenção apresenta uma boa relação custo-benefício entre robustez e imperceptibilidade. Já que o requisito de robustez é inversamente relacionado ao requisito de imperceptibilidade (Koz, Triantafyllidis e Alatan, 2008), é incomum obter ganhos em robustez sem afetar negativamente a imperceptibilidade.

### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- [101] Agarwal P. e Prabhakaran B. “Robust blind watermarking of point-sampled geometry”. IEEE Trans Inform Forensics Secur 4(1):36 (2009).
- [102] Alface P.R. e Macq B. “From 3D mesh data hiding to 3D shape blind and robust watermarking: a survey”. Transactions on data hiding and multimedia security II. Springer, pp 91–115 (2007).
- [103] Asikuzzaman M. e Pickering M.R. “An overview of digital video watermarking”. IEEE Trans Circuits Syst Video Technol 28(9):2131 (2018).
- [104] Bors A.G. e Luo M. “Optimized 3D watermarking for minimal surface distortion”. IEEE Trans Image Process 22(5):1822 (2013).
- [105] Bhowmik D., Oakes M. e Abhayaratne C. “Visual attention-based image watermarking”. IEEE Access 4:8002 (2016).

- [106] Cai Z., Chin T.J., Bustos A.P. e Schindler K. “Practical optimal registration of terrestrial LiDAR scan pairs”. *ISPRS J Photogramm Remote Sens* 147:118 (2019).
- [107] Chen B. e Wornell G.W. “Quantization index modulation: a class of provably good methods for digital watermarking and information embedding”. *IEEE Trans Inf Theory* 47(4):1423 (2001).
- [108] Chen S. et al. “Discrete signal processing on graphs: sampling theory”. *IEEE Trans Signal Process* 63(24):6510 (2015).
- [109] Cotting D., Weyrich T., Pauly M. e Gross M. “Robust watermarking of point-sampled geometry”. *Shape modeling applications, 2004. Proceedings. IEEE*, pp 233–242 (2004).
- [110] Cox I., Miller M., Bloom J., Fridrich J. e Kalker T. “Digital watermarking and steganography”. Morgan Kaufmann, San Mateo (2007).
- [111] Fedorenko R., Gabdullin A. e Fedorenko A. “Global UGV path planning on point cloud maps created by UAV”. *2018 3rd IEEE international conference on intelligent transportation engineering (ICITE). IEEE*, pp 253–258 (2018).
- [112] Huang C.C., Yang Y.W., Fan C.M. e Wang J.T. “A spherical coordinate based fragile watermarking scheme for 3D models”. *International conference on industrial, engineering and other applications of applied intelligent systems. Springer*, pp 566–571 (2013).
- [113] Karni Z. e Gotsman C. “Spectral compression of mesh geometry”. *Proceedings of the 27th annual conference on computer graphics and interactive techniques. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.*, pp 279–286 (2000).
- [114] Klyuzhin I.S. e Sossi V. “PET image reconstruction and deformable motion correction using unorganized point clouds”. *IEEE Trans Med Imaging* 36(6):1263 (2017).

- [115] Koz A., Triantafyllidis G.A. e Alatan A.A. “3D watermarking: techniques and directions”. Three-dimensional television. Springer, pp 427–470 (2008).
- [116] Lie W.N., Lin G.S. e Cheng S.L. “Dual protection of jpeg images based on informed embedding and two-stage watermark extraction techniques”. IEEE Trans Inform Forensics Secur 1(3):330 (2006).
- [117] Liu J., Yang Y., Ma D., Wang Y. e Pan Z. “A watermarking algorithm for 3D point cloud models using ring distribution”. Transactions on Edutainment XIV. Springer, pp 56–68 (2018).
- [118] Luo H., Lu Z.M. e Pan J.S. “A reversible data hiding scheme for 3D point cloud model”. 2006 IEEE international symposium on signal processing and information technology. IEEE, pp 863–867 (2006).
- [119] Mekarsari Y., Setiadi D., Sari C. e Rachmawanto E. “Non-blind rgb image watermarking technique using 2-level discrete wavelet transform and singular value decomposition”. International conference on information and communications technology (ICOIACT). IEEE, pp 623–627 (2018).
- [120] Menna F., Nocerino E., Remondino F., Dellepiane M., Callieri M. e Scopigno R. “3D digitization of an heritage masterpiece-a critical analysis on quality assessment”. The international Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 41:B5 (2016).
- [121] Ohbuchi R., Mukaiyama A. e Takahashi S. “Watermarking a 3D shape model defined as a point set”. 2004 international conference on cyberworlds. IEEE, pp 392–399 (2004).
- [122] Ortega A., Frossard P., Kovacevic J., Moura J.M.F. e Vandergheynst P. “Graph signal processing: overview, challenges, and applications”. Proc IEEE 106(5):808 (2018).
- [123] Qi K., Dong-qing X. e Da-fang Z. “A robust watermarking scheme for 3D point cloud models using self-similarity partition”. 2010 IEEE

international conference on wireless communications, networking and information security (WCNIS). IEEE, pp 287–291 (2010).

[124] Ribeiro G.B. e Lima J.B. “Graph signal processing in a nutshell”. *J Commun Inf Syst* 33(1):1 (2018).

[125] Sandryhaila A. e Moura J.M.F. “Big data analysis with signal process. on graphs: representation and process. of massive data sets with irreg”. *IEEE Signal Process Mag* 31(5):80 (2014).

[126] Sandryhaila A. e Moura J.M.F. “Discrete signal processing on graphs: frequency analysis”. *IEEETrans Signal Process* 62(12):3042 (2014).

