



Cartografia Histórica em 3D e Realidade Virtual: uma metodologia de baixo custo

3D Historical Cartography and Virtual Reality: a low-cost methodology

Bernardo da Cunha Carvalho de Mello¹, Juliana Moulin Fosse², Alan José Salomão Graça³, Luís Augusto Koenig Veiga⁴

¹ Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, Brasil. bernardo.dacunhacm@gmail.com.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9138-8255>

² Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, Brasil. jumoulin@ufrj.br.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4221-781X>

³ Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil. alan.salomao@eng.uerj.br.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0580-6746>

⁴ Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil. kngveiga@ufpr.br.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4026-5372>

Recebido: 03.2024 | Aceito: 07.2024

Resumo: O propósito do presente artigo é o desenvolvimento de um fluxo de trabalho metodológico, empregando soluções de baixo custo para a realização da modelagem tridimensional paramétrica de edificações e objetos pertencentes ao patrimônio histórico-cultural e material. No contexto da Cartografia Histórica, o objetivo deste trabalho é promover a divulgação e preservação do Patrimônio Histórico com o uso da Realidade Virtual, proporcionando uma abordagem interativa, imersiva e dinâmica. Como exemplo, foi usada uma edificação militar, que foi construída no século XIX. Esta edificação foi modelada em 3D a partir de sua planta topográfica original e implementada em Realidade Virtual para a sua visualização. A metodologia usada empregou dados cartográficos obtidos a partir da planta topográfica original da edificação e de fotografias de campo atuais, para gerar respectivamente o modelo tridimensional paramétrico e sua texturização, de forma a se assemelhar à estrutura original. A partir do modelo 3D da edificação, criou-se um aplicativo de Realidade Virtual para o sistema Android, por meio do motor gráfico Unity e ferramentas de programação do console Google API. Os resultados obtidos, foram adaptados para visualização e navegação com o auxílio de uma solução de óculos de realidade virtual de baixo custo.

Palavras-chave: Modelagem Tridimensional. Cartografia 3D. Realidade Virtual. Patrimônio Histórico-Cultural.

Abstract: The purpose of this article is to develop a methodological workflow, using low-cost solutions to carry out parametric three-dimensional modeling of buildings and objects belonging to historical-cultural and material heritage. In the context of Historical Cartography, the objective of this work is to promote the dissemination and preservation of Historical Heritage through the use of Virtual Reality, thus providing an interactive, immersive and dynamic approach. As an example, a military building was used, which was built in the 19th century. This building was modeled in 3D based on its original topographic plant and implemented in Virtual Reality for visualization. The applied methodology used cartographic data obtained from the original topographic plant of the building and current scenario photographs, to respectively generate the parametric three-dimensional model and its texturing, in order to resemble the original structure. From the 3D model of the building, a Virtual Reality application was created for the Android system, using the Unity graphics engine and programming tools from the Google API console. The obtained results were adapted for visualization and navigation with the aid of a low-cost virtual reality glasses solution.

Keywords: 3D Modelling. 3D Cartography. Virtual Reality. Cultural Heritage.

1 INTRODUÇÃO

No começo dessa década, as restrições de viagem, os confinamentos nacionais impostos (de forma total ou parcial) e o absentismo por doença responderam como efeitos notórios da pandemia do COVID-19, com impactos sociais e econômicos significativos. Mesmo que de forma descentralizada, a adoção de medidas de distanciamento social em estados e municípios brasileiros, repercutiram no acesso ao patrimônio cultural, no ensino, no turismo, lazer e nas formas presenciais de interação com a cultura (Brito et al., 2023; Botto et al., 2022; Gaberli, 2022; Nascimento, 2020; Neca; Rechia, 2020). A exemplo de outros países, esses setores tiveram de encontrar novas formas de envolver o público, uma vez que os deslocamentos e as viagens estavam, em grande parte, restritos (Botto et al., 2022; Theodoropoulos; Antoniou, 2022).

Refletindo sobre essa problemática imposta pelo “fique em casa” (Brito et al. 2023; Neca; Rechia, 2020), a Realidade Virtual (RV) representa uma das alternativas que possibilita transportar o usuário virtualmente a esses espaços, gerando ambientes digitais que proporcionam ao público especialista e não-especialista a experiência de interatividade e imersão em espaços semelhantes à realidade percebida (Bagher et al., 2023; Botto et al., 2023; Cheng et al., 2022; Pinto; Centeno, 2012; Fosse; Veiga, 2006). Nos últimos anos, a luz da Indústria 4.0, tecnologias RV tornaram-se mais baratas e poderosas o suficiente para atingir um público muito mais amplo (Graça et al., 2021; Walmsley; Kersten, 2019). Este desenvolvimento apresenta novas e estimulantes oportunidades para as instituições responsáveis pelo patrimônio cultural, como os museus, sítios arqueológicos e edificações do patrimônio histórico-cultural, que procuram envolver novos públicos através das suas coleções, artefatos históricos, particularidades arquitetônicas e acervos (Ackerman et al., 2023; Chong et al., 2022; Theodoropoulos; Antoniou, 2022; Walmsley; Kersten, 2019; Fritsch; Klein, 2017; Remondino, 2011).

Aliada à modelagem 3D, a RV apresenta-se como uma ferramenta de elevado potencial para o entendimento da Cartografia e suas aplicações, fornecendo soluções eficientes para lidar com cenas complexas, através de novas ferramentas e novas fontes de dados para representar modelos realísticos, ou extensões da realidade com dados digitais ou a reconstituição de paisagens pretéritas (Bagher et al., 2023; Tsou; Mejia, 2023; Chong et al., 2022; Gatta; Arioti; Bitelli, 2017; Fosse; Veiga, 2006). A reconstrução digital de locais históricos tornou-se uma aplicação relevante para a Geomática, que fornece insumos para a conservação do patrimônio cultural, através de levantamentos, da modelagem e do imageamento tridimensional de objetos (Ackerman et al., 2023; Graça et al., 2021; Walmsley; Kersten, 2019; Gatta; Arioti; Bitelli, 2017; Remondino, 2011). Essa reconstrução pode resultar em modelos virtuais foto realísticos, como também em modelos paramétricos não foto realísticos (Ackerman et al., 2023; Günay, 2019; Gavette; Page-Schmit, 2018; Döllner, 2007).

Em contextos de RV e Realidade Aumentada (RA) na Cartografia, os utilizadores têm a capacidade de interagir com ambientes tridimensionais, aprimorando a compreensão das relações espaciais dos objetos representados (Tsou; Mejia, 2023; Cheng et al., 2022; Herman; Kvarda; Stachoň, 2018). Nesse cenário, o produto cartográfico proporciona uma experiência de aprendizado mais intuitiva, facilitando a exploração do conhecimento, a compreensão da modelagem e o domínio sobre o objeto de estudo em ambientes imersivos (Bagher et al., 2023; Cheng et al., 2022). E sob a ótica da Geovisualização, experiências de imersividade na Cartografia envolvem tanto os pontos de vista da cognição espacial baseada em mapas, quanto na expressão visual e função interativa do design (Bagher et al., 2023; Cheng et al., 2022; Çöltekin et al., 2017; Montello, 2009; Döllner, 2007).

No primeiro ponto de vista, as representações cartográficas influenciam a percepção e o pensamento espacial, relacionando a atividade psicológica do usuário com a forma como o mapa é usado, um processo cognitivo que pode fornecer suporte teórico para melhorar a representação e compreensão da geoinformação, contribuindo para eficácia e usabilidade dos produtos cartográficos (Chong et al., 2022; Çöltekin et al., 2017; Montello, 2009). Com relação a outra corrente de pensamento, a teoria da expressão e comunicação da informação geográfica é a base comum da investigação existente sobre o design de mapas, que merece uma consideração para além das discussões sobre emprego de variáveis visuais em ambientes digitais, projeto gráfico dos mapas e simbolização em representações tridimensionais (Limberger et al., 2023; Halik, 2012; Fosse; Veiga, 2006). A visualização 3D em RV e RA, obtida através da utilização de diferentes tecnologias

digitais, pode promover funções de interação, audiência, reconhecimento, imersividade e “gameficação” sobre ambientes tridimensionais, perspectivas essas que ainda podem ser expandidas para além da tecnologia, envolvendo fatores socioculturais que possibilitam a reconstrução de relações espaciais e temporais em representações cartográficas (Tsou; Mejia, 2023; Zawadzki, 2022; Walmsley; Kersten, 2019; Fritsch; Klein, 2017; Balletti; Guerra, 2016; Halik, 2012). Funções desenvolvidas para essas multimídias virtuais abrem caminhos possíveis para o aprimoramento do design de produtos cartográficos interativos, bem como possibilitam a avaliação da usabilidade desses produtos.

Nos dois pontos de vista, estudos mais avançados (que estão além dos propósitos da presente pesquisa), mencionam teoricamente ou propõem experimentos práticos para cartógrafos se utilizarem de novas “pistas visuais” na representação ambientes virtuais dinâmicos subsidiados por tecnologias imersivas (Bagher et al., 2023; Limberger et al., 2023; Tsou; Mejia, 2023; Cheng et al., 2022; Halik, 2012). Essas pesquisas científicas tratam de representações cartográficas em realidades expandidas, trabalhando com mapeamentos 3D/4D, exploração de padrões espaço-temporais e associações entre objetos, emprego do “Metaverso” como inspiração/metáfora científica para criar aplicativos SIG web, e o design centrado no usuário (User Centred Design - UCD) visando captar suas experiências em ambientes imersivos (Bagher et al., 2023; Tsou; Mejia, 2023; Chong et al., 2022; Herman; Kvarda; Stachoň, 2018).

Por outro lado, a análise de plantas e mapas históricos possibilita a reconstrução e compreensão da configuração atual de paisagens culturais, revelando as marcas e nuances deixadas no passado (Ackerman et al., 2023; Zawadzki, 2022). Isso permite uma avaliação crítica da sua dinâmica evolutiva a partir dos artefatos culturais contidos nesses documentos (Balletti; Guerra, 2016; Lafreniere; Rivet, 2010). A Cartografia Histórica traz consigo informações valiosas sobre arranjos geográficos, culturas e as paisagens de épocas passadas, que muitas vezes não podem ser encontradas em outras fontes escritas, como, por exemplo, topônimos, limites e características físicas de feições que foram alteradas ou completamente apagadas pelo tempo (Fiorini; Friso; Balletti, 2022; Gavette; Page-Schmit 2018; Balletti; Guerra, 2016; Hájek et al., 2013). No campo de investigações da Cartografia Histórica, produtos cartográficos como mapas, cartas, plantas e diagramas (quanto existentes) constituem uma base factual para uma análise diacrônica de uma cidade (Lafreniere; Rivet, 2010). Essas podem tornar a informação cartográfica mais acessível e os ambientes geográficos intuitivamente mais compreensíveis (Balletti; Guerra, 2016).

