



Agrupamento de Escolas de Benfica
Escola Secundária José Gomes Ferreira
Grupo Disciplinar 510

Sistema Computacional para Geração Automática de Mapas Topográficos

Adrian Dias

Nº 1, T 12º 3ª

– Disciplina de Física –

2025 - 2026

Resumo

Este trabalho apresenta a modelação e visualização 3D da topografia da região metropolitana do Rio de Janeiro utilizando Python e a biblioteca PyGMT. O foco recai sobre a aplicação precisa do sistema de coordenadas **WGS 84** e da **perspectiva azimutal** para gerar um mapa topográfico tridimensional com resolução de 30 metros. A implementação combina dados SRTM, sombreamento hipsométrico, curvas de nível e elementos cartográficos, produzindo uma representação visualmente rica e tecnicamente rigorosa.

1 Introdução

O presente trabalho visa desenvolver uma visualização tridimensional realista da topografia da região metropolitana do Rio de Janeiro, integrando conceitos fundamentais de geodésia e cartografia computacional. Para tal, dois pilares técnicos são fundamentais: o sistema de coordenadas WGS 84, que assegura a precisão posicional, e a perspectiva azimutal, que optimiza a percepção visual do relevo. Estes elementos são aplicados num script em Python com a biblioteca PyGMT.

2 Conceitos Fundamentais

2.1 Dados SRTM

O **SRTM** (*Shuttle Radar Topography Mission*) é um conjunto de dados de elevação da superfície terrestre obtido em 2000 pela NASA e pela NGA durante uma missão espacial *Endeavour*. Utilizando radar, mediu a altura do terreno em quase toda a área entre 60° N e 56° S, com uma célula de aproximadamente 30 metros de lado — ou seja, cada ponto representa a altitude média de uma área de 30×30 metros.

No presente trabalho, esses dados são carregados directamente com o comando `pygmt.datasets.load_earth_relief(resolution="01s")`, fornecendo a base altimétrica para a construção do modelo 3D do relevo da região metropolitana do Rio de Janeiro.

No script, a grelha SRTM é carregada com:

```
1 grid = pygmt.datasets.load_earth_relief(resolution="01s", region=region)
```

Esta função garante que os dados estejam correctamente georreferenciados em WGS 84, base para toda a análise topográfica.

2.2 O Sistema de Coordenadas WGS 84

O **World Geodetic System 1984 (WGS 84)** constitui o referencial geocêntrico padrão adoptado globalmente, com origem no centro de massa da Terra e eixos alinhados ao *International Earth Rotation and Reference Systems Service* (IERS). Este sistema, definido em detalhe por [1], especifica:

- **Eixo Z**: alinhado ao polo de referência IERS (IRP), apontando para o norte.
- **Eixo X**: intersecção do meridiano de referência IERS (IRM) com o plano equatorial, definindo o meridiano principal.
- **Eixo Y**: completa o sistema ortogonal à direita, formando um sistema cartesiano direito.

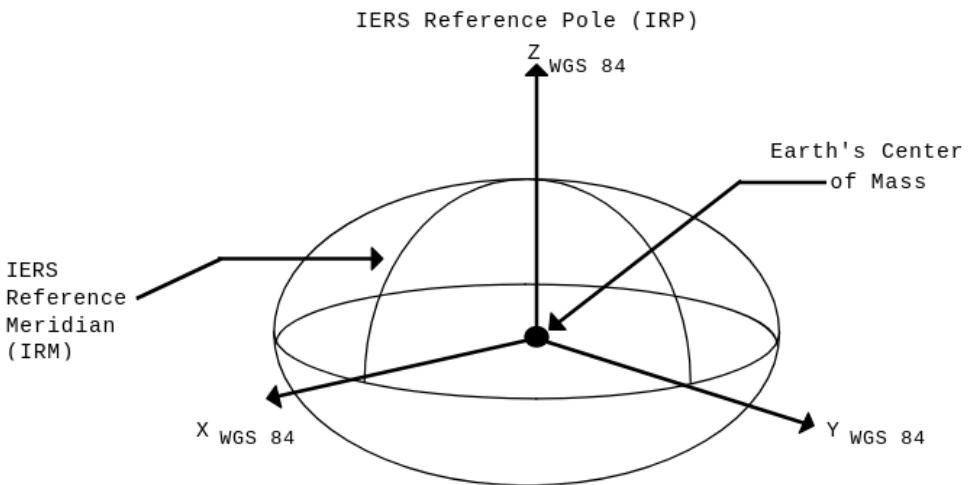


Figura 1: Esquema do sistema de coordenadas WGS 84, com eixos X, Y, Z e referências IERS (extraído de F3.pdf – NIMA TR8350.2, página 24).

No script, a região de estudo é delimitada em coordenadas WGS 84:

```
1 region = [-43.35, -43.05, -23.05, -22.83] # longitude, latitude
   em graus
```

2.3 Perspectiva Azimutal em Visualização 3D

A **perspectiva azimutal** é definida por dois ângulos principais em visualizações cartográficas 3D:

- **Azimute:** direção horizontal da câmera (135° — sudeste).
- **Elevação:** ângulo vertical acima do horizonte (30°).