[127] Shao J., Zhang W., Mellado N., Grussenmeyer P., Li R., Chen Y., Wan P., Zhang X. e Cai S. “Automated markerless registration of point clouds from TLS and structured light scanner for heritage documentation”. *J Cultural Heritage* (2018).

[128] Shuman D.I., Narang S.K., Frossard P., Ortega A. e Vandergheynst P. “The emerging field of signal processing on graphs: extending high-dimensional data analysis to networks and other irregular domains”. *IEEE Signal Process Mag* 30(3):83 (2013).

[129] Shuman D.I., Ricaud B. e Vandergheynst P. “A windowed graph Fourier transform”. *Statistical signal processing workshop (SSP), 2012 IEEE*. IEEE, pp 133–136 (2012).

[130] Su Q., Niu Y., Wang G., Jia S. e Yue J. “Color image blind watermarking scheme based on qr decomposition”. *Signal Process* 94:219 (2014).

[131] Toschi I., Ramos M., Nocerino E., Menna F., Remondino F., Moe K., Poli D., Legat K., Fassi F., et al. “Oblique photogrammetry supporting 3D urban reconstruction of complex scenarios”. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 42:519 (2017).

- [132] Tsai Y.Y. “An efficient 3D information hiding algorithm based on sampling concepts”. *Multimed Tools Appl* 75(13):7891 (2016).
- [133] Wang C., Ni J. e Huang J. “An informed watermarking scheme using hidden markov model in the wavelet domain”. *IEEE Trans Inform Forensics Secur* 7(3):853 (2012).
- [134] Wang C.M. e Wang P.C. “Data hiding approach for point-sampled geometry”. *IEICE Trans Commun* 88(1):190 (2005).
- [135] Wang H., Wang B., Liu B., Meng X. e Yang G. “Pedestrian recognition and tracking using 3D LiDAR for autonomous vehicle”. *Robot Auton Syst* 88:71 (2017).
- [136] Wang J., Wu Q., Remil O., Yi C., Guo Y. e Wei M. “Modeling indoor scenes with repetitions from 3D raw point data”. *Comput Aided Des* 94:1 (2018).
- [137] Xiaoqing F. “A watermarking for 3D point cloud model using distance normalization modulation”. 2015 4th international conference on computer science and network technology (ICCSNT), vol 1. IEEE, pp 1449–1452 (2015).
- [138] Zeng Y., Hu Y., Liu S., Ye J., Han Y., Li X. e Sun N. “Rt3d: real-time 3-d vehicle detection in lidar point cloud for autonomous driving”. *IEEE Robotics Automation Lett* 3(4):3434 (2018).

### **Reivindicações**

1. Processo para inserção de marca d'água em nuvens de pontos 3D caracterizado por compreender as seguintes etapas:

- a. Calcular a norma- $L^2$  ponderada de todos os pontos  $p_i = \{x_i, y_i, z_i\}$ ,  $1 \leq i \leq N$ , pertencentes a nuvem de pontos  $P$ , isto é,

$$|p_i| = \sqrt{x_i^2 + 2y_i^2 + 3z_i^2};$$

- b. Ordenar os pontos em ordem decrescente em função de sua respectiva norma- $L^2$ , calculada no passo anterior;
- c. Embaralhar os pontos usando uma chave  $\delta$  qualquer em um gerador pseudoaleatório;
- d. Selecionar de forma pseudoaleatória, utilizando a chave  $\delta$ ,  $M$  pontos, chamados de “sementes”;
- e. Para cada ponto “semente”, selecionar seus respectivos  $Q - 1$  pontos mais próximos, excluindo-se os pontos “sementes”. Todos os pontos selecionados devem ser distintos, formando assim  $M$  grupos disjuntos  $C_i$ ,  $1 \leq i \leq M$ ;
- f. Para cada grupo  $C_i$ , selecionar, de forma pseudoaleatória com a chave  $\delta$ ,  $M'$  pontos “sementes” pertencentes  $C_i$  e formar  $M'$  subgrupos,  $c_{ij}$ , de  $Q'$  pontos, em que  $M' < M$ ,  $Q' < Q$  e  $c_{ij}$  é o  $j$ -ésimo subgrupo do grupo  $C_i$ , utilizando o mesmo processo do passo anterior;
- g. Para cada subgrupo  $c_{ij}$ , inferir um grafo  $G = (V, \xi)$  adicionando uma aresta entre cada ponto (vértice) e seus  $k$ -vizinhos mais próximos em termos da distância Euclidiana. O peso da aresta entre dois pontos  $p_i$  e  $p_j$  é dado por

$$\text{peso}(i, j) = e^{\frac{-\text{dist}(p_i, p_j)}{\sigma^2}},$$

em que  $\text{dist}(p_i, p_j)$  é a distância Euclidiana quadrática,

$$\text{dist}(p_i, p_j) = (x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2,$$

e

$$\sigma = \frac{\sum_{(i,j) \in \xi} \text{dist}(p_i, p_j)}{|\xi|},$$

em que  $|\xi|$  é o número de arestas do grafo  $G$ ;

h. Para cada grafo  $G$  calcular as componentes de frequência da GFT para os três canais de cor da informação de cor contida em seus respectivos pontos. Desta forma, para cada grafo  $G$ , teremos três sinais distintos  $s_r$ ,  $s_g$  e  $s_b$ , correspondendo aos valores de cor dos canais R, G e B, respectivamente, permitindo calcular as três seguintes GFTs  $S_r = \text{GFT}(G, s_r)$ ,  $S_g = \text{GFT}(G, s_g)$  e  $S_b = \text{GFT}(G, s_b)$ ;