Este artigo mostra um processo de visualização cartográfica 3D de dados espaciais em mapas históricos, a fim de reconstituir um patrimônio arquitetônico perdido, empregando para isto a utilização de diferentes tecnologias digitais. Seu domínio científico na interface com a Cartografia Histórica embasou-se nos trabalhos de Tytarenko, Pavlenko e Dreval (2023), Fiorini, Friso e Balletti (2022), Janovský, Tobiáš e Cehák (2022), Morlighem, Labetski e Ledoux (2022), Günay (2019), Gavette e Page-Schmit (2018), Herman, Kvarda e Stachoň (2018) Fritsch e Klein (2017), Gatta, Arioti e Bitelli (2017), Hájek et al. (2013).

O objetivo desse artigo foi gerar uma metodologia de modelagem tridimensional reaplicável, mostrando como tecnologias de baixo-custo podem ser empregadas para criar um ambiente de realidade virtual interativo e imersivo. A visualização 3D foi obtida usando modelagem paramétrica não foto realística em CAD (Computer Aided Design) adotando majoritariamente dados oriundos de documentos cartográficos históricos com tecnologias imersivas RV para smartphones (Bagher et al., 2023; Tytarenko; Pavlenko; Dreval, 2023; Herman; Kvarda; Stachoň, 2018; Döllner, 2007). Para obter um produto de baixo custo foram exploradas alternativas tecnológicas como softwares livres e/ou comerciais com licenças educacionais, óculos rift de baixo custo em sites de e-commerce, e soluções em programação gratuitas voltadas para aplicações em sistemas operacionais Android.

Como área teste para os experimentos propostos nesse artigo foi escolhida o Forte do Raio, uma importante fortificação na época do Brasil Imperial, que desempenhava a função de proteger o caminho por terra entre as vilas de Mangaratiba e Itaguaí, e a costa litorânea do Rio de Janeiro (De Souza, 1885). No ano de 2018, o forte foi redescoberto por pesquisadores, e iniciou-se um processo, junto ao Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN), para que ele se torne um sítio arqueológico, dada sua importância histórica no contexto regional (Mello, 2018). O produto cartográfico gerado para essa fortificação, possibilitou o reconhecimento de formas e feições pretéritas, reconstituídas digitalmente e acessíveis às pessoas de forma remota.

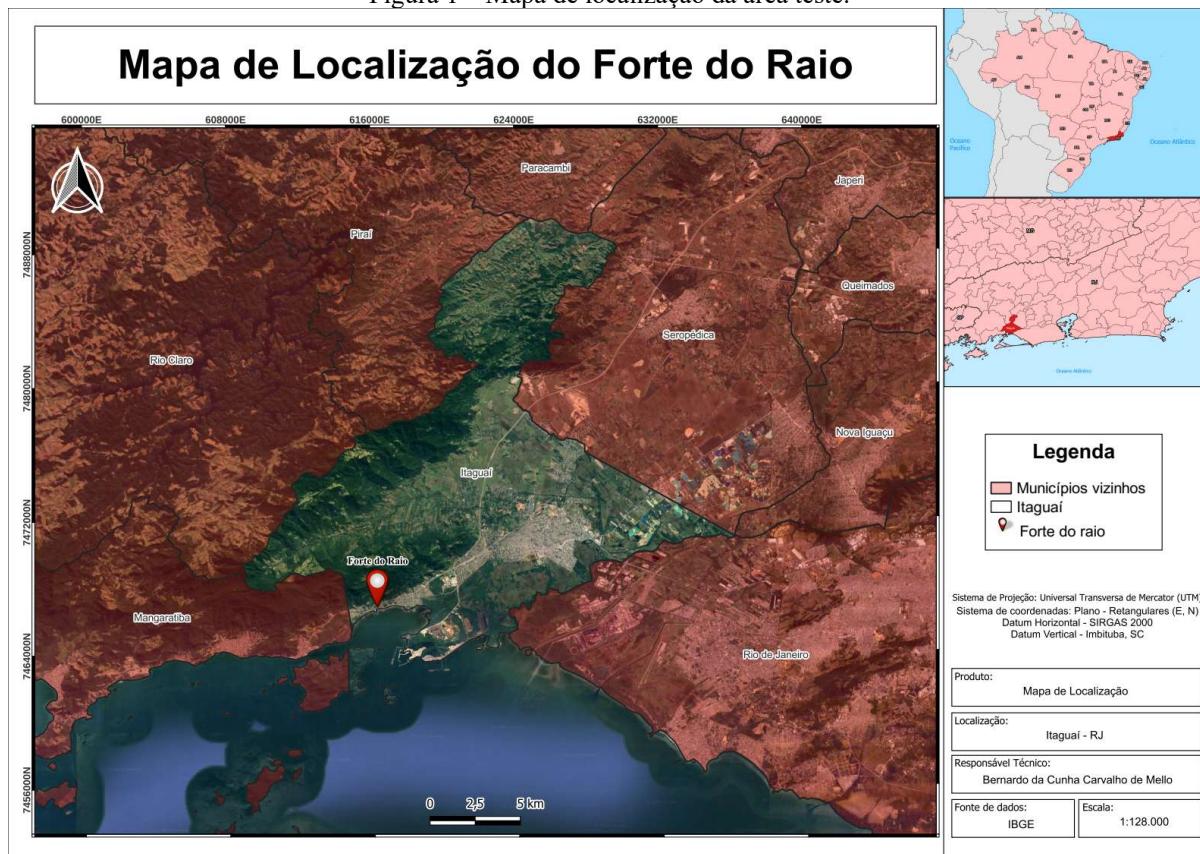
2 MATERIAL E MÉTODOS

A fim de cumprir com os objetivos propostos, a metodologia do trabalho foi estruturada para que usuários pudessem dispor de um produto cartográfico operável em *smartphones Android* disponíveis no mercado. Almeja-se com isso, uma promoção do patrimônio histórico-material através de um *tour virtual* com boa qualidade visual, academicamente reaplicável e acessível ao público em geral (Ackerman et al., 2023; Fiorini; Friso; Balletti, 2022; Janovský; Tobiáš; Cehák, 2022; Luo et al., 2018; Fritsch; Klein, 2017; Pinto; Centeno, 2012; Fosse; Veiga, 2006).

2.1 Definição de uma área teste para o experimento

Para a modelagem tridimensional no *Sketchup* foi escolhido o Forte do Raio como edificação, situado no bairro de Coroa Grande, no município de Itaguaí, no estado do Rio de Janeiro, na região conhecida como Costa Verde, que abrange a baía de Sepetiba (Figura 1). Segundo Mello (2018), estima-se que a construção da fortificação tenha sido por volta do ano de 1822. Durante o período Imperial do Brasil, desempenhou um papel crucial como uma construção defensiva nos arredores de sua capital. A principal função dessa fortificação era proteger a rota de ligação entre a vila de São Francisco Xavier de Itaguaí e a freguesia de Nossa Senhora da Guia de Mangaratiba, que hoje correspondem às cidades de Itaguaí e Mangaratiba, respectivamente, além da costa litorânea do Rio de Janeiro (De Souza, 1885). Em um estado lamentável de conservação, o forte foi redescoberto em 2018, restando apenas ruínas do que um dia foi uma imponente fortaleza (Mello, 2018).

Figura 1 – Mapa de localização da área teste.



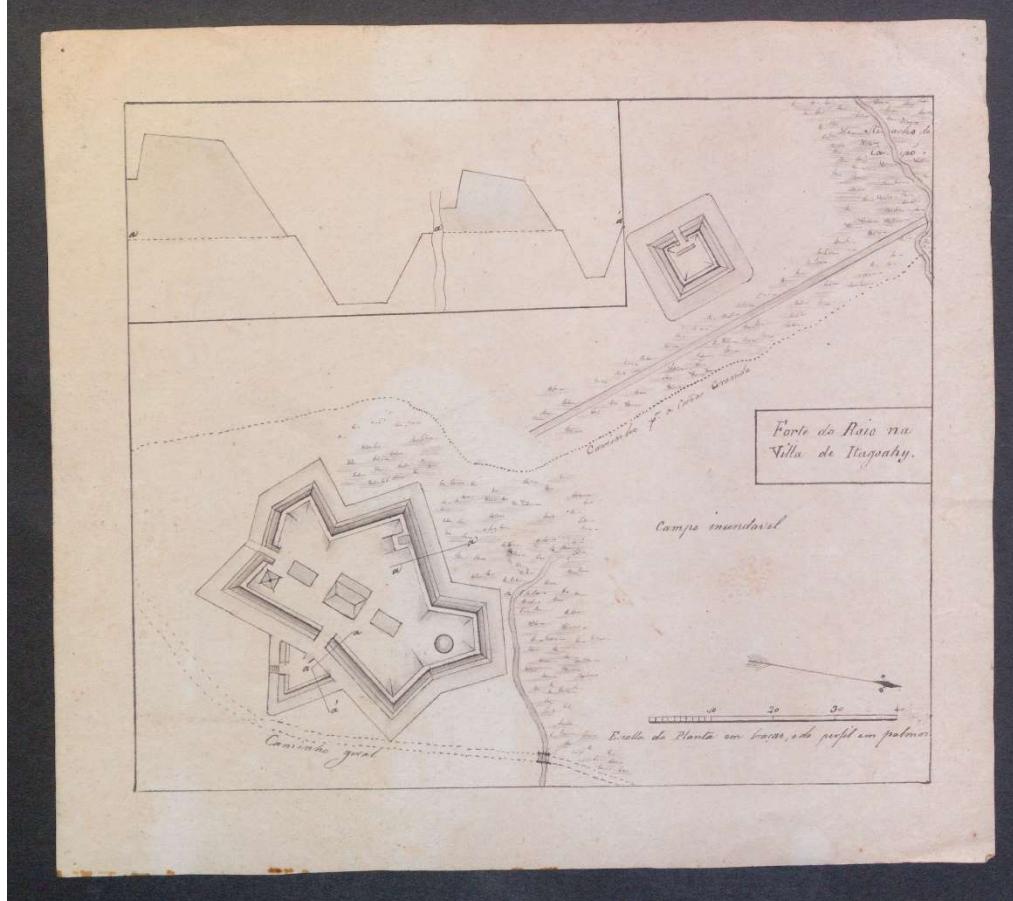
Fonte: Os autores (2024).

