



COLEÇÃO
ESTUDOS
CARIOCAS

Volume
13
Edição
4

*Autor(a) correspondente
irvingbadolato@eng.uerj.br

Submetido em 23 nov 2025

Aceito em 05 jan 2026

Publicado em 30 jan 2026

Como Citar?
BADOLATO, I. S.; MOTA, G. L. A.; COSTA, G. A. O. P. *Potencial latente para atualização dos modelos tridimensionais de cobertura das edificações do município do Rio de Janeiro. Coleção Estudos Cariocas*, v. 13, n. 4, 2026. DOI: 10.71256/19847203.13.4.201.2025

O artigo foi originalmente submetido em PORTUGUÊS.

As traduções para outros idiomas foram revisadas e validadas pelos autores e pela equipe editorial. No entanto, para a representação mais precisa do tema abordado, recomenda-se que os leitores consultem o artigo em seu idioma original.

OPEN  ACCESS



Potencial latente para atualização dos modelos tridimensionais de cobertura das edificações do município do Rio de Janeiro

Latent potential for updating three-dimensional roof models of buildings in the municipality of Rio de Janeiro

Potencial latente para la actualización de modelos tridimensionales de cubiertas de edificaciones del municipio de Río de Janeiro

Irving da Silva Badolato¹, Guilherme Lucio Abelha Mota² e Gilson Alexandre Ostwald Pedro da Costa³

¹Universidade do Estado do Rio de Janeiro, R. São Francisco Xavier, 524, Rio de Janeiro, RJ, ORCID 0000-0002-4058-4392, irvingbadolato@eng.uerj.br

²Universidade do Estado do Rio de Janeiro, R. São Francisco Xavier, 524, Rio de Janeiro, RJ, ORCID 0000-0003-2336-6024, guimota@ime.uerj.br

³Universidade do Estado do Rio de Janeiro, R. São Francisco Xavier, 524, Rio de Janeiro, RJ, ORCID 0000-0001-7341-9118, gilson.costa@ime.uerj.br

Resumo

Para demonstrar melhorias aplicáveis ao cadastro urbano da cidade do Rio de Janeiro, foram investigadas técnicas do estado da arte para modelagem 3D de edificações, com foco no detalhamento geométrico das coberturas. Os experimentos submeteram dados de um cadastro anterior a processamento automatizado, com software livre, para aumento do nível de detalhamento de feições pré-existentes, otimizando recursos, em uma iniciativa pioneira para grandes cidades do Sul Global. Os resultados são úteis a diversos estudos ambientais, ao incorporar novas características aos registros urbanos, e valorizam a atuação humana como elemento essencial para a garantia da qualidade.

Palavras-chave: modelo de edificações 3D, nível de detalhamento, CityGML

Abstract

To demonstrate applicable improvements to the urban cadastre of the city of Rio de Janeiro, state-of-the-art techniques for 3D building modeling were investigated, focusing on the geometric detailing of roofs. The experiments subjected data from a previous cadastre to automated processing, using open-source software, to increase the level of detail of pre-existing features, optimizing resources, in a pioneering initiative for large cities in the Global South. The results are useful for various environmental studies, by incorporating new characteristics into urban records, and highlight human intervention as an essential element for ensuring quality.

Keywords: 3D building model, level of detail, CityGML

Resumen

Para demostrar mejoras aplicables al catastro urbano de la ciudad de Río de Janeiro, se investigaron técnicas de vanguardia para el modelado 3D de edificios, centrándose en el detalle geométrico de las cubiertas. Los experimentos sometieron datos de un catastro previo a procesamiento automatizado mediante software de código abierto para aumentar el nivel de detalle de los elementos preexistentes y optimizar recursos, en una iniciativa pionera para las grandes ciudades del Sur Global. Los resultados son útiles para diversos estudios ambientales, al incorporar nuevas características a los registros urbanos y destacar la intervención humana como un elemento esencial para garantizar la calidad.

Palabras clave: modelo de edificio 3D, nivel de detalle, CityGML

1 Introdução

A forma das edificações pode variar significativamente entre cenários urbanos, o que pode estar associado a fatores como grau de desenvolvimento local, relevo, clima, cultura e idade dos edifícios. A gestão de ativos urbanos requer modelos ricos em características, atualizados e precisos, dentro de margens compatíveis com o problema em estudo. Além da área planimétrica construída, esses modelos devem considerar as variações altimétricas dos objetos urbanos. Embora a elaboração e manutenção de modelos tridimensionais de cidades representem desafios parcialmente resolvidos, os esforços em fotogrametria por visão computacional nos anos recentes fornecem indício do interesse científico no aprimoramento dos resultados oferecidos (Lussange *et al.*, 2025).

Técnicas de sensoriamento remoto oferecem fontes relevantes para a geração de modelos 3D, embora levantamentos cadastrais também colaborem para seu enriquecimento. Imagens e nuvens de pontos obtidas por sensores embarcados em plataformas aéreas ou orbitais preservam registros (brutos ou pouco tratados) das formas construídas reais. Entretanto, sua análise demanda intenso processamento computacional. Desenvolver aplicações sobre estes conjuntos de dados requer individualização de objetos de interesse, como edificações, e abstração de características. Quanto maior o nível de características preservadas, maior tendem a ser os esforços humanos e computacionais necessários.

Por representarem com razoável precisão o ambiente construído e outros elementos urbanos, os modelos tridimensionais de cidades despertam interesse de gestores públicos, empresas privadas e da sociedade civil. Segundo Biljecki *et al.* (2015), o interesse crescente nestes modelos decorre de sua ampla gama de aplicações, como, por exemplo, cadastro, visita virtual, detecção de mudanças, planejamento urbano, análise de mobilidade, resposta a emergências, estudos ambientais e avaliação da qualidade de vida. Nos estudos ambientais, as edificações, ou parte delas, como coberturas e fachadas, formam barreiras físicas em diversos fenômenos. Suas superfícies são muito menos permeáveis que a vegetação arbórea e mais complexas que o terreno e outros elementos da infraestrutura urbana. Isto motiva a discussão sobre níveis de detalhamento necessários e viáveis para sua representação em dinâmicas de fenômenos aplicadas aos diversos estudos do meio ambiente.

No que se refere à insolação e à formação de áreas sombreadas, por exemplo, as edificações interagem reduzindo a incidência da radiação solar direta e contribuindo para a propagação difusa e/ou especular (a depender da superfície), exigindo a computação por meio de algoritmos como o ray-tracing (Robinson; Stone, 2004). Este uso dos modelos de edificações pode viabilizar a produção de mapas de radiação para a estimativa de sombreamento ao longo do tempo com aplicações diretas em eficiência energética, descoberta de ilhas de calor urbanas e estimativas de conforto térmico. Isto permite a análise de impactos para o microclima pela adição de novas edificações ou pela simulação do crescimento vertical dentro do volume urbano pré-existente (Falcão *et al.*, 2025). Além disso, os modelos de cobertura das edificações podem também ser enriquecidos, pelo mapeamento de superestruturas como chaminés, copas de árvores, clarabóias ou maquinários, para melhoria da estimativa do potencial solar (Krapf *et al.*, 2022b).

De forma análoga, estes algoritmos podem ser utilizados em estudos a respeito da propagação de ruídos e poluição sonora. O que requer a estimativa de índices de reflexão e absorção de ondas mecânicas para as diferentes classes de objetos sobre o terreno (Stoter *et al.*, 2020). Em projetos de telecomunicações, isto pode ser adaptado para verificar a cobertura ou oclusão de ondas eletromagnéticas, ao planejar a configuração de dispositivos e realizar interferências sobre sombras de sinal e impactos de novas construções, que apoiem a otimização e a operação de suas redes urbanas (Seilov *et al.*, 2021).

Nos contextos da ventilação urbana e da propagação de poluentes, os edifícios

influenciam diretamente os campos de velocidade, turbulência e dispersão do escoamento atmosférico. Esses efeitos são usualmente investigados por meio da dinâmica dos fluidos computacional e, em aplicações mais detalhadas, da simulação de grandes vórtices (Buccolieri; Hang, 2019), que permitem representar com maior fidelidade a interação entre a morfologia urbana e os processos de transporte.

Por sua vez, as dinâmicas de enchentes são tradicionalmente baseadas em modelos de elevação do terreno e em estimativas de uso do solo, permeabilidade e capacidades de retenção. A incorporação explícita da geometria das edificações possibilita definir com maior acurácia os padrões de captação, armazenamento e direcionamento do escoamento superficial. O reconhecimento desses padrões contribui para a análise de risco de alagamentos e a elaboração de estratégias para a drenagem urbana sustentável (Wang, C. et al., 2019). Isto também permite refinamentos na avaliação da contribuição de telhados verdes, reservatórios de detenção e sistemas de aproveitamento de águas pluviais para a resiliência das cidades (Angrill et al., 2017).