i. Repetir os bits  $w_i \in \{0,1\}$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , da marca d'água  $\mathbf{W} = (w_1, w_2, \dots, w_n)$  a uma taxa de repetição  $t$ , produzindo o vetor

$$\mathbf{W}' = \left( \overbrace{w_1, w_1, \dots, w_1}^{t \text{ vezes}}, w_2, w_2, \dots, w_2, \dots, w_n, w_n, \dots, w_n \right);$$

j. Mapear o vetor  $\mathbf{W}'$  em um vetor  $\tilde{\mathbf{W}} = (\tilde{w}_1, \tilde{w}_2, \dots, \tilde{w}_{nc})$  em que

$$\tilde{w}_i = \begin{cases} -1, & w_i = 0 \\ 1, & w_i = 1 \end{cases};$$

k. Dividir o vetor  $\tilde{\mathbf{W}}$  em  $M'$  segmentos de igual comprimento;

l. Inserir o  $j$ -ésimo segmento de  $\tilde{\mathbf{W}}$  nas componentes de frequência do grafo  $G_{ij}$ ,  $1 \leq j \leq M'$  de cada grupo  $C_i$  da seguinte forma:

i. Modular os coeficientes  $S_r$  do  $j$ -ésimo grafo  $G_{ij}$  pelo  $j$ -ésimo segmento de  $\tilde{\mathbf{W}}$  conforme

$$\hat{S}_r = S_r + \tilde{\mathbf{W}}_r^{(j)} \alpha X,$$

em que  $\widetilde{\mathbf{W}}_r^{(j)} = \{\widetilde{W}_l, j + 1 \leq l \leq j + Q'\}$  e  $\mathbf{X}$  é uma sequência pseudoaleatória formada por 1's e -1's, e gerada pela chave  $\delta$ . A amplitude da modulação é controlada por  $\alpha = \theta\beta$ , em que  $\beta$  é um parâmetro definido pelo usuário e

$$\theta = \max \begin{pmatrix} \min(\mathbf{R}) + \max(\mathbf{R}), \\ \min(\mathbf{G}) + \max(\mathbf{G}), \\ \min(\mathbf{B}) + \max(\mathbf{B}) \end{pmatrix},$$

em que  $\mathbf{R}$ ,  $\mathbf{G}$  e  $\mathbf{B}$  são vetores contendo as componentes vermelho, verde e azul de cada ponto de toda a nuvem;

- ii. Modular os coeficientes  $\mathbf{S}_g$  do  $j$ -ésimo grafo  $G_{ij}$  pelo  $j$ -ésimo segmento de  $\widetilde{\mathbf{W}}$  conforme

$$\widehat{\mathbf{S}}_g = \mathbf{S}_g + \widetilde{\mathbf{W}}_g^{(j)} \alpha \mathbf{X},$$

em que  $\widetilde{\mathbf{W}}_g^{(j)} = \{\widetilde{W}_l, j + Q' + 1 \leq l \leq j + 2Q'\}$ ;

- iii. Modular os coeficientes  $\mathbf{S}_b$  do  $j$ -ésimo grafo  $G_{ij}$  pelo  $j$ -ésimo segmento de  $\widetilde{\mathbf{W}}$  conforme

$$\widehat{\mathbf{S}}_b = \mathbf{S}_b + \widetilde{\mathbf{W}}_b^{(j)} \alpha \mathbf{X},$$

em que  $\widetilde{\mathbf{W}}_b^{(j)} = \{\widetilde{W}_l, j + 2Q' + 1 \leq l \leq j + 3Q'\}$ ;

- m. Calcular a transformada inversa, IGFT, de cada grafo;
- n. Atribuir os valores da transformada inversa, calculada no passo anterior, à informação de cor de seu respectivo ponto e canal de cor;
- o. Incorporar o vetor  $\widetilde{\mathbf{W}}$  em cada grupo  $\mathcal{C}_i, 1 \leq i \leq M$ ,
- p. Ordenar os pontos de acordo com a ordenação original, obtendo assim a nuvem de pontos marcada  $P'$ .

2. Processo para extração de marca d'água para nuvens de pontos 3D, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por receber o modelo de nuvem de pontos 3D original (não marcado),  $P$ , o modelo 3D de nuvem de pontos marcado,  $P'$ , e a chave  $\delta$  utilizada no processo de inserção, e compreender as seguintes etapas:

a. Se o número de pontos da nuvem  $P$  original é maior do que o número de pontos da nuvem  $P'$  marcada, faça:

- i. Calcular para cada ponto da nuvem  $P$  original sua distância Euclidiana em relação a cada um dos pontos da nuvem  $P'$  marcada;
- ii. Adicionar todo ponto da nuvem  $P$  original, na nuvem  $P'$  marcada, para o qual não seja encontrado um ponto na nuvem marcada cuja distância seja 0 (zero);

b. Para cada ponto  $p$  da nuvem  $P$  original procurar o ponto mais próximo  $p'$ , considerando a distância Euclidiana, na nuvem de pontos  $P'$  marcada. Se os índices desses dois pontos, na lista de pontos de suas respectivas nuvens, forem diferentes, alterar a posição de  $p'$  na lista de pontos da nuvem marcada  $P'$  para a mesma a mesma posição de  $p$  na lista de pontos da nuvem  $P$  original;

c. Calcular a norma- $L^2$  ponderada de todos os pontos  $p_i = \{x_i, y_i, z_i\}$ ,  $1 \leq i \leq N$ , pertencentes a nuvem de pontos  $P$  original, isto é,

$$|p_i| = \sqrt{x_i^2 + 2y_i^2 + 3z_i^2};$$

d. Ordenar os pontos da nuvem original,  $P$ , em ordem decrescente em função de sua respectiva norma- $L^2$ , calculada no passo anterior;