2.2 Material utilizado

Como principal fonte documental de dados espaciais utilizou-se a planta topográfica original do Forte do Raio (Figura 2), em pose do Arquivo Histórico Militar Português (registro código PT/AHM/DIV/3/47/AV2/3563). Intitulada “Forte do Raio na Villa de Itagoahy”, este produto cartográfico

apresenta junto a sua escala a informação “Escalla da Planta em braças, e do perfil em palmos”, visto que Portugal só aderiu o sistema métrico internacional em 1852, ainda de forma gradual (Marques, 2001). Com a imagem digitalizada em TIFF (2823x2541 pixels), foi possível obter as dimensões da geometria das feições externas e internas da fortificação, suas formas e os acidentes geográficos presentes no entorno do sítio, bem como a altura das edificações em relação ao terreno, fornecidas pelo perfil de elevação contido na Figura 2.

Figura 2 – Produto cartográfico digitalizado a partir da planta original “Forte do Raio na Villa de Itagoahy”.



Fonte: Arquivo Histórico Militar Português (2022).

Com o propósito de reconhecer a estrutura da edificação e verificar as dimensões reais com a escala gráfica na qual a fortificação foi representada (em unidades de braças), incluindo a escala vertical adotada (em unidades de palmos), foi conduzida uma visita de campo às ruínas do Forte do Raio. Assim, a localidade fora visitada em um trabalho de campo realizado em 2022. Realizou-se um registro fotográfico no local e efetuou-se medidas manuais com trena, para fins de comparação com a planta topográfica original, bem como para auxiliar na modelagem 3D. Seu intuito do registro fotográfico foi auxiliar a reconstituição de texturas e formas geométricas peculiares à edificação investigada, semelhante às pesquisas de Zawadzki (2022) e Hájek et al. (2013).

O perfil de elevação do terreno, não apresenta de forma clara a altura da muralha, sendo assim, fez-se uma média aritmética simples das alturas encontradas, obtendo o valor de 4 metros de altura. Por meio do registro fotográfico, tornou-se possível formular as conjecturas aproximadas para detalhar a estrutura e as fachadas da fortificação (Zawadzki, 2022). Dado o estágio avançado de deterioração das ruínas, essas fotografias não tornam possível a reconstituição de ornamentos específicos.

Combinado às informações de campo e da planta topográfica, foram adotadas fontes secundárias de leituras sobre fortificações brasileiras como De Souza (1885) e o registro de tombamento elaborado por Mello (2018). A base cartográfica do município de Itaguai, cuja altimetria está representada por curvas de nível com equidistância de 5 metros foi coletada na Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE) na base do IBGE, e recortada para a região do entorno da fortificação. Informações referentes às feições planimétricas do entorno foram coletadas empregando-se o software *Google Earth Pro* (Luo et al., 2018).

Essas imagens foram discutidas em uma entrevista com historiador Eduardo Vieira, descobridor do sítio arqueológico da fortificação, para assim obter maiores conhecimentos conjecturais sobre o terreno à época. Uma das contribuições da entrevista com o historiador foi a remodelação da região em razão da realização de diversos aterros na região ao longo dos anos.

Quanto às soluções tecnológicas utilizadas, além do *software Google Earth Pro*, foram utilizados:

- a) o *software* livre de código aberto *QGIS*, versão 3.20, para a realização das análises cartométricas sobre a planta da fortificação, em conjunto com a visualização de feições com o uso do mapa base (*openlayer*) do Google Earth (Lafreniere; Rivet, 2010);
- b) Autodesk AutoCAD Civil 3D 2019, versão educacional, para a geração dos vetores de curvas de nível, planta digital e inserção das dimensões lineares obtidas em planta em campo (Tytarenko; Pavlenko; Drevall, 2023; Günay, 2019);
- c) o software Blender, versão estudantil 2.93, para a modelagem paramétrica da fortificação (Herman; Kvarda; Stachoň, 2018);
- d) o firmware Trimble Sketchup Pro 2019, adotado para construir o modelo digital de terreno texturizar tanto o esse MDT como o modelo 3D da edificação, criando por fim, a representação cartográfica da região (Zawadzki, 2022; Günay, 2019; Gavette; Page-Schmit, 2018);
- e) motor gráfico (gaming engine) Unity, versão 2018.3.3f1, disponibilizado livremente em website próprio para a construção do ambiente de navegação em RV (Bagher et al., 2023);
- f) o software gratuito Microsoft Visual Studio 2019, que contém os códigos de programação adaptáveis para a navegação com os sensores de movimento (giroscópios e acelerômetros) do smartphone (Sampaio; Veiga; Alves, 2023);
- g) o plugin Android Support, que possibilita criar um aplicativo para smartphones com sistema operacional Android (Kanchana; Sindhya, 2021);
- h) um smartphone nas versões 11 e 12 do sistema Android, utilizado para os testes do aplicativo em RV;
- i) e um headset com joystick de baixo custo, da marca VR BOX (Herman; Kvarda; Stachoň, 2018; Coburn; Freeman; Salmon, 2017).

2.3 Geração das representações cartográficas

2.3.1 REPRESENTAÇÃO DAS INFORMAÇÕES PLANIMÉTRICAS

As medidas da planta topográfica da fortificação foram analisadas por meio de *softwares* de SIG e CAD, respeitando a escala obtida em campo (Janovský; Tobiáš; Cehák, 2022). A criação do mapa de situação, utilizou a base de municípios em formato vetorial disponível no geoportal da INDE, em conjunto com o mapa base o *openlayer Google Earth Satellite*. As coordenadas da fortificação foram obtidas de forma indireta, fazendo uso do *software Google Earth Pro*, com opção do sistema de coordenadas UTM (Luo et al., 2018). Essas coordenadas foram inseridas como nova camada de pontos do *QGIS*, versão 3.20, em conjunto com as camadas citadas, todas reprojetadas para o elipsoide de codificação EPSG:3857 (muito próximo do SIRGAS2000), voltada para os sistemas projetivos esféricos de Mercator, conhecidos como Projeção Web de Mercator, adotados nos geoserviço de mapeamento *web* da Google (Kessler; Battersby, 2019). Outros procedimentos cartométricos que não fazem parte dos objetivos desse artigo, adotados para extração de feições históricas contidas nessa planta, encontram-se disponíveis em Mello et al. (2023).

A conversão das medidas originais do documento cartográfico, para o sistema métrico internacional pôde ser realizada de forma simples, aplicando dados da tabela de conversão de medidas trazido por Marques (2001). Onde a Equação 1 e a Equação 2 mostram respectivamente, que:

$$valorembrasas * 2,22 \left(ou 2\frac{1}{5} \right) = valoremmetros \quad (1)$$

$$V valoremetros * 0,222 = valoremmetros \quad (2)$$

Para essa etapa da cartometria, a planta foi escalada no *software Autodesk AutoCAD Civil 3D 2019*,

versão educacional. Ampliou-se o *zoom* na tela em 70% com a camada da planta topográfica ativada, para assim medir a escala gráfica com o auxílio de uma régua graduada, e mensurar as dimensões lineares da fortificação. Mensurou-se que 10 braças equivalem a 3 cm na planta topográfica do Forte do Raio, logo cada 1cm em planta equivale a 7,4m em medidas de terreno. E para o perfil presente no documento, mensurou-se que 10 palmos equivalem a 3 cm, ou seja, cada centímetro no papel representa 0,73 m no terreno. A partir das dimensões identificadas na planta topográfica, foi possível não apenas medir as dimensões da estrutura do Forte do Raio, mas também criar uma representação topográfica digital do local. De forma semelhante confeccionou-se o perfil de elevação da edificação. Nessa análise das dimensões identificou-se que o Forte do Raio apresentava área construída de, aproximadamente, 6620,55 metros quadrados e perímetro de 372,84 metros.

Esses procedimentos cartométricos são por demasia limitados, haja visto que: por se tratar de uma planta de edificação considerou-se a curvatura da Terra desprezível, trabalhando apenas com a conversão de unidades de medida (Lafreniere; Rivet, 2010); em se tratando de minimizar incertezas para a cartometria e realizar análises espaciais mais robustas em um SIG (Fiorini; Friso; Balletti, 2022); algumas recomendações foram apontadas nas conclusões.

Dando continuidade aos procedimentos metodológicos, importou-se o arquivo digital da altimetria do município de Itaguaí ao *Autodesk Autocad Civil 3D*, limitado (recorte de camadas) às curvas de nível à apenas a região de interesse do estudo, que correspondem aos limites do mapa histórico. Esse arquivo vetorial em formato DWG foi editado automaticamente para corrigir as geometrias das polilinhas, garantindo assim, a ausência de vértices duplicados e de pontos desconexos nas mesmas. A Figura 3 ilustra os procedimentos metodológicos realizados nesta etapa do trabalho.

Figura 3 – Procedimentos metodológicos realizados para a geração do modelo 3D.