Definir níveis de detalhamento para modelos de cidades ajuda a formalizar necessidades e capacidades para abstração do meio urbano no levantamento dos requisitos de cada aplicação. Serviços de mapas globais, por exemplo, são beneficiados pela disponibilidade de projeções das edificações que oferecidas em modelos de menor nível de detalhamento, em função da volumetria mais compacta dessas representações. Além disso, esses serviços se beneficiam da ampla disponibilidade de algoritmos capazes de automatizar a captura de feições nesse nível de detalhamento, mesmo em regiões mapeadas por diferentes técnicas de Observação da Terra. Por sua vez, modelos de blocos, que compreendem um nível intermediário de detalhamento, podem ser mais adequados para análises estratégicas de planejamento e visualização rápida. Por fim, modelos de edificações em níveis mais altos, com geometrias detalhadas e distinção semântica das superfícies observadas (coberturas e fachadas), atendem aplicações de engenharia, simulações ambientais e outras consultas aos dados espaciais que demandem elevada fidelidade com o mundo real.

A relevância dos esforços para disponibilizar modelos oficiais em diferentes níveis de detalhamento evidencia-se na limitação dos cadastros urbanos tradicionais em representar adequadamente a geometria e a semântica das edificações (Biljecki et al., 2015). Essa deficiência dificulta a adoção de modelos urbanos tridimensionais em níveis mais avançados de detalhamento. Até onde se sabe, quando disponíveis, modelos vetoriais com alto nível de detalhamento concentram-se majoritariamente em cidades do Norte Global (Wysocki et al., 2024). Em cidades metropolitanas, como o Rio de Janeiro, interessa avaliar a aplicabilidade de técnicas empregadas com sucesso em grandes volumes de dados de outras regiões.

Tomando como referência o conjunto de dados acumulado ao longo de anos para atualizar as bases cadastrais do meio urbano e os sistemas publicados pela administração municipal, pode-se concluir que o modelo de edificações encontra-se compatível com o nível intermediário de detalhamento. Assim os registros vetoriais de edificações do cadastro municipal vigente podem ser transmitidos num nível de detalhamento de blocos. Mais especificamente no *Level of Detail* 1 (LoD 1) do padrão CityGML (Gröger; Plümer, 2012). Este padrão, mantido pela Open Geospatial Consortium (OGC), define níveis de detalhamento e um modelo conceitual para representação, armazenamento e intercâmbio de dados urbanos.

Um exemplo de aplicação do modelo de LoD 1, demonstrado no projeto Reviver Centro¹ da Secretaria Municipal de Desenvolvimento Urbano e Licenciamento, permite visualizar imóveis sob monitoramento na cidade. O principal recurso utilizado pelo visualizador é a base vetorial de edificações da Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro, que contém informações planimétricas e altimétricas das

¹ O portal do projeto Reviver Centro está disponível em <https://reviver-centro-pcrj.hub.arcgis.com>.

projeções das edificações. Apesar de útil para visualizações rápidas, o modelo de blocos não é recomendável nas aplicações sensíveis às formas dos telhados. Construções assimétricas, como exemplificado na Figura 1, ou complexas podem ser difíceis de representar segundo esta modelagem.

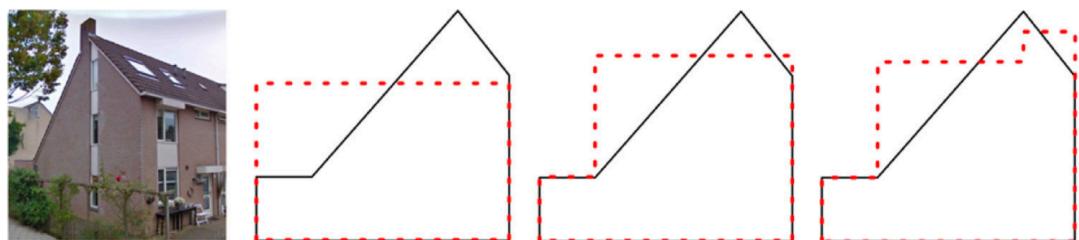


Figura 1: Três diferentes possibilidades para modelagem de blocos de um edifício

(*saltbox*)

Fonte: (Stoter et al., 2020)

Neste estudo, adotou-se como objetivo principal, propor uma abordagem para a atualização cadastral para a incorporação de novas características aos registros urbanos, viabilizando a compatibilidade do modelo de edificações em *Level of Detail 2* (LoD 2). Esse nível pressupõe a representação explícita das formas geométricas das coberturas e sua separação semântica em relação às fachadas e a outros elementos construtivos. Para avaliar a viabilidade da proposta, dados municipais foram processados por meio de um *software* livre originalmente desenvolvido para viabilizar modelos nos Países Baixos² (Peters et al., 2022).

As demais seções neste artigo estão organizados da seguinte forma: A Seção 2 trata dos trabalhos relacionados ao mesmo tema enfatizando o contexto teórico; a Seção 3 caracteriza os conjuntos de dados do município e justifica as escolhas de recortes realizadas; a Seção 4 aborda a metodologia empregada para aplicação dos algoritmos ao novo conjunto de dados; a Seção 5 apresenta e discute os resultados obtidos; e a Seção 6 traz as considerações finais neste trabalho.

2 Trabalhos relacionados

A literatura acerca da produção de modelos de edificações 3D apresenta diferentes abordagens que podem resultar em diferentes níveis de detalhamento. A começar pelas fontes de dados abordadas, que podem ser tanto derivadas de levantamentos aéreos ou orbitais, quanto de levantamentos terrestres. Opcionalmente podem ser incorporados dados pré-existentes nos cadastros formais de edificações como plantas arquitetônicas, cadastros multifinalitários, registros imobiliários e bases cartográficas oficiais que descrevem a geometria, o uso e a ocupação das edificações. Tais abordagens também podem ser distintas conforme suas bases metodológicas, que podem estar focadas tanto nos dados, quanto nos modelos, sendo ainda possível encontrar abordagens híbridas ou difíceis de categorizar segundo esta dicotomia entre dado e modelo.

2.1 Caracterização das fontes de dados e abordagens de processamento

Para Wang, R. (2013) conjuntos de imagens de alta resolução podem ser ricos em informações semânticas, mas dependem de métodos específicos para recuperação da geometria tridimensional. Por outro lado, nuvens de pontos obtidas por sensores LiDAR (*Light Detection And Ranging*) representam diretamente a geometria, mas tipicamente alcançam menores resoluções e limitada semântica. Então, para realizar modelagem 3D partindo de imagens podem ser utilizadas técnicas de aprendizado de máquina para realizar estimativas monoscópicas de elevações ou técnicas de medição de coordenadas tridimensionais em pares estereoscópicos,

² Informações sobre os modelos 3DBAG estão disponíveis em <https://3d.bk.tudelft.nl/projects/3dbag>

usando princípios fotogramétricos que geralmente permitem melhor compreensão da acurácia associada às elevações obtidas.

Todavia, é possível integrar imagens e nuvens de pontos por meio de processos de registro que estabelecem correspondências entre as coordenadas projetadas no plano das imagens e as coordenadas do espaço geométrico do mundo, preservadas nas nuvens de pontos. Essa integração caracteriza uma abordagem de fusão de dados multimodais, na qual informações complementares provenientes de diferentes sensores são combinadas de forma consistente. Em geral, tais processos podem ser empregados tanto para o aumento virtual da resolução espacial das nuvens de pontos quanto para a realização de segmentações orientadas por imagens, explorando simultaneamente oportunidades das características geométricas e semânticas armazenadas nos conjuntos de dados.

Nas abordagens que operam diretamente sobre nuvens de pontos, etapas centrais incluem a classificação e a filtragem dos dados, de modo a separar as edificações de outros objetos presentes no ambiente urbano. Conforme destacado por Wang, R., Peethambaran e Chen (2018), este tipo de abordagem apresenta dependência da qualidade e resolução dos dados de entrada. Em geral, o processo envolve a segmentação de superfícies coerentes ou de suas arestas – por exemplo, com primitivas planares ou lineares – seguida do estabelecimento de relações topológicas entre os objetos identificados.

Em contraste, as abordagens orientadas a modelos concentram-se na seleção e no ajuste de estruturas geométricas parametrizáveis para representar os edifícios como objetos topologicamente consistentes. No caso da modelos de telhados, essas estruturas podem incluir pirâmides, conjuntos de um ou mais planos e, para contemplar estilos de construção específicos, também podem ser consideradas geometrias como cones, cilindros ou esferóides. Entretanto, essa estratégia tende a ser limitada pela quantidade de formas previamente definidas e pelas combinações possíveis entre elas.

Apesar da dicotomia entre as abordagens apresentadas na literatura, dados e modelos estão intrinsecamente relacionados nos processos observados. O diagrama da Figura 2 apresenta um panorama geral de entradas e saídas e sua relação nos processos estudados. Pode-se dizer que dados são estruturados para formalizar modelos. Logo, há processos difíceis de categorizar ou que devem ser tratados como abordagens híbridas. Eles podem levar a estratégias balanceadas entre precisão e capacidade de modelar uma grande variedade de edificações, considerando adaptações que permitam superar assim limitações discutidas.