- e. Embaralhar os pontos da nuvem original,  $P$ , usando a chave  $\delta$  com um gerador pseudoaleatório;
- f. Ordenar os pontos da nuvem marcada,  $P'$ , de acordo com a ordem final dos pontos da nuvem  $P$  original, obtida após o passo anterior;
- g. Selecionar de forma pseudoaleatória, utilizando a chave  $\delta$ ,  $M$  pontos da nuvem  $P$  original, chamados de “sementes”;
- h. Para cada ponto “semente”, selecionar seus respectivos  $Q - 1$  pontos mais próximos, excluindo-se os pontos “sementes”. Todos os pontos selecionados devem ser distintos, formando assim  $M$  grupos disjuntos  $C_i, 1 \leq i \leq M$ ;
- i. Para cada grupo  $C_i$ , selecionar, de forma pseudoaleatória com a chave  $\delta$ ,  $M'$  pontos “sementes” pertencentes  $C_i$  e formar  $M'$  subgrupos,  $c_{ij}$ , de  $Q'$  pontos, em que  $M' < M$ ,  $Q' < Q$  e  $c_{ij}$  é o  $j$ -ésimo subgrupo do grupo  $C_i$ , utilizando o mesmo processo do passo anterior;
- j. Formar grupos na nuvem de pontos  $P'$  marcada considerando a mesma formação dos grupos da nuvem de pontos  $P$  original, de acordo com o índice dos pontos;
- k. Para cada subgrupo  $c_{ij}$  da nuvem de pontos  $P$  original, inferir um grafo  $G = (V, \xi)$  adicionando uma aresta entre cada ponto (vértice) e seus  $k$ -vizinhos mais próximos em termos da distância Euclidiana. O peso da aresta entre dois pontos  $p_i$  e  $p_j$  é dado por

$$\text{peso}(i, j) = e^{\frac{-\text{dist}(p_i, p_j)}{\sigma^2}},$$

em que  $\text{dist}(p_i, p_j)$  é a distância Euclidiana quadrática,

$$\text{dist}(p_i, p_j) = (x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2,$$

e

$$\sigma = \frac{\sum_{(i,j) \in \xi} \text{dist}(p_i, p_j)}{|\xi|},$$

em que  $|\xi|$  é o número de arestas do grafo  $G$ ;

l. Formar grafos  $G'$  na nuvem de pontos  $P'$  marcada considerando a mesma formação dos grafos  $G$  da nuvem de pontos  $P$  original, de acordo com o índice de seus respectivos pontos;

m. Calcular as componentes de frequência  $S_r$ ,  $S_g$  e  $S_b$  para cada grafo  $G$  da nuvem de pontos original,  $P$ , e as componentes de frequência  $\hat{S}_r$ ,  $\hat{S}_g$  e  $\hat{S}_b$  para cada grafo  $G'$  da nuvem de pontos marcada,  $P'$ ;

n. Para cada grafo, calcular para cada par de componentes de frequência  $\hat{S}$  e  $S$ , os símbolos  $\hat{w}_j \in \{-1, 1\}$ ,  $1 \leq j \leq Q'$  por

$$\hat{w}_j = \text{sin} \left( \sum_{i=jt}^{(j+1)t-1} (\hat{S}_i - S_i) X_i \right);$$

o. Mapear os símbolos  $\hat{w}_j$  em

$$w_j = \begin{cases} 0, & \hat{w}_j = -1; \\ 1, & \hat{w}_j = 1 \end{cases};$$

p. Para cada grafo, concatenar as três sequências de  $w_j$  extraídas de cada canal de cor R, G e B;

q. Para cada grupo,  $C$ , de pontos, concatenar as  $M'$  sequências de bits formadas no passo anterior, obtendo assim  $M$  novas sequências de bits  $B_i$ ,  $1 \leq i \leq M$  em que  $B_i = \{B_{i1}, B_{i2}, \dots, B_{iQ}\}$ ;

r. Compor nova sequência  $\bar{B} = \{\bar{B}_1, \bar{B}_2, \dots, \bar{B}_Q\}$  tal que

$$\bar{B}_q = \text{mais\_frequente}(B_{1q}, B_{2q}, \dots, B_{Mq}), 1 \leq q \leq Q,$$

em que  $\text{mais\_frequente}(\cdot)$  retorna o bit, 1 ou 0, que ocorre com maior frequência entre  $B_{1q}, B_{2q}, \dots, B_{Mq}$  para  $1 \leq q \leq Q$ , obtendo assim a marca d'água extraída  $\bar{B}$ .