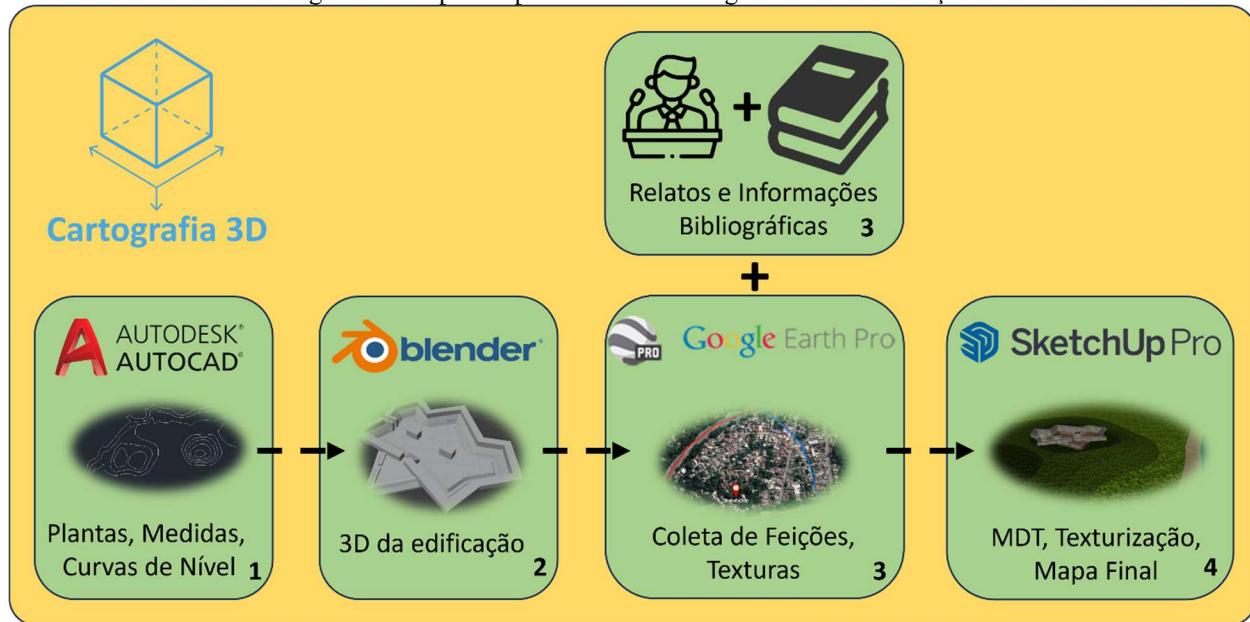


Fonte: Os autores (2024).

2.3.2 CARTOGRAFIA 3D

Simultaneamente, construiu-se um modelo tridimensional que valoriza o patrimônio material e possibilita sua compreensão por parte dos usuários. Para tal finalidade, as informações foram inseridas em aplicativos usualmente empregado para gerar produtos em CAD e BIM (*Building Information Model*), como mostra a Figura 4. Sua adoção é possível, pois, dispõem de muitas ferramentas intuitivamente utilizáveis para modelar objetos 3D, em comparação com as ferramentas que o programa SIG possui para tal (Janovský; Tobiáš; Cehák, 2022; Günay, 2019; Hájek et al., 2013).

Figura 4 – Etapas do processo de modelagem 3D da fortificação.

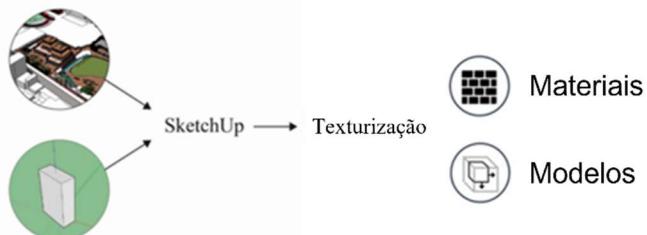


Fonte: Os autores (2024).

Posteriormente, o arquivo atualizado das curvas de nível foi importado para o *software Trimble Sketchup Pro, versão 2019*, versão de teste, no intuito de criar um MDT não foto-realístico (Tytarenko; Pavlenko; Dreval, 2023; Hájek et al., 2013; Döllner, 2007). Com o uso da ferramenta “Caixa de Areia” fez-se a criação de um modelo 3D parametrizado da região do entorno do Forte do Raio com base nas medidas das curvas de nível do arquivo .DWG. A partir das informações coletadas no *Google Earth Pro* junto com os relatos de história oral do pesquisador Eduardo Vieira, utilizou-se ferramentas de edição do *Sketchup*, ajustando o MDT para se assemelhar ao terreno da época.

Relacionando essas fontes bibliográficas sobre outras fortificações coetâneas, com os registros fotográficos das ruínas foi possível interpretar que sua estrutura era feita de cantaria com calcário. Essas estruturas da fortificação eram semelhantes às outras da época de sua construção, definindo as texturas, que não foram possíveis de interpretar na planta topográfica original. Há modelos de texturas de fachadas e muros de edificações pré-definidos no *Sketchup* semelhantes às informações textuais descritas e oferecem um bom contraste desta variável visual com o cenário da representação 3D (Günay, 2019; Gavette; Page-Schmit, 2018; Halik, 2012). Estas texturas foram combinadas no *software* com as texturas observadas nas fotografias, para assim melhor reconstituir à edificação. Esses procedimentos são esquematizados na Figura 5.

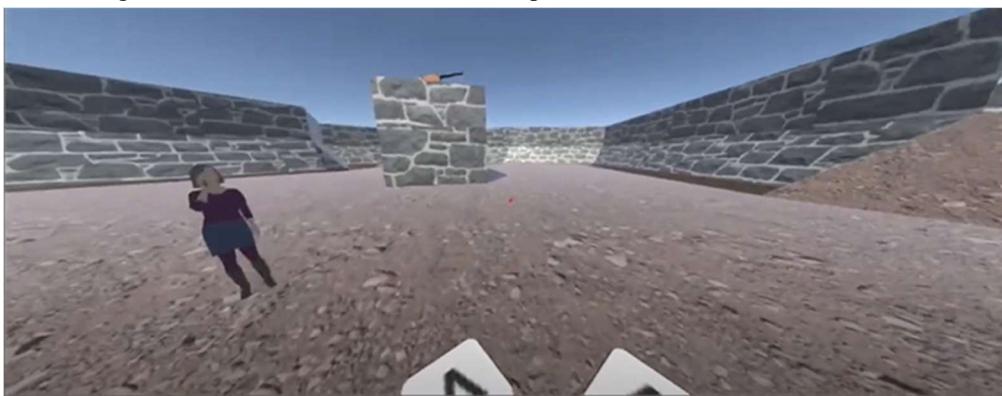
Figura 5 – Processo de texturização dos modelos 3D.



Fonte: Os Autores (2024).

Além de implantar a textura ao modelo 3D, acrescentou-se uma pessoa com cerca de 1,80 m de altura, para ilustrar a dimensão do Forte do Raio na época. Esse elemento adicional é um recurso de inferência para que o usuário possa ter uma avaliação de escala do modelo (Morlighem; Labetski; Ledoux, 2022), como é possível visualizar na Figura 6.

Figura 6 – Modelo de referência de uma pessoa acrescentado no modelo 3D.



Fonte: Os Autores (2024).

Além disso, foram adotados recursos de iluminação, presentes no *Sketchup*, para facilitar a visualização dos usuários das feições volumétricas, com recursos como, por exemplo, a presença de sombra do objeto, projetada sobre o solo (Halik, 2012). A posição de outros objetos, como a bateria à cavaleiro, por exemplo, são passíveis de interpretação na iconografia do modelo do Forte do Raio advindo do mapa histórico.

O passo seguinte foi unir o modelo 3D do Forte do Raio com o MDT da região de seu entorno. Fazendo uso do *Sketchup Pro*, os dois modelos foram integrados, resultando no modelo 3D final, que responde pelo melhor nível de detalhe atingido pela presente pesquisa (Hájek et al., 2013). Ao posicionar o modelo tridimensional da fortificação nas atuais ruínas, o usuário poderá visualizar a orientação das baterias do forte, tendo uma compreensão da defesa costeira e dos caminhos circundantes.

2.4 Navegação em RV

O procedimento para criar o ambiente de navegação em RV foi realizado utilizando o motor gráfico *Unity*, na versão 2018.3.3f1, disponível gratuitamente no site da empresa, juntamente com os *plugins* *Microsoft Visual Studio Community 2017* e o *Android Support* (Walmsley; Kersten, 2019). No *Unity*, foi empregado o pacote de ferramentas gratuito do Google para programadores, que oferece componentes para a construção de experiências de RV. Além do pacote Google, foram incorporados ao projeto outros conjuntos de ferramentas disponibilizados pelo *Unity*, incluindo os pacotes “*Environment*” e “*Characters*” (Kanchana; Sindhya, 2021; Coburn; Freeman; Salmon, 2017). Em seguida, o modelo 3D do Forte do Raio foi importado para o *Unity* no formato DAE (COLLADA), um formato capaz de transportar as texturas para o motor gráfico sem perda de qualidade visual dos elementos gráficos. A Figura 7 apresenta um esquema metodológico de como fora estruturada a aplicação em RV.

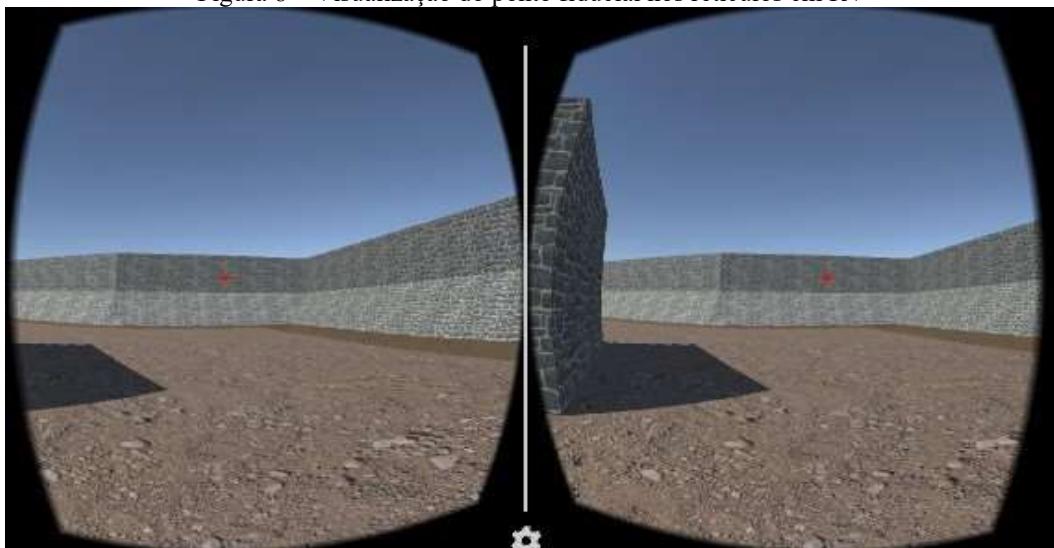
Figura 7 – Principais elementos de desenvolvimento da aplicação para realidade virtual.



Fonte: Os Autores (2024).