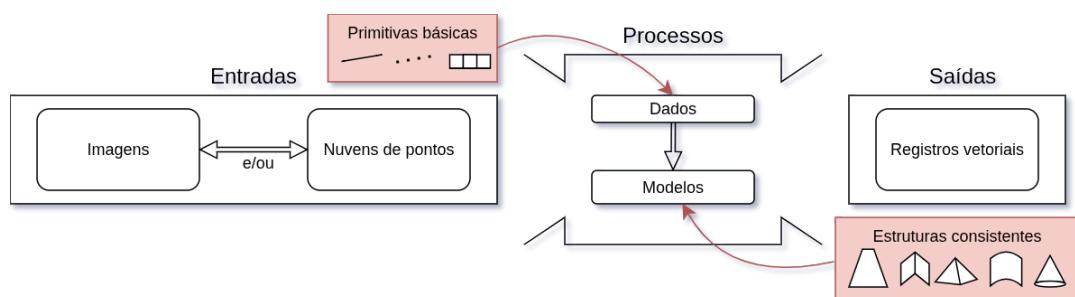


Figura 2: Panorama geral de entradas e saídas dos processos de modelagem de edificações 3D com dados de observação da Terra e objetos trabalhados nas distintas abordagens.

Fonte: Autores (2025)

Assumindo a abordagem baseada em dados, a segmentação de primitivas geométricas é possível de realização tanto em nuvens de pontos quanto em imagens. Hao, Zhang e Cao (2016), por exemplo, propõem uma técnica para pares estereoscópicos de imagens aéreas que usa um método para correspondência de

feições (ponto e linha) entre imagens aéreas de múltiplos ângulos para uma mesma cena. Usando modelos de fotogrametria clássica e regras de correspondência, as linhas são agrupadas e suas alturas são extraídas por intersecção espacial. Outra proposta feita por Mohammadi, Samadzadegan e Reinartz (2019) destina-se às imagens de satélite de alta resolução e deriva um mapa de disparidade usando a correspondência semi-global de Hirschmüller (2011). Neste caso, a segmentação é realizada com um núcleo para recorte de grafos no espaço de características que inclui as bandas radiométricas, o mapa de disparidade e um índice de vegetação visível.

Recentemente a adoção de redes neurais profundas tem se destacado para abordagens de segmentação que antecedem a reconstrução de telhados de edifícios urbanos. Isto pode envolver, por exemplo, isolar edifícios em nuvens de pontos usando técnicas de agrupamento e segmentar edifícios individuais com um algoritmo baseado em RANSAC (acrônimo para *RANdom SAmples Consensus*) (Sun *et al.*, 2024). Em imagens de satélites algo similar foi proposto em duas etapas. Primeiro ocorre a segmentação de edifícios e posteriormente faz-se um ajuste de estruturas geométricas pré-definidas sobre modelos digitais de superfície derivados do conjunto de imagens (Ismael; Sadeq, 2025).

2.2 Características dos produtos possíveis

Nas edificações do mundo real, muitos dos materiais de revestimento aplicados às composições de telhados apresentam padrões característicos, frequentemente ondulados, que favorecem o escoamento das águas pluviais e resultam em desníveis associados à sobreposição de suas peças. Há ainda edificações, cujas coberturas são lajes planas impermeabilizadas e telhados que adicionam áreas técnicas horizontais para dar suporte a instalação de equipamentos diversos, como antenas, caixas d'água, maquinários exaustores e refrigeradores. Além disso, é comum a presença de outras estruturas observáveis sobre coberturas, como vegetação, chaminés, platibandas ou outros elementos verticais, que podem gerar oclusões para os sensores remotos e dificultar o registro preciso da geometria das coberturas.

Por estes motivos, interpolar modelos digitais de superfície (DSM - *Digital Surface Models*) ou estruturar malhas triangulares (TIN - *Triangular Irregular Networks*) diretamente sobre nuvens de pontos, sem texturas, pode levar a modelos pouco convincentes para o olho humano. Malhas capturam a rugosidade, mas não necessariamente podem ser mantidas em altas resoluções com precisão suficiente para interpretação dos detalhes mais finos em mapeamentos de larga escala. Por sua vez, a interpolação de modelos regulares suaviza superfícies e pode interferir na localização de descontinuidades (Guo *et al.*, 2024).

Assumir a simplificação de geometrias por planos é estratégia de redução do consumo de recursos computacionais para armazenamento, transmissão e visualização de dados. Isto também evita sobreajuste dos modelos produzidos, preservando apenas as estruturas mais estáveis e relevantes para a descrição volumétrica das edificações. Faces planas criam uma abstração da superfície real, que normalmente não é plana. Mas pode ser aproximada por um ou mais segmentos planos. Então, há um compromisso de encontrar uma representação compacta para as superfícies dentro de uma margem de erro tolerável. Diferente da TIN, apenas os vértices selecionados para formar um polígono de limites de cada segmento planar ajustado são armazenados. De forma similar ao DSM pode ocorrer interpolação para registro de elevação dos vértices sem impor necessidade de qualquer regularização na amostragem de suas coordenadas planimétricas armazenadas. Isto também implica que apenas os vértices extremos de cada segmento de reta nos limites dos planos são necessários. Conforme Verma, Kumar e Hsu (2006), para que planos formem estruturas consistentes nos modelos finais é preciso saber: se as relações espaciais entre planos são respeitadas, se a semântica e a quantidade dos planos mapeados é correta e se os planos estão

bem posicionados, bem como se a forma e orientação atendem ao esperado.

A própria caracterização de quais planos devem ser registrados depende do nível de detalhamento esperado para o modelo. O conceito de níveis de detalhamento, seguindo a nomenclatura definida no padrão CityGML 2.0 (Gröger; Plümer, 2012), prevê uma escala crescente para o grau fidelidade dos modelos de edificações 3D. Dos mais baixos para os mais elevados eles podem ser descritos como: LoD 0 é satisfeito pela restituição planimétrica dos contornos das edificações (também chamados de *footprints*); LoD 1 requer a adição de informações altimétricas e permite a confecção de modelos de blocos; LoD 2 introduz detalhamento geométrico das coberturas das edificações e superfícies semanticamente diferenciadas; e LoD 3 acrescenta informações arquitetônicas de fachadas, tornando o levantamento terrestre desejável para complementar o aerolevantamento. Além destes níveis, ilustrado na Figura 3, foi proposto o nível mais elevado (LoD 4), com o detalhamento de interiores, que pode acabar requerendo a adoção de técnicas mais invasivas do que as convencionais usadas para serviços de Observação da Terra. Contudo, entende-se que este nível seja factível para a cidade formal, se considerados documentos do cadastro municipal das edificações, e para empreendimentos modernos, onde for implementada a estratégia nacional de disseminação do *Building Information Modelling* (BIM) (Brasil, 2024).

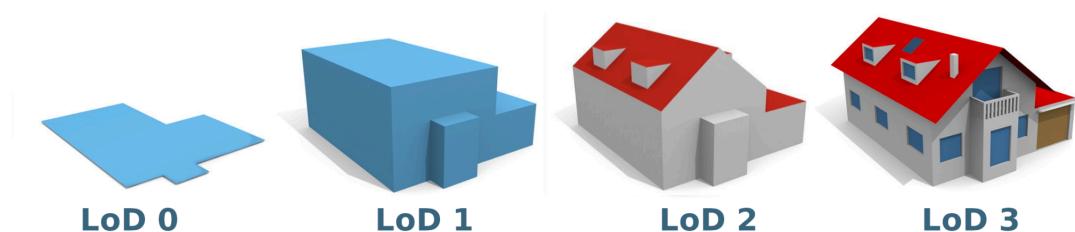


Figura 3: Os 4 primeiros níveis do padrão CityGML 2.0 para detalhamento para edificações.

Fonte: Adaptado de (Biljecki; Ledoux; Stoter, 2016)

Portanto, o processamento de um cadastro de vetores 3D para modelar edificações é um refinamento de dados de alta volumetria com pouca complexidade estrutural. Ele está focado em preservar, estruturar e dar destaque aos vértices limítrofes dos conjuntos de planos que permitem abstrair a forma das construções. A elaboração de um modelo em LoD 2, por exemplo, pode ser acompanhada da extração de características das coberturas úteis para aplicações como o estudo de incidência solar tais como tipo, inclinação e orientação dos telhados disponíveis. De igual forma, cadastros de um nível de detalhamento intermediário podem ser atualizados aproveitando-se do potencial latente dos conjuntos de dados pré-existentes que os viabilizaram. Para isto, faz-se necessária a segmentação de instâncias das diferentes facetas ou águas dos telhados, quando estas não forem coberturas planas (satisfazidas pelo modelo anterior), bem como a indicação de superestruturas presentes, favorecendo a usabilidade dos modelos para estudos de implantação de painéis fotovoltaicos (Krapf et al., 2022a).

3 Conjuntos de dados espaciais do município

O município do Rio de Janeiro atualiza periodicamente sua base cartográfica com recobrimento aerofotogramétrico. A partir do ano de 2019, os mosaicos³ desta natureza vêm sendo publicados como ortofotos verdadeiras, com correção de paralaxe para o terreno e objetos na superfície, como edificações e vegetação. A geração desses produtos costuma utilizar fotografias aéreas co-registradas com dados de sensores LiDAR embarcados num mesmo voo. Opcionalmente, para voos

³ Disponíveis em [#content](https://siurb.rio/portal/home/search.html?searchTerm=trueortofotos)

isolados, é possível realizar pós-processamento para registro entre imagens e nuvens de pontos. Os mosaicos resultantes, gravados em formato TIF, apresentam resolução espacial (GSD - *Ground Sample Distance*) de aproximadamente 15 cm/pixel e radiométrica de 8 bits por banda e são destinadas à aplicações cadastrais (Paiva; Badolato; Coelho, 2024). Para o ano de 2019, este volume de dados chega a quase 1 TB, dos quais 65% são referentes às nuvens de pontos armazenadas em formato LAS. A densidade das nuvens de pontos foi projetada para 8 pontos/m² (Topocart Aerolevantamentos, 2019).