FIGURA 1

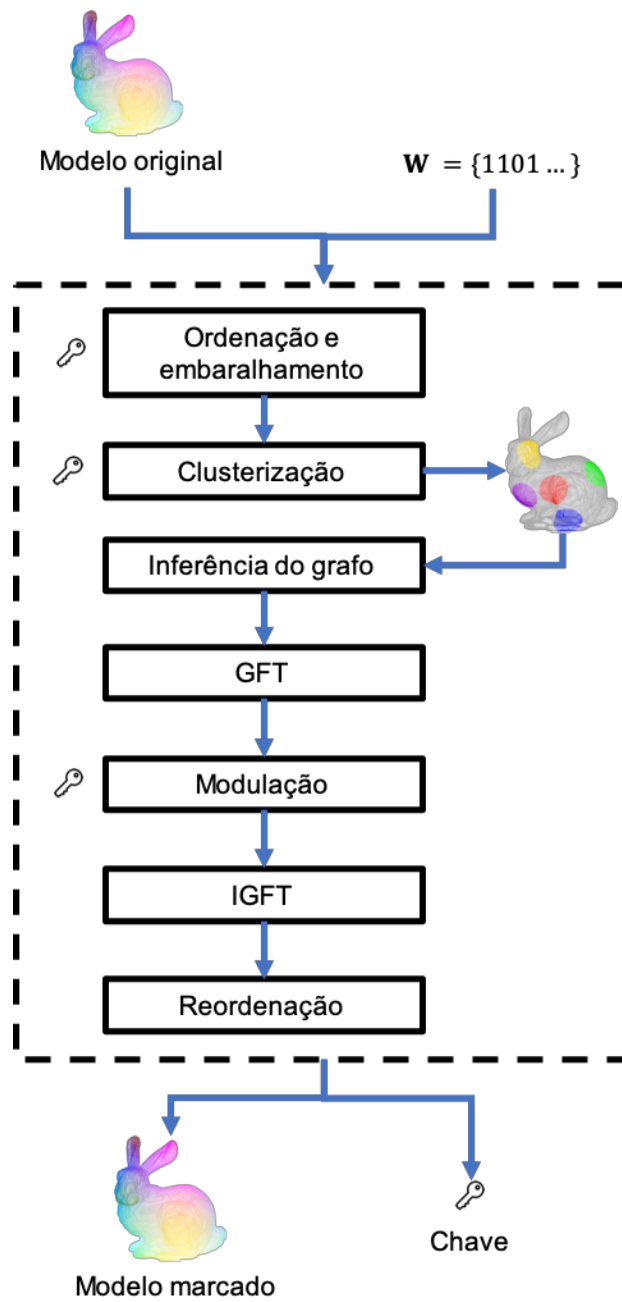


FIGURA 2

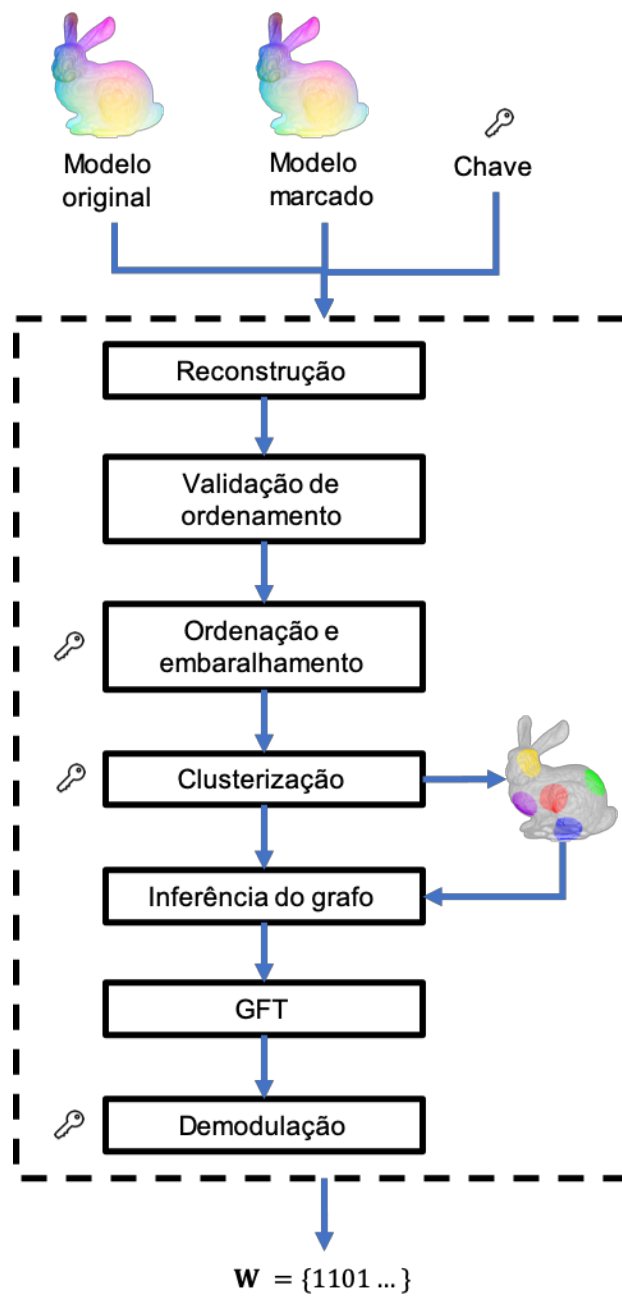


FIGURA 3

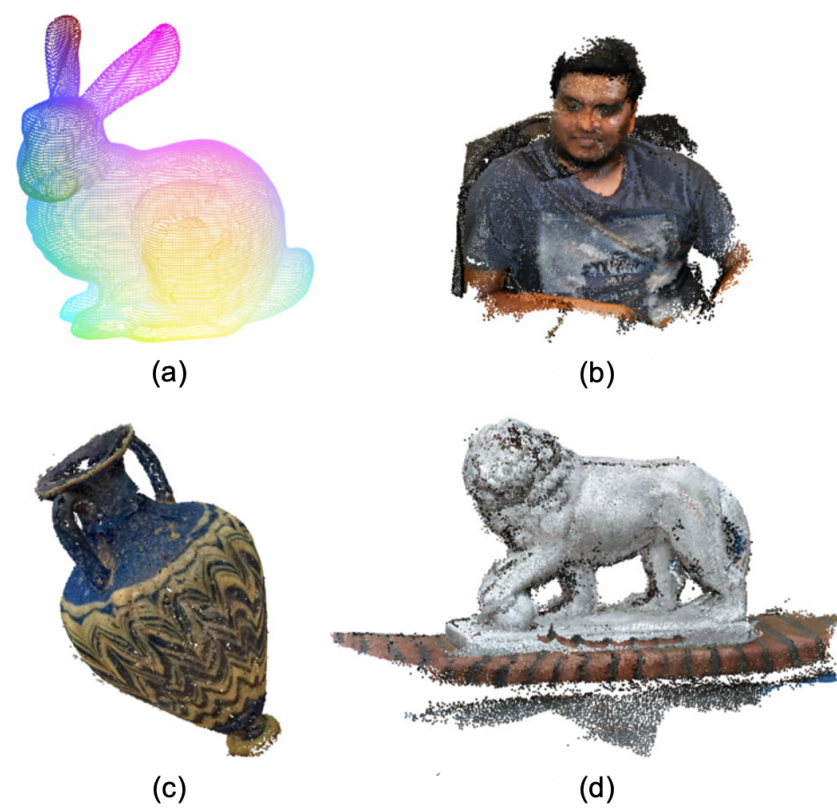


FIGURA 4



FIGURA 5

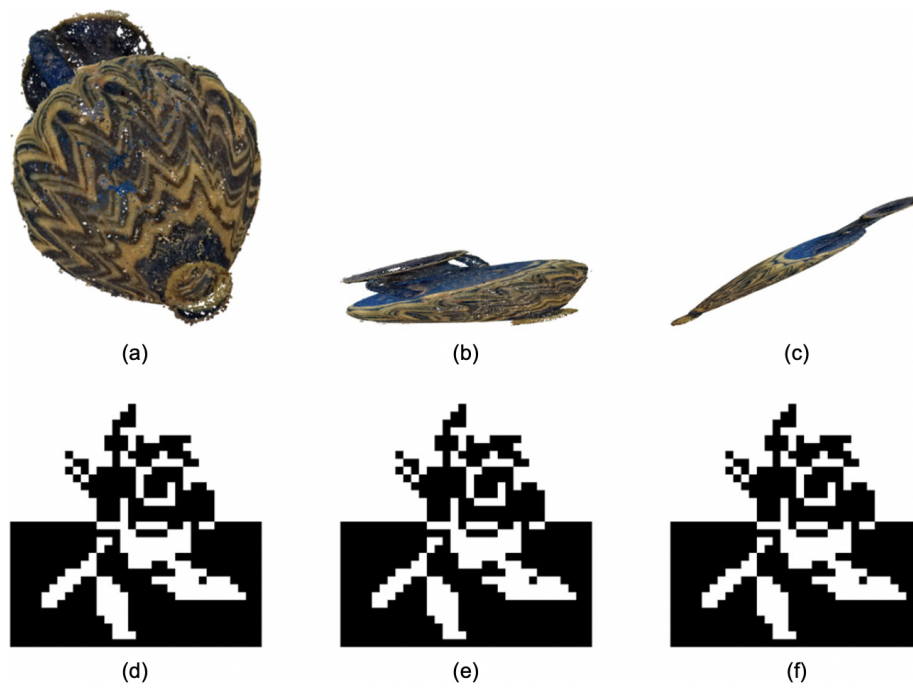


FIGURA 6



FIGURA 7

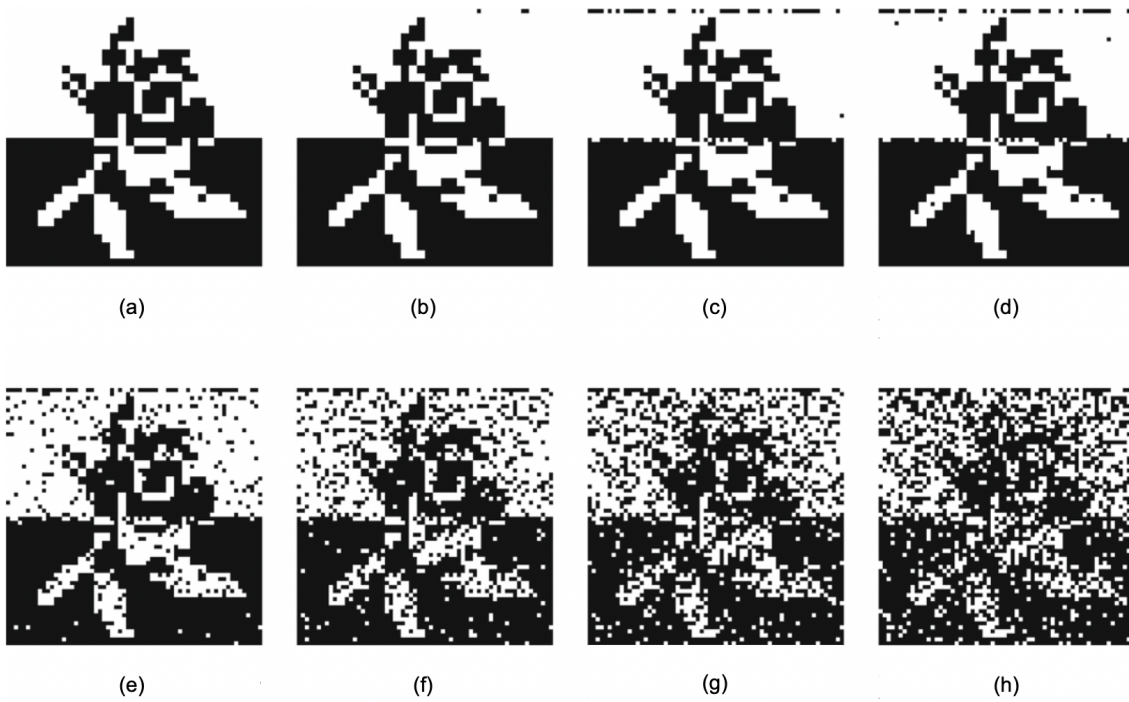


FIGURA 8

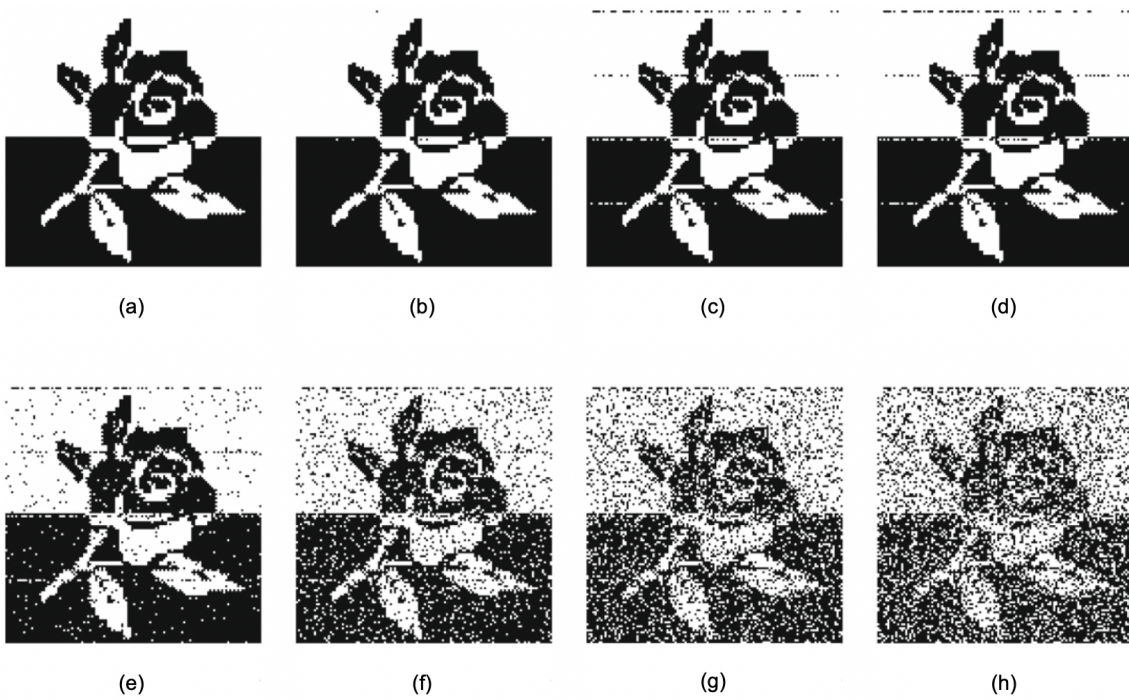


FIGURA 9

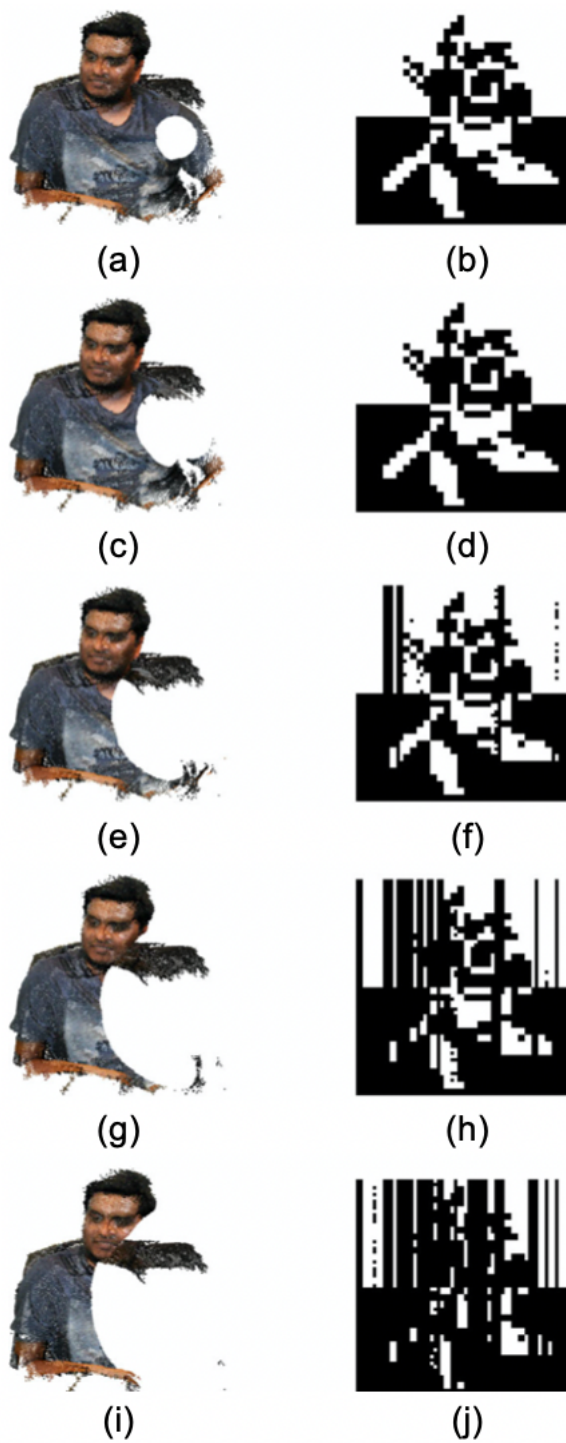


FIGURA 10

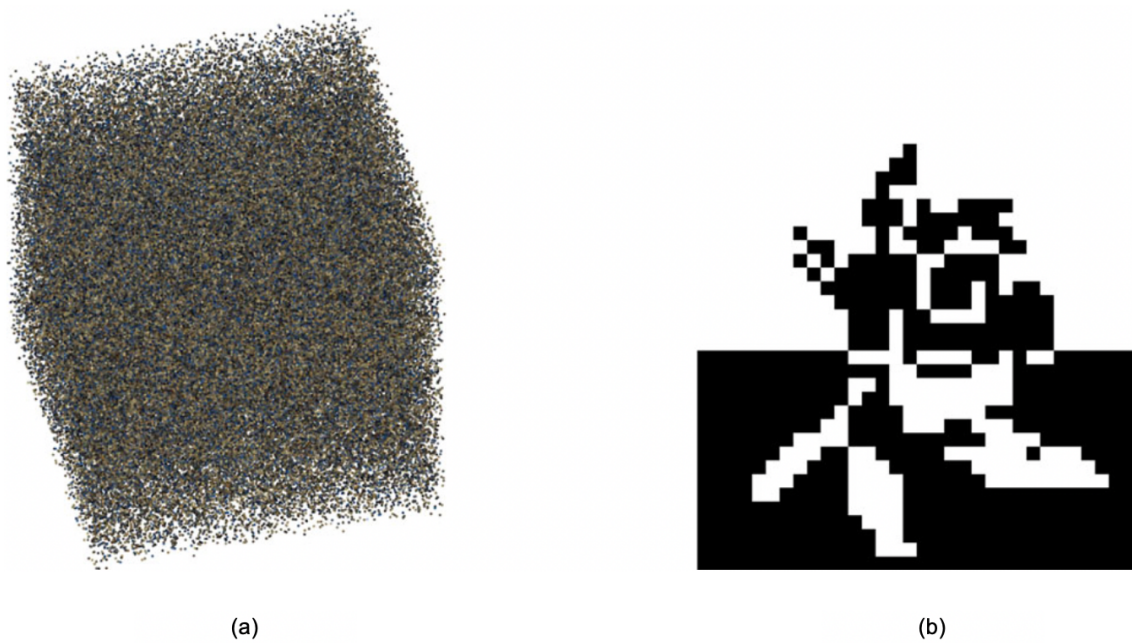
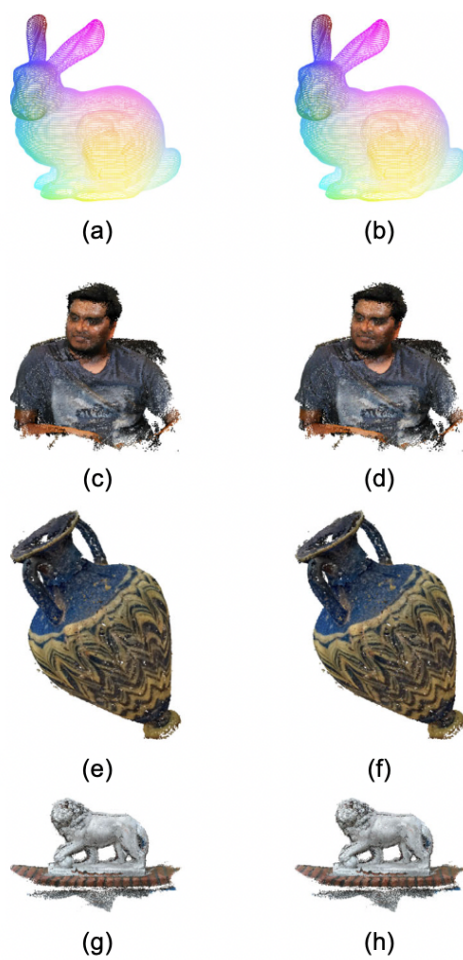


FIGURA 11