Os componentes da Google de VR: “*GvrViewerMain*” e “*GvrEventSystem*”, importados do *Android Support*, possibilitaram dividir a tela de visualização, para que cada olho do usuário veja uma parte da imagem com sobreposição, possibilitando a estereoscopia para o cérebro (Kanchana; Sindhya, 2021). No ambiente do projeto, uma pasta denominada “*Head*” foi gerada para representar o “usuário” dentro do projeto, e uma câmera principal foi importada para esta pasta. Em VR, é crucial que a câmera principal do motor gráfico esteja posicionada de maneira apropriada para simular a visão humana dentro do modelo 3D. Por isso, a câmera principal foi posicionada no modelo 3D da estrutura do Forte do Raio em uma altura correspondente à simulação da visão humana. Para tanto, utilizou-se a escala humana de 1,80 m posicionada dentro do modelo da fortificação. Além disso, o uso do componente “*GvrReticlePointer*” do pacote do Google foi incorporado à câmera (Kanchana; Sindhya, 2021). Esse componente possibilita a criação de um ponto focal homólogo na visão em RV, permitindo a interação do usuário com o ambiente imersivo de forma semelhante ao cursor de um mouse em ambas as telas. Inicialmente, o ponto criado possui uma cor branca; contudo, para evitar conflitos com a coloração das texturas mais claras do modelo 3D, a cor do ponto foi alterada para vermelho, conforme exemplificado na Figura 8.

Figura 8 – Visualização do ponto fiducial nos retículos em RV

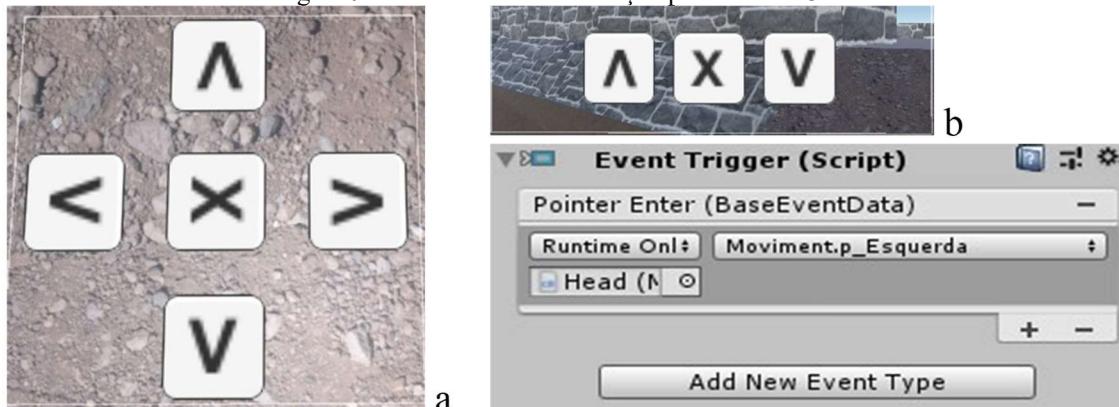


Fonte: Os Autores (2024).

Uma das partes mais desafiadoras da implementação em RV foi desenvolver a capacidade de movimentação do usuário dentro do modelo 3D, o que exigiu o uso de códigos de programação específicos. O código responsável por essa movimentação, denominado “*Moviment*”, foi elaborado utilizando o *software Microsoft Visual Studio 2019*, uma ferramenta de programação gratuita. Posteriormente o código foi incorporado à pasta “*Head*” no motor gráfico. Durante o processo, ficou evidente a necessidade de permitir ao usuário movimentar-se no eixo Y no ambiente imersivo, ou seja, movendo-se para aproximar-se ou para afastar-se do modelo 3D da fortificação (Coburn; Freeman; Salmon, 2017). Para atender a essa necessidade, foi desenvolvido um código adicional para movimentação no eixo Y, utilizando também o *Microsoft Visual Studio 2019*, abordagem de programação semelhante ao código de locomoção.

Para tornar os novos códigos implementados acessíveis ao usuário, foram criados botões de navegação utilizando o objeto “*Canvas*” do *Unity* (Figura 9a e 9b). Para seu design no “*Canvas*”, foram empregados os fundamentos das variáveis visuais digitais (Limberger et al., 2023; MacEachren, 1994), com base em experimentos práticos que apontam resultados satisfatórios de contraste entre os elementos de navegação e os ambientes imersivos em *smartphones* (Halik, 2012; Pinto; Centeno, 2012). Foram adotados botões com fundo branco e símbolos de movimentação na cor preta, com arranjo ao centro do fundo, e efeito de foco suavizando os vértices dos retângulos gráficos (Halik, 2012; MacEachren, 1994). Esses botões proporcionam movimentação direcional, além de um botão de parada, identificado pela letra “X”. Os botões de movimentação foram posicionados abaixo da câmera principal para não obstruir o campo de visão do usuário no modelo 3D (Halik, 2012). Além disso, utilizando o objeto “*Canvas*”, foram criados botões adicionais para movimentação no eixo Y, sendo colocados no canto superior direito da visão principal em RV. Por serem pequenos, esses botões não interferem na experiência visual imersiva do usuário. O próximo passo foi dar funcionalidade de movimentação a cada botão: inicialmente inserindo os códigos de movimentação na “*Head*”; seguido, individualmente, da adição do componente “*Event Trigger*”; onde fora definida a função “*Point Enter*” para que cada botão seja acionado mediante clique. Assim, escolheu-se a funcionalidade para cada botão, como mostra a captura de tela na Figura 9c.

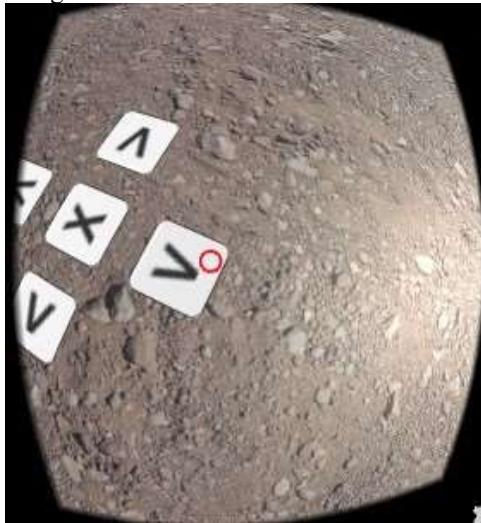
Figura 9 – Botões de movimentação pelo modelo 3D.



Fonte: Os Autores (2024).

Tornou-se possível locomover-se no modelo 3D apenas com o cursor posicionado sobre o botão. Desse modo, o retículo circular aumenta de tamanho indicando que está sendo utilizado, como evidencia a Figura 10.

Figura 10 – Funcionamento do Retículo.



Fonte: Os Autores (2024).

Como ponto de início da experiência imersiva escolheu-se o centro da estrutura do Forte do Raio, por entender que esse fornece uma ampla visão da edificação sendo, portanto, um local interessante para iniciar a experiência de navegação. Foi necessário modificar a plataforma de uso do aplicativo do computador para o sistema *Android* na janela “Build Settings”, trocando a opção “*PC, Mac & Linux Standalone*” por “*Android*”. Dessa forma, foi possível criar um aplicativo para *smartphones* com sistema operacional *Android*, pois o motor gráfico está condicionado a criar aplicativo para computadores pessoais.

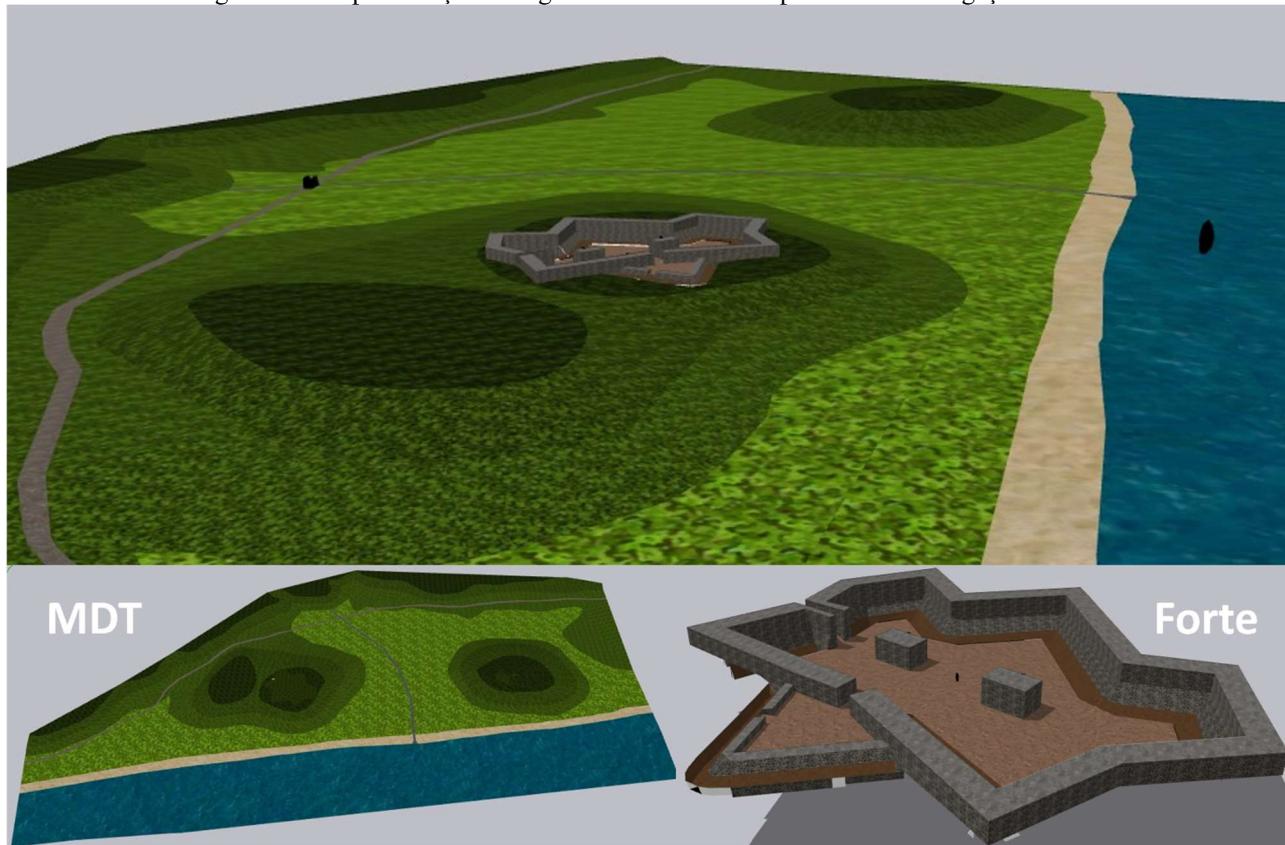
Após esse procedimento foi necessário realizar customizações nas configurações do aplicativo na janela “*Player settings*”, como nome, descrição, logotipo e afins, e na aba “*XR Settings*” escolher a função “*Virtual Reality Supported*” e optar pelo “*Cardboard*”. Antes da criação do aplicativo, foi preciso localizar a pasta designada para acolher o aplicativo *Android* no sistema operacional do computador. Para a localização da pasta de criação de aplicativo para *Android* utilizou-se o *software Android Studio*, versão 2021, e no *Unity* indicou o caminho da referida pasta (Walmsley; Kersten, 2019).