O acesso à dados do município é garantido através do portal de dados abertos da Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro, disponível no endereço eletrônico www.data.rio. A portaria⁴, número 53, de 3 de dezembro de 2010, disciplina a cessão gratuita de dados geoespaciais para universidades, vinculada a projetos de interesse público, mediante ou não à contrapartidas. Segundo a portaria, a cessão de uso para produtos que estejam disponíveis nos portais oficiais do Instituto Municipal de Urbanismo Pereira Passos (IPP) estão desde já autorizados. Para demais produtos, como a base vetorial de edificações e as nuvens de pontos utilizadas neste trabalho, um termo de cessão deve ser lavrado entre as instituições.

O cadastro municipal de edificações atualizado sobre o conjunto de dados levantados em 2019 reúne pouco mais de 1,5 milhão de edificações. Características não geométricas (como uso residencial unifamiliar ou multifamiliar, comercial ou misto) encontram-se fora do escopo deste estudo e, para garantia da LGPD (Brasil, 2018), os registros anonimizados não podem ser relacionados a outras tabelas. Tais registros incluem geometrias de diversas projeções planas para descrever diferentes alturas de uma mesma edificação observada. A estas geometrias são atribuídas altitudes da base e do topo, úteis para a extrusão de blocos num modelo compatível com LoD 1. Também há um campo para descrição da tipologia, a fim de ordenar projeções e distinguir edifícios funcionais de construções em andamento ou ruínas. Por fim, um identificador de edificações permite dissolver as projeções em um único polígono de *footprint*. A Figura 4 demonstra a densidade de edificações (representadas por seus *footprints*) em uma grade com células retangulares de até 550 metros, com $\approx 0,3 \text{ km}^2$.

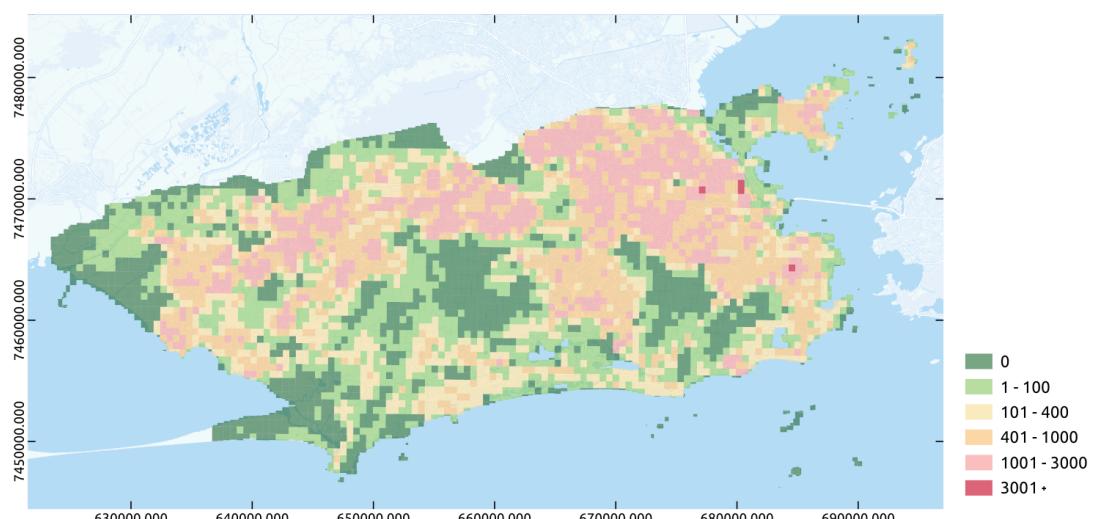


Figura 4: Densidade das edificações do cadastro municipal de 2019.
Fonte: Autores (2025)

Cabe destacar, que devido à informalidade, edificações em favelas representam desafios constantes para manutenção do cadastro. A alta densidade construtiva, a irregularidade dos terrenos ocupados e o crescimento espontâneo das unidades

⁴ Disponível em <https://www.data.rio/documents/c34400f6e0d641ac811019220a6ffffa2>

edificadas, muitas vezes sobrepondo-se verticalmente ou interligando-se, gera questões sobre como individualizar as construções. Ademais, a ausência de documentação oficial torna complexa para restituidores humanos que não tenham familiaridade com a comunidade a ser mapeada a atribuição de quaisquer identificadores para individualização nos registros administrativos. Assim, para casos onde dissolver pelo identificador de edificações torna-se inviável, uma heurística de separação espacial torna-se necessária para isolar quaisquer projeções que não possuam área comum superior a 1 m². A tolerância de pequenas áreas sobrepostas se faz necessária para evitar que pequenos erros de restituição das feições no cadastro produzam *footprints* de grandes aglomerados de edificações.

4 Metodologia empregada

Os modelos tridimensionais atualizados para o ambiente construído dos Países Baixos foram desenvolvidos no escopo do grupo de pesquisa em geoinformação 3D, que faz parte da Seção de Ciência de Dados Urbanos da Universidade de Tecnologia de Delft (TU Delft), e combinam dados da base cadastral oficial (BAG - *Basisregistraties Adressen en Gebouwen*) com nuvens de pontos disponíveis em escopo nacional (AHN - *Actueel Hoogtebestand Nederland*) para vetores de edificações em LoD 1 e LoD 2. No ecossistema de aplicações desenvolvidas para este fim, o principal programa utilizado para construção dos modelos chama-se *roofer*⁵. Ele foi utilizado para integrar dados de elevação presentes nas distintas versões do AHN (2, 3 e 4) resultando em distintos modelos. Tais modelos, integrados aos registros pré-existentes das edificações, oriundos do BAG, servem de base para a atualização cadastral em escala nacional.

O processo automatizado do *roofer* baseia-se na detecção de primitivas planares sobre a nuvem de pontos, utilizando um algoritmo de crescimento de regiões, e na derivação de primitivas lineares nas bordas externas (*boundary lines*) e interseções (*intersection lines*), utilizando o algoritmo da forma alfa. As primitivas lineares são agrupadas por orientação e distância e regularizadas para formar representações únicas dos contornos. Os contornos são usados para particionar o polígono de *footprint* em 2D e as partições são otimizadas usando um algoritmo de recorte de grafos. O objetivo desta etapa é minimizar uma função de energia para obter equilíbrio entre suavidade e desvio das faces planares resultantes para a referência na nuvem de pontos. Por fim, uma extrusão é proposta (Figura 5) para as faces planares resultantes e as edificações são gravadas em formato CityJSON, que é significativamente mais compacto e baseia-se no padrão CityGML.

⁵ Software livre, cujo código está disponível em <https://github.com/3DBAG/roofer>.

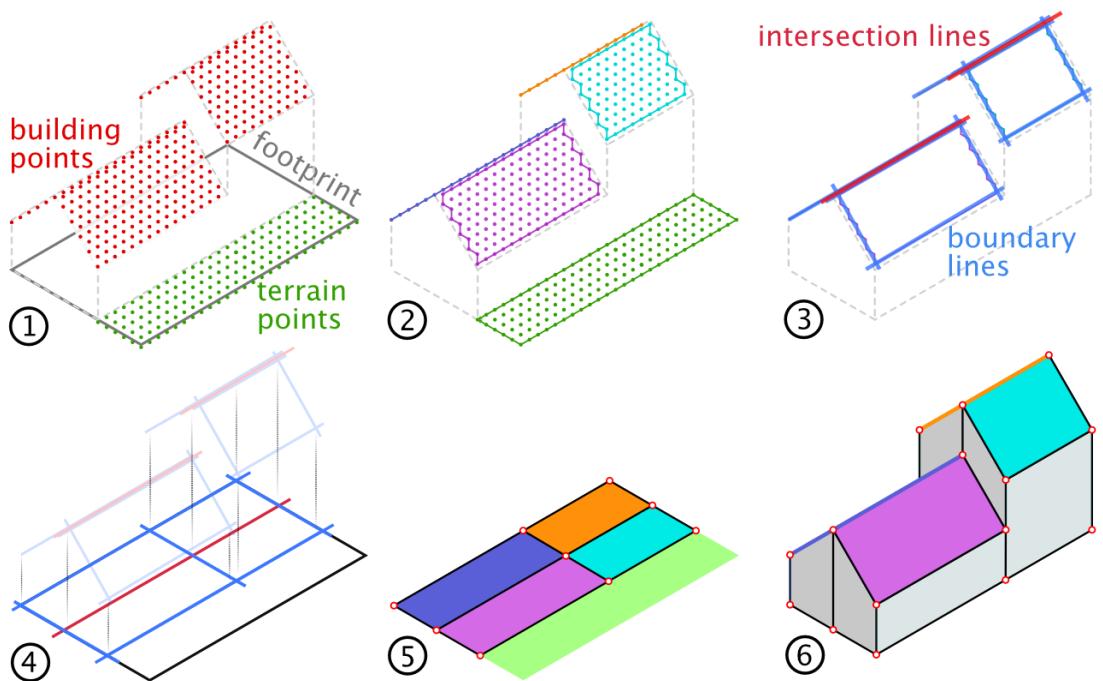


Figura 5: As principais etapas de processamento de reconstrução implementado no *roofer*. 1) entrada de dados; 2) detecção de primitivas planares; 3) detecção de primitivas lineares; 4) partição projetada em 2D; 5) partição otimizada; e 6) saída vetorial, após extrusão.