### **Resumo**

## **PROCESSO DE MARCA D'ÁGUA ROBUSTA PARA NUVENS DE PONTOS 3D ATRAVÉS DA TRANSFORMADA DE FOURIER SOBRE GRAFOS**

A presente invenção introduz um processo de inserção e extração de marca d'água para nuvens de pontos 3D. Diversas aplicações modernas fazem uso da reconstrução e/ou modelagem 3D de objetos complexos, como monumentos históricos e centros urbanos inteiros. Uma das formas mais comuns de representação desses modelos 3D é através de uma nuvem de pontos, que é um conjunto denso de pontos organizados de forma irregular em um sistema de coordenadas tridimensional. Em geral, o processo de aquisição desses modelos possui um custo elevado devido ao tamanho dos objetos e do equipamento necessário. Esse fator, motivou a invenção de uma técnica de marca d'água que garanta a proteção dos direitos autorais e que permita detectar cópias ilegais. O processo de marca d'água desta invenção se baseia na transformada de Fourier sobre grafos, que é uma ferramenta para processamento de sinais apresentada recentemente e que vem sendo aplicada em sinais dispostos sobre um domínio irregular arbitrário. Diferentemente de outros trabalhos relacionados à marca d'água para nuvens de pontos, em vez de inserir a sequência de bits nas coordenadas espaciais dos modelos, nesta invenção, os bits são embutidos na informação de cor atribuída a cada ponto da nuvem. Resultados de simulação computacional apresentam uma alta imperceptibilidade e robustez a diversos ataques, como transformações afins, reordenamento, adição de ruído e recorte.