Por fim, realizadas as devidas correções no aplicativo, como localização inicial e escala do modelo 3D, ficou pronta a RV associada a essa aplicação. Na própria janela “*build settings*” clicou-se no botão “*build*” para a criação do aplicativo no formato .apk e após alguns minutos o aplicativo de RV foi criado. O aplicativo pode ser transferido ao *smartphone* de interesse desde que comporte a utilização da tecnologia para a utilização da RV do modelo 3D do Forte do Raio.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O primeiro resultado gerado foi o modelo tridimensional paramétrico da fortificação, inserida em um modelo digital de terreno do entorno dessa edificação (Figura 11). Ambos foram texturizados de forma conjectural, utilizando fontes bibliográficas e informações de relatos de história oral, e de forma compatível com as informações marginais da planta topográfica “Forte do Raio na Villa de Itagoahy” e a partir das fotografias de campo, apresentadas anteriormente na metodologia.

Figura 11 – Representação cartográfica tridimensional para fins de navegação em RV

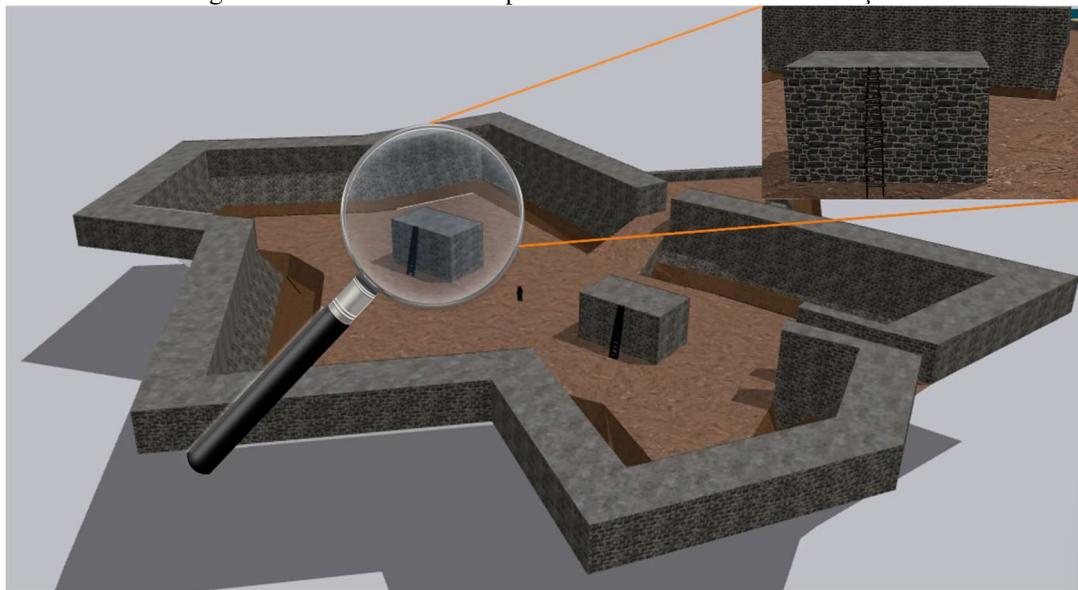


Fonte: Os Autores (2024).

O processo de texturização do modelo 3D da edificação, foi criado artificialmente, encontrando elementos próximos aos padrões de cores, formas e texturas semelhantes as informações coletadas em todo processo de pesquisa. Com base nas atuais condições das ruínas e do solo sobre o qual a fortificação se encontra, gerou-se um produto cartográfico tridimensional não foto-realístico que possibilita a visualização dentro e fora da edificação. Em seu interior, intencionalmente foi dado destaque a muralha e aos acessos à bateria, uma vez que são as feições mais notáveis do mapa histórico.

As baterias “à cavaleiro” do Forte do Raio, estavam em uma posição mais elevada em relação a superfície da fortificação (De Souza, 1885). Não há relatos sobre a altura dessas baterias, bem como indicações na planta sobre o alcance das artilharias, o que permitiria obter essas medidas de forma indireta por trigonometria. A acessibilidade às baterias foi representada por uma escada de mão, feita de madeira. Isso porque, na planta original e nos dados adicionais não foi identificada uma escada feita de cantaria (mesmo material da estrutura), ou mesmo de terra batida. Portanto estas escadas foram conjecturadas em uma posição plausível e compatível para a utilização das peças de artilharia descritas por Lyra (2019) para as fortificações portuguesas, como ilustra a Figura 12.

Figura 12 – Baterias e acesso por escada no interior da fortificação.

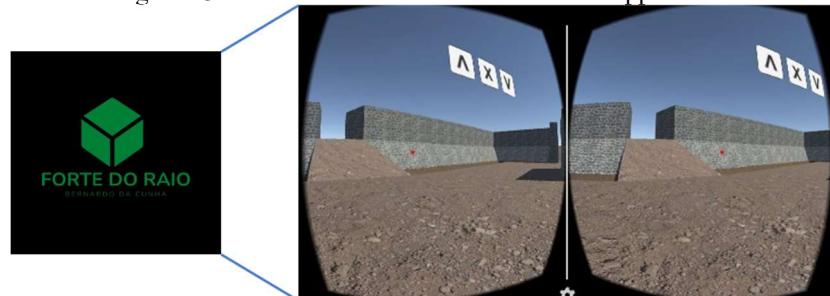


Fonte: Os Autores (2024).

O ambiente de navegação imersiva foi desenvolvido para *smartphones Android* com sensores de giroscópio e acelerômetro, compatível com os óculos *rift* de baixo custo (*VR Box*) (Sampaio; Veiga; Alves, 2023; Herman; Kvarda; Stachoň, 2018; Coburn; Freeman; Salmon, 2017). Na maioria dos casos, o sistema de proteção do *smartphone* não permitirá a instalação do aplicativo diretamente, dessa maneira, faz-se necessário que o usuário habilite as permissões ao sistema operacional, por meio das configurações do *smartphone*.

Após a instalação do aplicativo em diferentes modelos de *smartphone* e diferentes versões do sistema operacional *Android*, notou-se um erro de execução envolvendo o *Unity Game Engine* e o sistema *Android* na versão 12. Este problema foi relatado em diversos fóruns internacionais sobre RV, e possivelmente acontece por questões de atualização dos drivers dos componentes no sistema operacional. Desse modo, impossibilita a utilização do aplicativo *smartphones* em algumas versões do sistema operacional, o que não ocorreu em *smartphones* com a versão 11, do sistema *Android*. Após a instalação, o aplicativo estará na lista de *apps* do *smartphone* com o nome de “Forte do Raio” e, ao clicar no logotipo o usuário acessará a tela inicial apresentada na Figura 13.

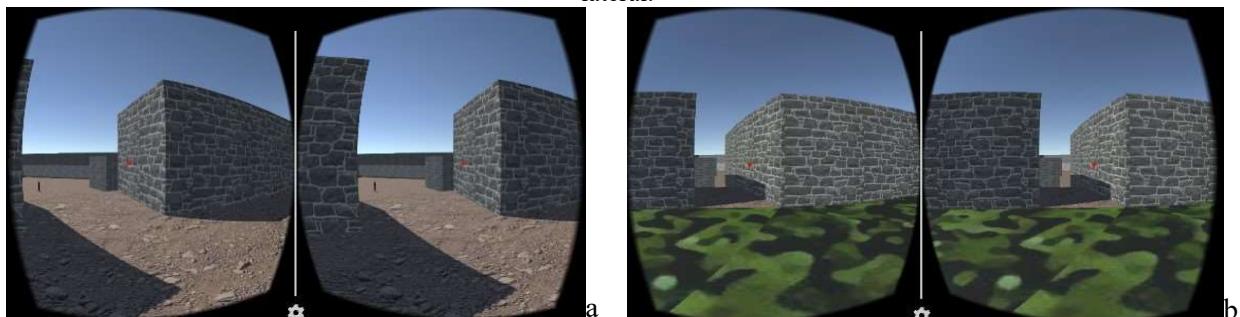
Figura 13 – Visão inicial do usuário ao abrir o app de RV.



Fonte: Os Autores (2024).

Visando atender a um dos objetivos propostos de criar uma ferramenta imersiva para divulgar e promover edificações do patrimônio histórico-material, os resultados seguintes exploram a navegação por feições no modelo tridimensional. A Figura 14 ilustra a visão do usuário ao adentrar na fortificação por seus diferentes acessos. O Forte do Raio apresentava duas entradas; acredita-se que a entrada lateral seria a entrada principal, visto que na outra entrada se localizava a tenalha - um instrumento externo de proteção militar (Mello, 2018).