Fonte: (Peters et al., 2022)

Iniciar o processo automatizado requer que as nuvens de pontos detenham, no mínimo, uma classificação dos pontos observados para indicar áreas edificadas (*building points*) e solo (*terrain points*). Neste caso, adotou-se a classificação prévia do conjunto de dados do município oferecido em formato de arquivos LAS (Graham, 2012). Pontos das duas classes numa zona de amortecimento no entorno do *footprint* de cada edificação são considerados para estimar a elevação da base para extrusão. Faces planares com menos de 16 pontos são desconsideradas, o que impõem uma área mínima de aproximadamente 2 m² para segmentos individualizáveis das edificações quando considerada a resolução de dados disponíveis da cidade do Rio. Esta abordagem é amplamente baseada em dados, portanto, a qualidade do resultado depende da qualidade dos dados de entrada.

O esforço para computação neste processo cresce de forma quase linear, conforme aumenta a quantidade de edificações processadas. Seus desenvolvedores recomendam a divisão dos conjuntos de dados em blocos de edificações espacialmente próximas, subdividindo blocos com mais de 3,5 mil polígonos de *footprints*.

Para a cidade do Rio, a definição dos blocos para processamento levou em conta o centroide de cada polígono de *footprint* pré-processado (ao dissolver projeções da base cadastral) e o recorte definido para nomenclatura de cartas do mapeamento sistemático do município numa escala de 1:1000. Buscando processar todo o conjunto de edificações disponível e excetuando áreas sem construções, foram identificados aproximadamente 3,4 mil blocos para processamento com média de 468 edificações por bloco. O tempo médio de processamento observado por bloco está abaixo de 30 segundos (\approx edifícios por segundo). Todavia, a variação na densidade de edificações, evidenciada pela Figura 4, resultou em diferentes janelas de processamento. Assim, apesar do tempo de espera típico para processamento de cada bloco não superar um minuto, em 13% dos blocos onde a densidade de edificações era muito elevada, o processamento estendeu-se por mais de um minuto.

O tempo total de processamento da nesta configuração está próximo de 30 horas num *hardware* de alta performance com alta disponibilidade de memória principal. O equipamento dedicado a este estudo contou com 128 GB de RAM e um processador Intel i9-12900 com 8 cores E + 8 cores P, capaz de operar em frequências que variam de 1,8 a 3,8 GHz e 2,4 a 5,1 GHz (respectivamente). Esta configuração é capaz de suportar o processamento de até 24 *threads* em paralelo. Cada *thread* atua para reconstrução de um edifício por vez.

A chamada para o processamento de cada bloco foi automatizada por uma rotina própria para o conjunto de dados do município. A esta rotina coube localizar os arquivos de *footprints* pré-processados dos diferentes blocos e chamar o *roofer*, através da linha de comandos do sistema operacional, tendo sido fornecidos como argumentos o diretório onde estavam armazenadas as nuvens de pontos e um endereço para a persistência dos resultados. A mesma rotina coube ainda contabilizar os tempos de execução por bloco de edificações processado.

Em sua versão 1.0 (beta 5), de 27/08/2025, o *roofer* executa em paralelo nos processadores modernos, mas não conta com recursos com aceleração utilizando dispositivos de processamento gráfico (GPUs). Uma vez em execução, um controlador principal é responsável por orquestrar as atividades de cada subprocesso para leitura e recorte de dados das nuvens de pontos para edificações individuais que seguirão para as etapas principais descritas na Figura 5. O controlador também reúne as respostas dos subprocessos para garantir a persistência de dados como uma sequência de entradas destinadas a compor o arquivo CityJSON final⁶. Eventuais falhas de processamento de uma edificação individual podem levar a diferentes tratamentos, desde a ausência do objeto em LoD 2 no resultado final, quando não há planos identificáveis, até a interrupção de processamento de um bloco inteiro, caso as premissas básicas de tratamento de dados fornecidos não sejam atendidas.

A fim de evitar perdas de blocos processados, foi elaborada uma rotina de verificação da qualidade individual dos polígonos de *footprint* fornecidos. Esta rotina extrai previamente dos blocos quaisquer registros que não atendam a um conjunto de regras de formação e alimenta um registro de *backlog*, anotando os indivíduos do cadastro que necessitem de revisão manual. Ao todo 1250 edificações distribuídas ao longo de todo o município, 0,08% do total, encontram-se neste registro.

A visualização dos modelos resultantes pode ser feita com diferentes ferramentas, como o QGIS, utilizando um *plugin* apropriado⁷, ou visualizadores otimizados para apresentação em navegadores web⁸. As saídas do modelo preservam identidade que pode ser utilizada para atualizar as bases pré-existentes. Contudo, a rotina de entrega dos resultados atualizados da pesquisa ainda requer a interface com interlocutores da Prefeitura da Cidade. Entende-se que a parte de consumo dos dados em LoD 2 está bem consolidada, mas espera-se que a análise da qualidade dos modelos gerados de forma automática possa ser melhorada. De igual forma, é recomendável que seja estabelecido um processo formal de atualização que atenda às especificidades municipais.

5 Discussão de resultados

Ao todo, com a soma de feições oferecidas ao *software* nos blocos pré-processados, já descontando feições do *backlog*, 1.593.006 polígonos de *footprint* foram processados. O número de edificações reconstruídas com sucesso soma 1.428.248 feições (89,6% do conjunto de dados de entrada). As feições resultantes são multiparte, isto é, cada feição no resultado final pode possuir um ou

⁶ A composição final requer os aplicativos de linha de comandos disponíveis em <https://github.com/cityjson/cjseq> e <https://github.com/cityjson/cjio>

⁷ Disponível em <https://plugins.qgis.org/plugins/CityJSON-loader>

⁸ Por exemplo, o visualizador disponível em <https://ninja.cityjson.org>

mais partes relacionadas às diferentes faces planares das coberturas. Fachadas foram desconsideradas na análise dos resultados em LoD 2.

Tabela 1: Distribuição das edificações segundo o número de águas

Número de águas	Total de edificações	Percentual (%)
Indefinido	164.758	10,34
1	411.829	25,85
2	364.061	22,85
3-5	478.453	30,03
6+	173.905	10,92

Fonte: Autores (2025)

A Tabela 1 contabiliza os resultados totais e percentuais, segundo o número de águas, faces das coberturas, observadas nas edificações processadas e assume-se “Indefinido” para edificações que não puderam ser reconstruídas em LoD 2. Para edificações com número de águas indefinido, pode-se ainda manter as feições em LoD 1 pré-existentes no cadastro da cidade ao viabilizar aplicações. Motivos comuns para a indefinição incluem a presença de *footprints* com faces individuais de áreas muito pequenas, áreas em oclusão ou falhas de classificação da nuvem de pontos.

Tabela 2: Forma predominante para descrever as coberturas das edificações

Classificação de coberturas	Total de edificações	Percentual (%)	RMS	
			Média	Desvio-padrão
Horizontal simples	286.317	17,97	0,207	0,351
Horizontal multiníveis	255.887	16,06	0,276	0,401
Inclinado	885.461	55,58	0,235	0,351
Desconhecido	165.341	10,38	—	—

Fonte: Autores (2025)

As feições resultantes são categorizadas de acordo com a classe predominante de inclinação das formas das coberturas segmentadas, conforme a Tabela 2. Esta taxonomia destaca edificações de coberturas horizontais simples, daquelas com múltiplos patamares horizontais e aquelas onde predominam faces inclinadas. A classe “Desconhecido” unifica edificações que não puderam ser disponibilizadas em LoD 2 ou que não podem ser adequadamente classificadas. As feições em LoD 2 estão focadas no detalhamento de coberturas e tipicamente, como no caso das rotinas implementadas pelo *roofer*, as fachadas resultam de extrusão. Da vista superior, é complexo descrever se há recuo de fachadas ou se há vazios nas construções devido à presença de estruturas em balanço. Logo, o convencional é o fechamento de prismas pela adição de planos verticais das bordas das coberturas até um nível médio de solo, omitindo informações a respeito da existência de beirais.

A forma dos telhados pode ainda ser descrita segundo a caracterização das adjacências de suas faces ou águas. Os tipos de telhados mais simples, na Figura 6 em perspectiva e projetados no plano, são os de uma águia (*flat* ou *shed*), com duas águas (*gable* ou *decoupled*) e com três ou mais águas (*half-hip*, *hip*, *pyramid*, *mansard* ou *complex*).

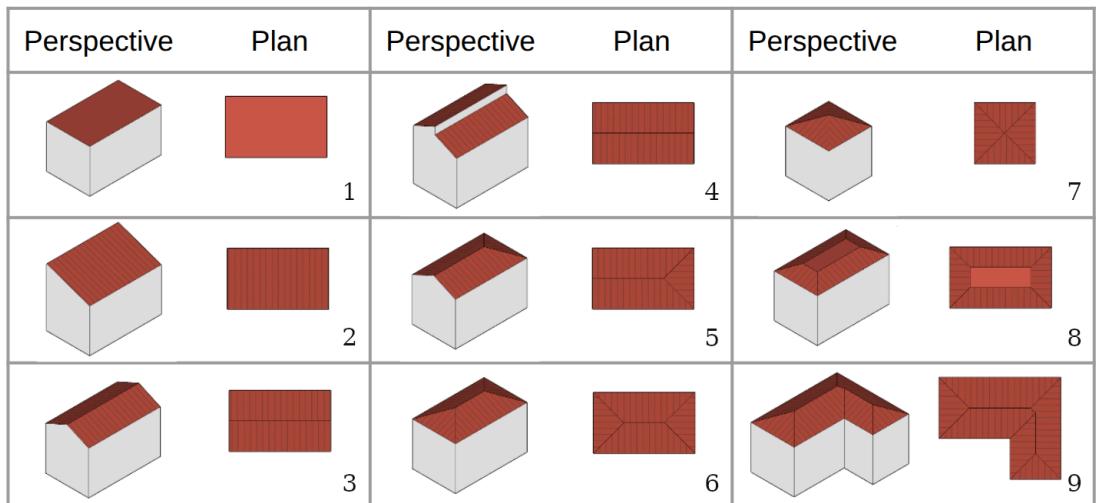


Figura 6: Tipos de coberturas das edificações em perspectiva e projeções no plano: 1) *flat*; 2) *shed*; 3) *gable*; 4) *decoupled*; 5) *half-hip*; 6) *hip*; 7) *pyramid*; e 9) *complex*.

Fonte: Adaptado de (Mohajeri *et al.*, 2018)

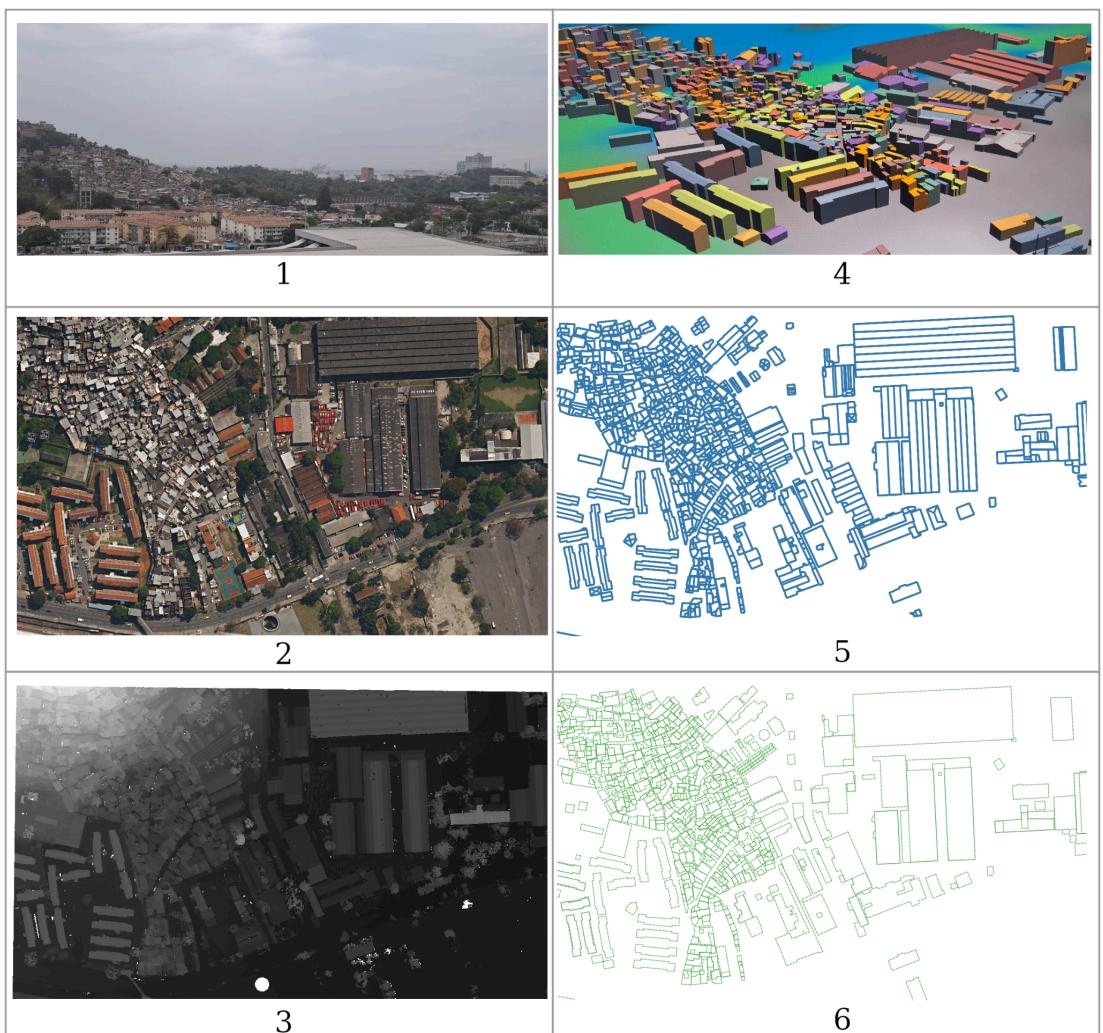


Figura 7: Visualização do modelo para um bloco nas imediações do bairro da Mangueira: 1) Fotografia da região em 2025; 2) Mosaico ortorretificado de 2019; 3) Nuvem de pontos LiDAR; 4) Visualização do modelo 3D de edificações no QGIS; 5) Vetorização em LoD 2; e 6) *Footprints* usados como entrada para individualização de edificações.

Fonte: Autores (2025)

Da análise exploratória, conforme ilustrado na Figura 7, é possível notar que o modelo identifica corretamente os tipos de telhados, principalmente em edifícios de tipos regulares. A abordagem utilizada favorece o atendimento de telhados complexos, mesmo quando superfícies curvas são aproximadas por vários segmentos planos. Todavia, a quantidade de pontos necessários para definir planos individuais faz com que a área total das faces individualizáveis das edificações modeladas, em seus diversos patamares, seja diretamente proporcional a qualidade da representação que pode ser alcançada pelo modelo de LoD 2 resultante. Isto se justifica, pois nas pequenas superfícies curvadas observam-se representações de baixa fidelidade, ao tempo que formas livres de grandes dimensões parecem favorecer o sucesso da modelagem.

Para verificação da qualidade foi solicitado a um especialista humano a rotulação de feições 2D nos mosaicos de 2019. Informações sobre as nuvens de pontos, sua classificação e os resultados do processamento foram omitidas nesta etapa para evitar enviesamento das amostras no *ground truth* (verdade do terreno) resultante. Contudo, a correção geométrica dos mosaicos está associada à nuvem de ponto LiDAR usada no processamento das feições em LoD 2, logo coordenadas planimétricas das feições rotuladas nos mosaicos estão co-registradas para um mesmo referencial. Assim, utilizando mosaicos como bases de vetorização a validação de segmentos de telhado pode ser feita diretamente em 2D. A Figura 8 demonstra a sobreposição dos limites de regiões rotuladas manualmente, em rosa tracejado, e regiões segmentadas pelo processo automatizado, em azul, sobre o mosaico de 2019.



Figura 8: Verificação da sobreposição de segmentos de telhados sobre o mesmo referencial.

Fonte: Autores (2025)

Desta forma foram restituídas ao todo 225 edificações, 116 com telhados de até 5 águas e 109 telhados complexos, distribuídas em 5 regiões distintas do município. Faces planas foram contabilizadas como "Acertos", quando observada correlação cruzada, isto é, toda vez que algum segmento do conjunto resultante pode ser associado a um único segmento do conjunto de referência. As áreas verdes na Figura 9, exemplificam segmentos com correlação cruzada. "Erros" foram contabilizados para faces incorretamente segmentadas em casos de subsegmentação ou sobresegmentação. As áreas em vermelho nos itens 1 e 2 da Figura 9 exemplificam estes casos. As "Omissões" resultam da soma de faces sem correspondência, nos casos em que porções das edificações deixaram de ser representadas nas regiões segmentadas automaticamente ou durante a rotulação manual para as edificações do conjunto sob análise (exemplificado pelas áreas em amarelo na Figura 9).



Figura 9: Exemplos de erros e omissões observados durante a correlação de segmentos: 1) Erros por subsegmentação; 2) Erro por sobresegmentação; e 3) Omissões.

Fonte: Autores (2025)

A Tabela 3 resume a avaliação qualitativa do processo ao individualizar os segmentos de coberturas. Não foram contabilizados neste estudo os desvios no limites dos segmentos projetados no plano, mas o conjunto de dados resultantes possui métricas de resíduo (erro médio quadrático, ou *root mean square*, RMS apresentado na Tabela 2) entre as faces de telhado modeladas e as nuvens de pontos usadas como entradas.