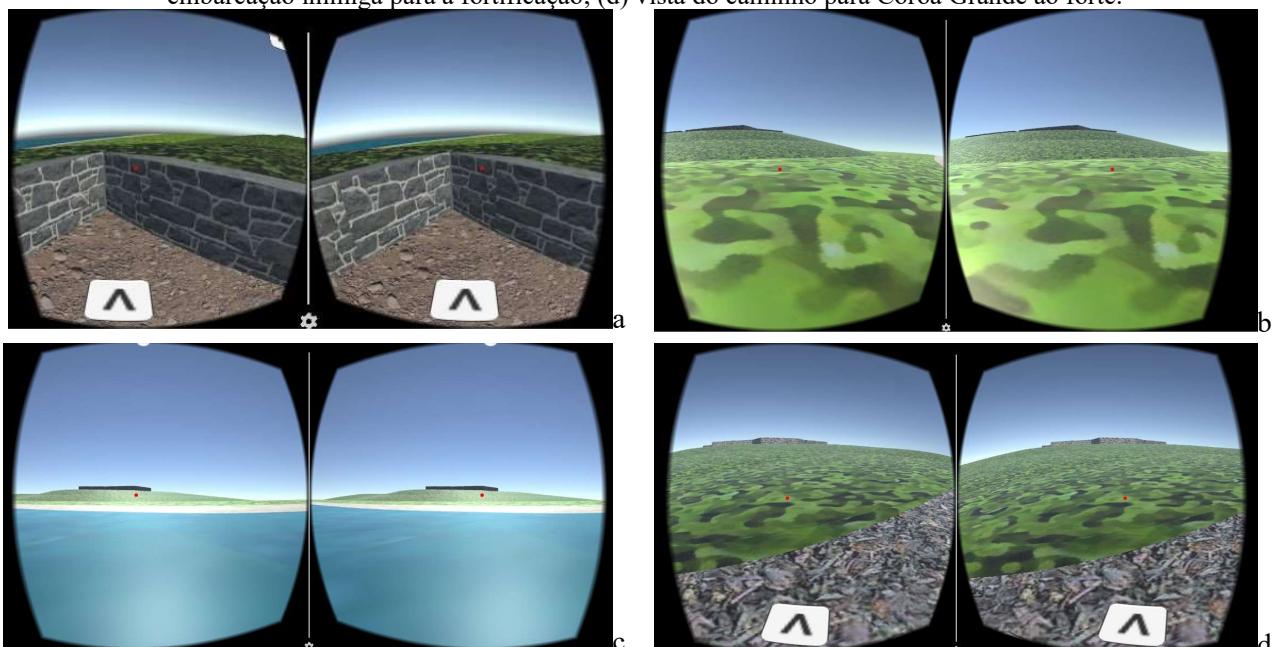
Figura 14 – Visão da tenalha para dentro da fortificação em ambiente de RV: (a) vista da tenalha; (b) vista da porta lateral.



Fonte: Os Autores (2024).

Seguindo com a navegação, a Figura 15a apresenta a visão orientada em direção ao mar a partir da tenalha. Após sair da tenalha, tem-se a visão do Forte do Raio a partir da praia ilustrada pela Figura 15b, e fica evidente a imponência do Forte do Raio ao voltar a câmera em direção a ele. Apesar de toda imponência, poderia ser facilmente camuflada devido à grande quantidade de árvores no local. Apenas como ilustração adicionou-se uma caravela ao modelo, e a Figura 15c busca a visão que uma embarcação inimiga teria para o Forte do Raio, mostrando que até do mar a fortificação poderia passar despercebida pelos inimigos. Já do lado aposto à praia, no interior do continente há o caminho para Coroa Grande que possui ampla visão sobre o Forte do Raio, como ilustra a Figura 15d. Como um demonstrativo dessa experiência, o link a seguir abre um vídeo da navegação dentro do modelo 3D do Forte do Raio em ambiente de RV: <https://youtu.be/gZTm1TXgSJ4>.

Figura 15 – Exibe-se: (a) a vista da tenalha para o mar; (b) visão da praia para o Forte do Raio; (c) visão de uma embarcação inimiga para a fortificação; (d) vista do caminho para Coroa Grande ao forte.



Fonte: Os Autores (2024).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Mesmo com o fim da pandemia, o legado de uma maior acessibilidade ao uso da RV para usuários não especialistas permanece. O presente trabalho buscou mostrar de forma prática que tecnologias de rv de baixo custo, aliadas à cartografia histórica evidenciam uma forma imersiva, dinâmica e interativa do aprendizado da história do nosso país e da manutenção e preservação do patrimônio histórico-cultural (Chong et al., 2022). Dessa forma, possibilita a reconstrução digital de monumentos ou até de cidades

inteiras com base em modelos tridimensionais gerados por dados geoespaciais contidos em mapas históricos. A recuperação métrica e o processamento de dados pretéritos contidos nos mapas históricos, além de permitir preservar o patrimônio histórico geográfico e cultural, abre novas possibilidades de utilização dessa geoinformação digitalizada, inatingíveis apenas com o suporte analógico. O mapa histórico serviu como fonte para a geração de um modelo paramétrico, complementado por outras fontes de dados que possibilitaram a navegação em RV.

O desenvolvimento e a adoção de práticas de turismo virtual é um exemplo de como se pode disponibilizar para a população o acesso a bens culturais, existentes ou reconstruídos, como é o caso do presente trabalho (Theodoropoulos; Antoniou, 2022; Remondino, 2011). A chamada internet das coisas (*Internet of Things - IoT*), possibilitou aos museus, prédios históricos, sítios arqueológicos ou mesmo locais hoje não mais existentes, a sua visitação virtual (Gaberli, 2022; Graça et. al., 2021). Quanto ao acesso ao patrimônio cultural no período de *lockdown*, o uso da modelagem 3D aliado ao emprego das tecnologias de RV e RA, tornou-se popularizado com o fluxo de dados gerenciado por APIs disponíveis para *smartphones*.

A modelagem 3D no *Sketchup* se mostrou condizente com o objetivo do artigo, em que o modelo paramétrico tridimensional da fortificação está metrificado da melhor forma possível dentro das possibilidades de mensuração da planta topográfica disponível: o modelo está acurado o suficiente para visualização e a navegação de baixo custo semelhante a bons resultados obtidos na literatura como em Tytarenko, Pavlenko e Dreval (2023). A texturização do modelo é conjectural, e não foto-realística, mas nessa aproximação não foram identificadas falhas de preenchimento do modelo no processo de navegação. A representação cartográfica tridimensional gerada nessa pesquisa, fornece subsídios para trabalhos futuros na área de *Historic Building Information Modeling (HBIM)*, o que possibilitará ações de planejamento mais efetivas nos processos conservação e restauro das ruínas, bem como a própria gestão do sítio arqueológico (Tytarenko; Pavlenko; Dreval, 2023; Dore; Murphy, 2012; Remondino, 2011).

O motor gráfico *Unity* apresentou bom resultado na criação do aplicativo de visualização cartográfica em RV para *smartphones* Android. Entretanto, não está isento de limitações. O *Unity* apresentou o erro com a versão 12 do sistema *Android SDK*, por meio de discussões em fóruns on-line como o *GitHub* (<https://github.com/>) e em Kanchana e Sindhya (2021) foi identificado que esse problema foi enfrentado por diversos desenvolvedores ao redor do mundo. Buscou-se soluções de compatibilidade dentro do motor gráfico, porém sem sucesso, e desse modo, o aplicativo limita-se até a versão 11 do sistema Android que foi utilizada neste trabalho. Para a correção do erro apresentado pela versão 12 do sistema Android, necessita-se realizar testes com outros motores gráficos, como por exemplo o *Unreal Engine* (Walmsley; Kersten, 2019), para descobrir se o erro acontece somente o *Unity* ou é referente a versão 12 do sistema Android. Outra solução seria a atualização do sistema *Android* por parte da desenvolvedora a fim de sanar tal problema.

Sugere-se para futuros trabalhos realizar um teste qualitativo com base em parâmetros ergométricos, a fim de avaliar a experiência dos usuários sobre a navegação pelo modelo. Buscar-se-á explorar em outros experimentos bem-sucedidos, caminhos possíveis para melhorias na metodologia do presente trabalho, como por exemplo: cambiar as funcionalidades do aplicativo em RV para outros sistemas operacionais e novas alternativas para a textura do modelo 3D na busca do máximo realismo. Prevendo também o emprego de outros métodos na obtenção de informações, como a fotogrametria a curta distância. Para continuidade do trabalho, pretende-se aprimorar os experimentos de imersividade, com uma tecnologia mais responsiva aos movimentos corporais do usuário em ambiente RV, proporcionando uma visualização mais intuitiva com menor dependência periféricos auxiliares (Theodoropoulos; Antoniou, 2022; Coburn; Freeman; Salmon, 2017).

Por fim, o trabalho conclui a possibilidade da representação do Patrimônio Histórico, por meio da RV, em conjunto com a Cartografia Histórica. O experimento executado no Forte do Raio apresenta como a reconstrução em ambiente de RV, proporciona aos usuários o conhecimento de um importante elemento histórico desconhecido, em prol de sua divulgação e preservação. Desse modo, a RV auxilia na divulgação e na preservação do Patrimônio Histórico, pois possibilita sua representação mesmo que este já não exista, ou esteja em ruínas.

Contribuição dos Autores

O autor Bernardo da Cunha Carvalho de Mello contribuiu com a conceituação, a metodologia e a escrita – primeira redação. A autora Juliana Moulin Fosse contribuiu com a supervisão e escrita – revisão e edição. O autor Alan José Salomão Graça contribuiu com a escrita – revisão e edição. O autor Luís Augusto Koenig Veiga contribuiu com a escrita – revisão e edição.

Conflitos de Interesse

Informamos que há não conflitos de interesses.