Tabela 3: Verificação da qualidade dos segmentos planos isolados

	Telhados de até 5 segmentos	Telhados complexos
Acertos	266	847
Erros	39	285
Omissões	74	75
Total de faces	379	1207

Fonte: Autores (2025)

A Figura 10 apresenta um comparativo da segmentação de telhados manual e automatizada. Os recortes do mosaico e a classificação da nuvem de pontos apoiam a elucidação das diferenças observáveis entre os conjuntos de vetores. Adotou-se marrom para solo, vermelho para edificações e verde para vegetação arbórea. Pontos desta última categoria não são usados durante o processamento, mas podem ajudar na análise dos resultados. Para edificações não rotuladas manualmente omitimos as feições análogas obtidas para de forma automatizada. Por sua vez, feições rotuladas que não puderam ser produzidas pelo método automatizado são evidenciadas no comparativo.

Os erros de modelagem observados com maior frequência derivam de pontos nas nuvens que foram incorretamente classificados, podendo ser de cobertura arbórea ou de alguma estrutura presente sobre o telhado. Baixa densidade de pontos ou oclusões geram buracos e podem provocar desvios nas bordas dos planos reconstruídos. Isto corrobora para o entendimento de que esforços para criar novos processos multimodais podem melhor aproveitar o conjunto de informações disponíveis para o município do Rio. Além disto, entradas auxiliares como a altitude estimada da base podem ser oferecidas utilizando informações dos catálogos pré-existentes e evitando erros grosseiros quando a área de amortecimento para coleta de pontos de solo é insuficiente em regiões com múltiplos edifícios aglomerados.

Logo, apesar de demonstrar que há potencial nos conjuntos de dados pré-existentes, também constata-se que há lacunas a serem resolvidas por estudos posteriores. Trabalhos futuros podem ainda considerar a revisão da classificação anterior da nuvem de pontos usando a informação semântica das imagens como referência. Esforços também considerados nesta linha de pesquisa incluem questões como atualizar a base planimétrica em simultâneo, ou em uma etapa de pré-processamento, para que nuvens de pontos mais recentes possam ser processadas com menor custo. Por fim, lacunas observadas no conjunto de resultados podem ser tratadas pela modelagem simultânea das incertezas de forma que possam ser selecionadas feições mais relevantes para revisão humana.

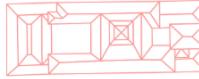
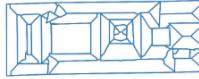
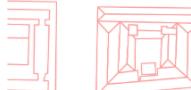
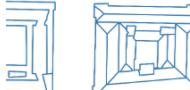
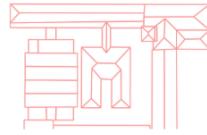
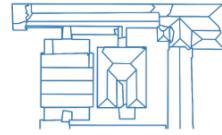
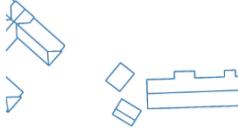
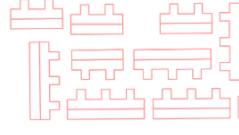
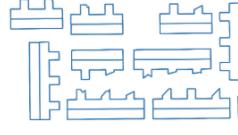
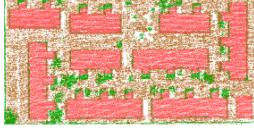
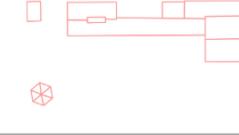
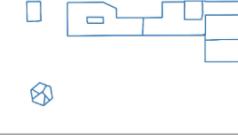
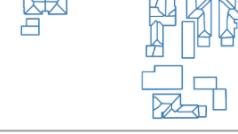
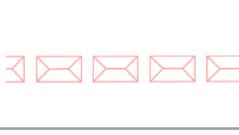
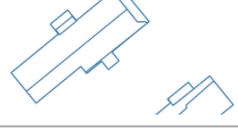
Mosaic	Human	Roofer	LiDAR
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			

Figura 10: Comparativo entre a segmentação de telhados manual e automatizada.
Fonte: Autores (2025)

6 Considerações finais

A proposta de processamento do conjunto de dados do município do Rio de Janeiro utilizando dados do ano de 2019 para gerar feições em LoD 2 provou-se factível. As contribuições deste trabalho incluem a seleção de dados em larga escala, compatibilização para viabilizar o processamento e avaliação da qualidade e fatores limitantes, além do ineditismo quando observado que o conjunto de algoritmos

utilizados vem sendo testado majoritariamente em cenários distintos do observado em cidades do Sul Global.

Da forma como foi idealizado, o fluxo de atividades não contempla a atualização de área plana construída ou a descoberta de novas edificações. Todavia, nada impede a extensão do mesmo com uma etapa preliminar para estas finalidades. De igual forma, o cadastro da prefeitura do Rio de Janeiro inclui dados de altimetria para base e topo atrelados às pegadas das feições espaciais das edificações que podem ser considerados como entrada para regiões com edificações aglomeradas.

Entende-se então que o potencial para aproveitamento de dados de levantamentos pré-existentes foi demonstrado. Contudo, sugere-se o complemento com investigações sobre os métodos de classificação das nuvens de pontos para refinamento dos dados de entrada ou possibilidades de atualização da abordagem de processamento para entradas multimodais.

Referências

- ANGRILL, Sara *et al.* Urban rainwater runoff quantity and quality – A potential endogenous resource in cities? **Journal of Environmental Management**, v. 189, p. 14–21, 2017. ISSN 0301-4797. DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.12.027.
- BILJECKI, Filip *et al.* Applications of 3D City Models: State of the Art Review. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 4, n. 4, p. 2842–2889, 2015. ISSN 2220-9964. DOI: 10.3390/ijgi4042842.
- BILJECKI, Filip; LEDOUX, Hugo; STOTER, Jantien. An improved LOD specification for 3D building models. **Computers, environment and urban systems**, Elsevier, v. 59, p. 25–37, 2016. DOI: 10.1016/j.compenvurbsys.2016.04.005.
- BRASIL. **Decreto nº 11.888 de 22 de janeiro de 2024**: Estratégia Nacional de Disseminação do Building Information Modelling no Brasil. Brasília, DF: Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços, 2024.
- BRASIL. **Lei nº 13.709 de 14 de agosto de 2018**: Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais (LGPD). Brasília, DF: Presidência da República, 2018.
- BUCCOLIERI, Riccardo; HANG, Jian. Recent Advances in Urban Ventilation Assessment and Flow Modelling. **Atmosphere**, v. 10, n. 3, 2019. ISSN 2073-4433. DOI: 10.3390/atmos10030144.
- FALCÃO, Jonatas Goulart M. *et al.* Unregulated Vertical Urban Growth Alters Microclimate: Coupling Building-Scale Digital Surface Models with High-Resolution Microclimate Simulations. **Smart Cities**, v. 8, n. 6, 2025. ISSN 2624-6511. DOI: 10.3390/smartcities8060191.
- GRAHAM, Lewis. The LAS 1.4 Specification. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 78, n. 2, 2012. ISSN 0099-1112.
- GRÖGER, Gerhard; PLÜMER, Lutz. CityGML – Interoperable semantic 3D city models. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 71, p. 12–33, 2012. ISSN 0924-2716. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2012.04.004.
- GUO, Haoran *et al.* A method for hierarchical weighted fitting of regular grid DSM with discrete points. **ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Copernicus Publications Göttingen, Germany, v. 10, p. 91–98, 2024. DOI: 10.5194/isprs-annals-X-1-2024-91-2024.
- HAO, Lechuan; ZHANG, Ye; CAO, Zhimin. Building extraction from stereo aerial images based on multi-layer line grouping with height constraint. **2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)**. [S.I.], 2016. P. 445–448. DOI: 10.1109/IGARSS.2016.7729110.
- HIRSCHMÜLLER, Heiko. Semi-global matching-motivation, developments and applications. **Photogrammetric Week 11**, Wichmann, p. 173–184, 2011. Disponível em: <<https://elib.dlr.de/73119/>>.

ISMAEL, Rojgar Qarani; SADEQ, Haval. LoD2 Building Reconstruction from Stereo Satellite Imagery using Deep Learning and Model-Driven Approach. **Zanco Journal of Pure and Applied Sciences**, v. 37, n. 2, p. 103–118, 2025. Disponível em: <<https://zancojournal.su.edu.krd/index.php/JPAS/article/view/3140>>.

KRAPF, S. et al. RID—Roof Information Dataset for Computer Vision-Based Photovoltaic Potential Assessment. **Remote Sensing**, v. 14, n. 10, 2022a. ISSN 2072-4292. DOI: 10.3390/rs14102299.

KRAPF, S. et al. Deep Learning for Semantic 3D City Model Extension: Modeling Roof Superstructures Using Aerial Images for Solar Potential Analysis. **ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Copernicus GmbH, v. 10, 4/W2-2022, p. 161–168, out. 2022b. ISSN 2194-9042. DOI: 10.5194/isprs-annals-X-4-W2-2022-161-2022.