Referências

- Ackerman, A., Auwaerter, J., Foulds, E., Page, R., & Robinson, E. (2023). Cultural landscape visualization: The use of non-photorealistic 3D rendering as an analytical tool to convey change at Statue of Liberty National Monument. *Journal of Cultural Heritage*, 62, 396–403.
- Bagher, M. M., Sajjadi, P., Wallgrün, J. O., LaFemina, P., & Klippel, A. (2023). Virtual reality for geospatial education: Immersive technologies enhance sense of embodiment. *Cartography and Geographic Information Science*, 50(3), 233–248.
- Balletti, C., & Guerra, F. (2016). Historical maps for 3D digital city's history. *Cartographica*, 51(3), 115–126.
- Botto, M., Federici, B., Ferrando, I., Gagliolo, S., & Sguerso, D. (2023). Innovations in geomatics teaching during the COVID-19 emergency. *Applied Geomatics*, 15(3), 551–564.
- Brito, P. L., Pedreira Junior, J. U., Fernandes, V. O., Viana, M. S., Pedrassoli, J. C., & Delgado, J. M. (2023). Risco dos bairros de Salvador ao espalhamento da COVID-19 decorrente da circulação de pessoas e condições socioeconômicas. *Revista Brasileira de Geomática*, 11(2), 488–500.
- Cheng, Y., Zhu, G., Yang, C., Miao, G., & Ge, W. (2022). Characteristics of augmented map research from a cartographic perspective. *Cartography and Geographic Information Science*, 49(5), 426–442.
- Chong, H. T., Lim, C. K., Rafi, A., Tan, K. L., & Mokhtar, M. (2022). Comprehensive systematic review on virtual reality for cultural heritage practices: Coherent taxonomy and motivations. *Multimedia Systems*, 28, 711–726.
- Çöltekin, A., Bleisch, S., Andrienko, G., & Dykes, J. (2017). Persistent challenges in geovisualization – A community perspective. *International Journal of Cartography*, 3(sup1), 115–139.
- Coburn, J. Q., Freeman, I., & Salmon, J. L. (2017). A review of the capabilities of current low-cost virtual reality technology and its potential to enhance the design process. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 17(3), 031013.
- de Souza, A. F. (1885). Fortificações no Brazil. *RIHGB - Revista do Instituto Histórico e Geográfico Brasileiro*, 48, 5–140.
- Döllner, J. (2007). Non-photorealistic 3D geovisualization. In W. Cartwright, M. P. Peterson, & G. Gartner (Eds.), *Multimedia cartography* (2nd ed., pp. 229–240). Heidelberg: Springer-Verlag.

- Dore, C., & Murphy, M. (2012). Integration of Historic Building Information Modeling (HBIM) and 3D GIS for recording and managing cultural heritage sites. In *2012 18th International Conference on Virtual Systems and Multimedia* (pp. 369–376). IEEE.
- Fiorini, G., Friso, I., & Balletti, C. (2022). A geomatic approach to the preservation and 3D communication of urban cultural heritage for the history of the city: The journey of Napoleon in Venice. *Remote Sensing*, 14(14), 3242.
- Fosse, J. M., & Veiga, L. A. K. (2006). Representação cartográfica interativa tridimensional: Estudo da variável visual cor em ambiente VRML. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 12(2), 249–260.
- Fritsch, D., & Klein, M. (2017). 3D and 4D modeling for AR and VR app developments. In *2017 23rd International Conference on Virtual System & Multimedia (VSMM)* (pp. 1–8). IEEE.
- Gaberli, Ü. (2022). Cultural tourism, internet of things, and smart technologies in museums. In L. Oliveira (Ed.), *Handbook of research on digital communications, internet of things, and the future of cultural tourism* (pp. 260–270). Hershey: IGI Global.
- Gatta, G., Arioti, E., & Bitelli, G. (2017). Geomatics science applied to cartographic heritage and archive sources: A new way to explore the XIXth century Gregorian Cadastre of Bologna (Italy), an ante-litteram 3D GIS. *Journal of Cultural Heritage*, 23, 68–76.
- Gavette, P., & Page-Schmit, K. (2018). Utilizing historic cartography in 3D for archaeological prospection on Alcatraz. In *2018 3rd Digital Heritage International Congress (DigitalHERITAGE) held jointly with 2018 24th International Conference on Virtual Systems & Multimedia (VSMM 2018)* (pp. 1–4). IEEE.
- Graça, A. J. S., Fosse, J. M., Veiga, L. A. K., & Botelho, M. F. (2021). A impressão 3D no âmbito das representações cartográficas. *Revista Brasileira de Cartografia*, 73(3), 809–826.
- Günay, S. (2019). Geographical information systems as a tool for 3D visualization of lost architectural heritage. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 4, 69–75.
- Hajek, P., Jedlička, K., Vichrová, M., & Fiala, R. (2013). Conceptual approach of information rich 3D model about the Terezín Memorial. *Geoinformatics FCE CTU*, 11, 49–62.
- Halik, Ł. (2012). The analysis of visual variables for use in the cartographic design of point symbols for mobile augmented reality applications. *Geodesy and Cartography*, 61(1), 19–30.
- Herman, L., Kvarda, O., & Stachoň, Z. (2018). Cheap and immersive virtual reality: Application in cartography. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 261–266.
- Janovský, M., Tobiáš, P., & Cehák, V. (2022). 3D visualization of the historic pre-dam Vltava River Valley—Procedural and CAD modelling, online publishing and virtual reality. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 11(7), 376.
- Kessler, F. C., & Battersby, S. E. (2019). *Working with map projections: A guide to their selection*. Boca Raton: CRC Press.
- Kanchana, J., & Sindhya, S. (2021). Development of virtual reality application for centrifugal pump impeller-machining process for training purpose. *International Journal of Nonlinear Analysis and Applications*, 12, 1855–1862.

- Lafreniere, D., & Rivet, D. (2010). Rescaling the past through mosaic historical cartography. *Journal of Maps*, 6(1), 417–422.
- Limberger, D., Scheibel, W., Döllner, J., & Trapp, M. (2023). Visual variables and configuration of software maps. *Journal of Visualization*, 26(1), 249–274.
- Luo, L., Wang, X., Guo, H., Lasaponara, R., Shi, P., Bachagha, N., Li, L., Yao, Y., Masini, N., Chen, F., Ji, W., Cao, H., Li, C., & Hu, N. (2018). Google Earth as a powerful tool for archaeological and cultural heritage applications: A review. *Remote Sensing*, 10(10), 1558.
- Lyra, L. F. A. (2019). *Artilharia de costa: A evolução bélica em prol da defesa do litoral brasileiro*. Biblioteca do Exército Brasileiro.
- Marques, M. S. (2001). *Cartografia antiga: Tabela de equivalências de medidas; cálculo de escalas e conversão de valores de coordenadas geográficas*. Lisboa: Biblioteca Nacional de Lisboa.
- Mello, C. P. de. (2018). *Encaminhamento de ficha de registro do Sítio Arqueológico do Forte de Coroa Grande*. Rio de Janeiro: Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN).
- Montello, D. R. (2009). Cognitive research in GIScience: Recent achievements and future prospects. *Geography Compass*, 3(5), 1824–1840.
- Morlighem, C., Labetski, A., & Ledoux, H. (2022). Reconstructing historical 3D city models. *Urban Informatics*, 1(1), 11.
- Nascimento, M. L. F. (2020). A multivariate analysis on spatiotemporal evolution of COVID-19 deaths in Brazilian states and cities. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 19, 100392.
- Nascimento, R. (2019). Uma análise cartográfica dos mapas de tratamento de esgoto do Brasil no Censo 2010. *Cadernos Metrópole*, 21(45), 753–773.
- Ndiweni, J., & Sundaram, D. (2022). Utilising virtual reality for teaching rural spatial data. *Cartography and Geographic Information Science*, 49(5), 424–444.
- Oliveira, L., & Santos, A. (2022). *Metodologia de monitoramento para auxílio a políticas públicas para eventos climáticos extremos no Brasil*. UFES.
- Oliveira, R. B. de. (2015). *Cartografia e Geotecnologias Aplicadas à Defesa Civil*. Editora da UFRJ.
- Ono, M. M. (2009). A tridimensionalidade na representação cartográfica. *Revista Brasileira de Cartografia*, 61(1), 7–16.
- Pimenta, V. S., Lopes, A. S., Lopes, C. M., & Demétrio, V. A. (2022). Virtual urbanism as tool for urban planning studies: Case study applied to Rio de Janeiro State, Brazil. *Landscape Research*, 47(7), 937–957.
- Porciani, M., Botto, M., & Federici, B. (2021). A systematic literature review of geographic information system applications for epidemiology during the COVID-19 pandemic. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(17), 9114.
- Salman, J. L., & Paul, R. J. (2017). Evaluating the feasibility of low-cost virtual reality and its applicability to early-stage design. *The Design Journal*, 20(sup1), S1575–S1587.
- Schiewe, J. (2017). Cross-references between geovisualization and virtual reality techniques for cartographic applications. *The Cartographic Journal*, 54(1), 1–2.

- Siva, M., Erol, K., & Kilic, M. (2013). Thematic and temporal documentation of historical urban information systems based on BIM-GIS integration. *Advances in Civil Engineering*, 2013, 563792.
- Tedesco, R. (2022). Teaching topography and cartography: Challenges and innovations in the COVID-19 pandemic context. *Revista Brasileira de Educação em Geografia*, 11(1), 1–10.
- Valença, M. T. (2019). *A evolução dos sistemas de georeferenciamento da costa brasileira*. Editora UFPE.
- Veiga, L. A. K., Borges, E. A. M., & Lima, F. S. (2017). *Cartografia e Geotecnologias Aplicadas a Gestão Ambiental*. Editora UFPI.
- Viera, S. (2018). *Prospecção arqueológica de fortificações coloniais brasileiras no uso de geotecnologias*. Editora da UFRJ.
- Visockiene, J., Nikiforov, A., & Greinert, A. (2023). Multi-scale analysis of European landscapes using open-source geospatial tools. *Land*, 12(1), 176.
- Wang, R., Li, X., & Zhang, L. (2018). A 3D geovisualization-based spatiotemporal analysis of historical evolution for urban planning. *Journal of Urban Technology*, 25(2), 3–21.
- Weber, M., & Kadziolka, M. (2023). Using virtual reality for training landscape planners. *Journal of Digital Landscape Architecture*, 8, 205–214.
- Wu, S., Ma, X., Huang, J., & Zhou, Z. (2022). A GIS-based modeling approach to assess COVID-19 containment strategies: An empirical study in Wuhan, China. *Environment, Development and Sustainability*, 24(1), 461–483.

Biografia do autor principal



Bernardo da Cunha Carvalho de Mello, nascido em 22 de março de 1999 na cidade do Rio de Janeiro, morador de Itaguaí-RJ. Formado como bacharel em Engenharia de Agrimensura e Cartográfica pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro no campus Seropédica. Engenheiro parceiro no projeto de Identidade Geográfica da Banana de Itaguaí na Secretaria Municipal de Agricultura e Pesca de Itaguaí, e atualmente é coordenador de Geotecnologias na empresa DRONE & GIS, onde atua com levantamento aerofotogramétrico e geoprocessamento. Sua área de pesquisa é a Cartografia Histórica e Cartografia 3D mas aberto a trabalhar com novas linhas de pesquisa.



Esta obra está licenciada com uma Licença [Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.