LUSSANGE, Johann et al. KIBS: 3D detection of planar roof sections from a single satellite image. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 220, p. 207–216, 2025. ISSN 0924-2716. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2024.11.014.

MOHAJERI, Nahid et al. A city-scale roof shape classification using machine learning for solar energy applications. **Renewable Energy**, v. 121, p. 81–93, 2018. ISSN 0960-1481. DOI: 10.1016/j.renene.2017.12.096.

MOHAMMADI, Hamid; SAMADZADEGAN, Farhad; REINARTZ, Peter. 2D/3D information fusion for building extraction from high-resolution satellite stereo images using kernel graph cuts. **International Journal of Remote Sensing**, Taylor & Francis, v. 40, n. 15, p. 5835–5860, 2019. DOI: 10.1080/01431161.2019.1584417.

PAIVA, Gabriel M.; BADOLATO, Irving S.; COELHO, Luiz Carlos T. Segmentação de Cobertura Arbórea em Área Urbana Sobre Ortoimagens RGB-NIR. [S.I.]: Zenodo, nov. 2024. DOI: 10.5281/zenodo.14003436.

PETERS, Ravi et al. Automated 3D reconstruction of LoD2 and LoD1 models for all 10 million buildings of the Netherlands. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, American Society for Photogrammetry e Remote Sensing, v. 88, n. 3, p. 165–170, 2022. DOI: 10.14358/PERS.21-00032R2.

ROBINSON, Darren; STONE, Andrew. Irradiation modelling made simple: the cumulative sky approach and its applications. In: PLEA conference. [S.I.: s.n.], 2004. P. 19–22.

SEILOV, Sh Zh et al. The concept of building a network of digital twins to increase the efficiency of complex telecommunication systems. **Complexity**, Wiley Online Library, v. 2021, n. 1, p. 9480235, 2021.

STOTER, Jantien et al. Automated reconstruction of 3D input data for noise simulation. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 80, p. 101424, 2020. ISSN 0198-9715. DOI: 10.1016/j.compenvurbsys.2019.101424.

SUN, Xiaokai et al. Semantic Segmentation and Roof Reconstruction of Urban Buildings Based on LiDAR Point Clouds. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 13, n. 1, 2024. ISSN 2220-9964. DOI: 10.3390/ijgi13010019.

TOPOCART AEROLEVANTAMENTOS. **Relatório de execução de mapeamento aerofotogramétrico do município do Rio de Janeiro por mosaicos de ortoimagens digitais coloridas obtidas por plataforma aérea e ortorretificadas de acordo com elevações (“True Ortho”); modelo digital de elevações e modelo digital do terreno por perfilamento a LASER**. Brasília, Brasil, 2019.

VERMA, V.; KUMAR, R.; HSU, S. 3D Building Detection and Modeling from Aerial LIDAR Data. In: **2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition** (CVPR'06). [S.I.: s.n.], 2006. v. 2, p. 2213–2220. DOI: 10.1109/CVPR.2006.12.

WANG, Chen; HOU, Jingming et al. Flood risk management in sponge cities: The role of integrated simulation and 3D visualization. **International Journal of**

Disaster Risk Reduction, v. 39, p. 101139, 2019. ISSN 2212-4209. DOI: 10.1016/j.ijdrr.2019.101139.

WANG, Ruisheng. 3D building modeling using images and LiDAR: a review. **International Journal of Image and Data Fusion**, Taylor & Francis, v. 4, n. 4, p. 273–292, 2013. DOI: 10.1080/19479832.2013.811124.

WANG, Ruisheng; PEETHAMBARAN, Jiju; CHEN, Dong. LiDAR Point Clouds to 3-D Urban Models: A Review. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 11, n. 2, p. 606–627, 2018. DOI: 10.1109/JSTARS.2017.2781132.

WYSOCKI, Olaf *et al.* Reviewing Open Data Semantic 3D City Models to Develop Novel 3D Reconstruction Methods. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 48, p. 493–500, 2024. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-2024-493-2024.

Sobre os Autores

Irving da Silva Badolato é professor assistente da Faculdade de Engenharia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (FEN/UERJ), lotado no Departamento de Engenharia Cartográfica (CARTO) desde 2016, membro do Laboratório de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto (LFSR) e desenvolvedor de software livre para educação em fotogrametria digital. Graduou-se em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas e Computação pela mesma instituição em 2010 e obteve o título de Mestre em Ciências de Computação e Engenharia de Sistemas pela COPPE/UFRJ em 2014. Está cursando doutorado pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências Computacionais e Modelagem Matemática do Instituto de Matemática e Estatística da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (IME/UERJ).

Guilherme Lucio Abelha Mota graduou-se em Engenharia de Sistemas e Computação pela UERJ em 1997 e obteve o mestrado em 2000 e o doutorado em 2004 em Engenharia Elétrica pela PUC-Rio. Durante o doutorado, realizou um estágio com Bolsa Sanduíche na Universidade Leibniz Hannover na Alemanha. Trabalha desde 1996 na área de computação gráfica, sobretudo em processamento, análise e classificação de imagens e visão computacional. Atua na UERJ como professor do Departamento de Informática e Ciência da Computação e no Programa de Pós-Graduação em Ciências Computacionais e Modelagem Matemática, liderando pesquisas envolvendo aprendizagem profunda para visão computacional. É membro do IEEE GRSS, da ISPRS, da SELPER e da ACEBRA.

Gilson Alexandre Ostwald Pedro da Costa é Doutor em Engenharia Elétrica pela PUC-Rio (2009), com parte do doutorado na Universidade Leibniz de Hannover, Alemanha. Graduado em Engenharia de Computação (PUC-Rio, 1991) e Mestre em Engenharia de Computação com ênfase em Geomática (UERJ, 2003), realizou pós-doutorados na PUC-Rio (2010–2015) e no Instituto de Fotogrametria e Geoinformação (IPI) da Universidade Leibniz de Hannover (2019–2020). É Professor Associado da UERJ, no Departamento de Informática e Ciência da Computação, e Coordenador do PPG em Ciências Computacionais e Modelagem Matemática do IME/UERJ. Possui mais de 100 publicações e atua em Análise de Imagens e Visão Computacional aplicadas ao Sensoriamento Remoto, com foco em detecção de desmatamento. É membro da ISPRS, IEEE GRSS Brasil e SELPER.

Contribuições dos Autores

Conceituação, [I.S.B., G.L.A.M., G.A.O.P.C.]; metodologia, [I.S.B., G.L.A.M., G.A.O.P.C.]; software [I.S.B.]; curadoria de dados, [I.S.B.]; redação—preparação do rascunho original, [I.S.B.]; redação—revisão e edição [G.L.A.M.; G.A.O.P.C.]; supervisão, [G.L.A.M.; G.A.O.P.C.]; aquisição de financiamento, [G.L.A.M.;

G.A.O.P.C.]. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

Financiamento

Esta pesquisa foi financiada pela Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro – FAPERJ, que concedeu recursos para a adequação de infraestrutura laboratorial e aquisição de equipamentos de computação.

Disponibilidade de Dados

Os dados para esta pesquisa estão disponíveis através do portal de dados abertos da Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro, nos portais oficiais do Instituto Municipal de Urbanismo Pereira Passos e através de cessões institucionais em conformidade com a portaria IPP nº 53 de 3 de dezembro de 2010.

Agradecimentos

Os autores reconhecem as contribuições da Arquiteta e Urbanista, Michelle Costa da Silva, pela consultoria em terminologia de telhados e rotulação de dados, do Instituto Pereira Passos e da Coordenadoria de Informações da Cidade, pela cessão dos dados e esclarecimentos sobre o modelo vigente, e do grupo de pesquisa em geoinformação 3D da Universidade de Tecnologia de Delft, pelo desenvolvimento e compartilhamento de programas adotados nos processos descritos neste estudo.

Conflitos de Interesse

Os autores declaram não haver conflitos de interesse.

Sobre a Coleção Estudos Cariocas

A Coleção Estudos Cariocas (ISSN 1984-7203) é uma publicação de estudos e pesquisas sobre o Município do Rio de Janeiro, vinculada ao Instituto Pereira Passos (IPP) da Secretaria Municipal da Casa Civil da Prefeitura do Rio de Janeiro.

Seu objetivo é divulgar a produção técnico-científica sobre temas relacionados à cidade do Rio de Janeiro, bem como sua vinculação metropolitana e em contextos regionais, nacionais e internacionais. Está aberta a quaisquer pesquisadores (sejam eles servidores municipais ou não), abrangendo áreas diversas - sempre que atendam, parcial ou integralmente, o recorte espacial da cidade do Rio de Janeiro.

Os artigos também necessitam guardar coerência com os objetivos do Instituto, a saber:

1. Promover e coordenar a intervenção pública sobre o espaço urbano do Município;
2. Prover e integrar as atividades do sistema de informações geográficas, cartográficas, monográficas e dados estatísticos da Cidade;
3. Subsidiar a fixação das diretrizes básicas ao desenvolvimento socioeconômico do Município.

Especial ênfase será dada no tocante à articulação dos artigos à proposta de desenvolvimento econômico da cidade. Desse modo, espera-se que os artigos multidisciplinares submetidos à revista respondam às necessidades de desenvolvimento urbano do Rio de Janeiro.