Configurada via:

```
1 perspective = [135, 30]
```

Esta escolha maximiza o contraste de sombreamento e destaca feições como o Corcovado. A técnica de visualização 3D com perspectiva é exemplificada em [2], que demonstra renderização com sombreamento e contornos.

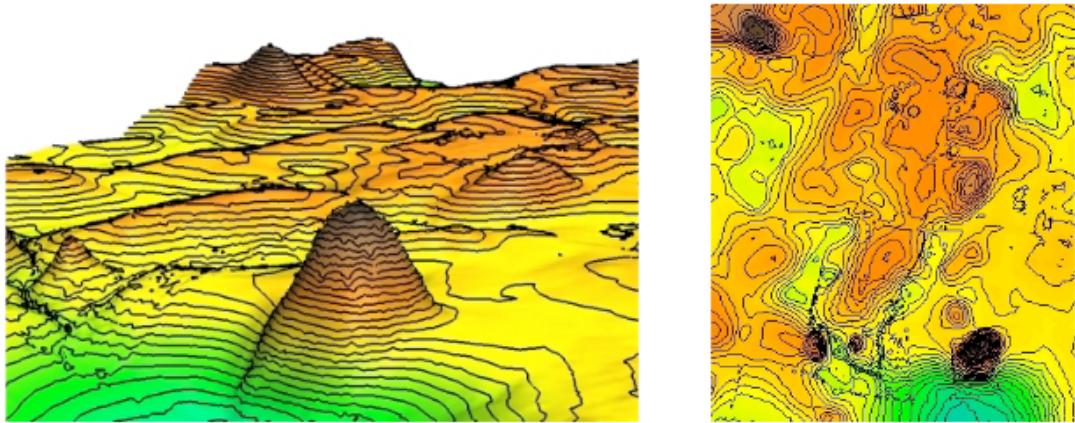


Figura 2: Exemplo de visualização 3D com contornos e mapa 2D ao lado (extraído de F6.pdf, página 1).

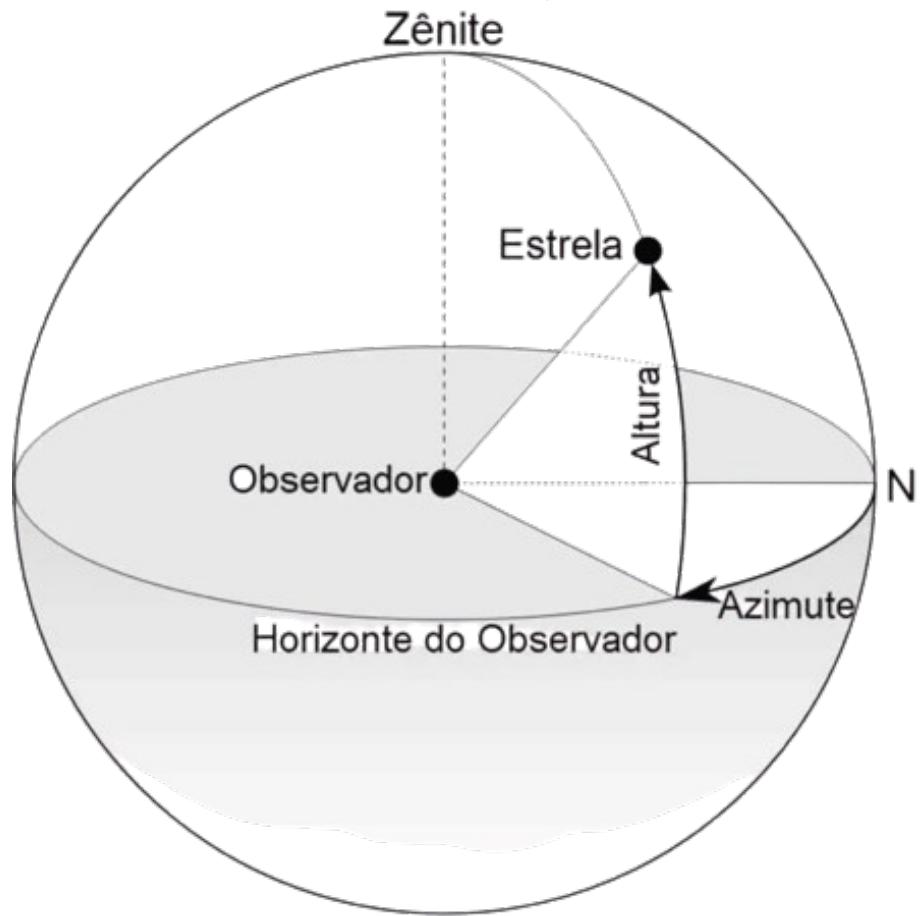


Figura 3: Exemplo de visualização 3D em perspectiva azimutal de uma região costeira.

2.4 Diferenças entre o Geoide e o Elipsoide no WGS 84

O modelo WGS 84 utiliza um elipsoide (superfície matemática que aproxima a forma da Terra) como superfície de referência para cálculos geodésicos, mas as elevações reais são frequentemente medidas em relação ao geoide (modelo físico do nível médio do mar) — uma superfície equipotencial que representa o nível médio do mar estendido por baixo dos continentes. A imagem seguinte ilustra as diferenças globais entre o geoide EGM96 e o elipsoide WGS 84, com contornos representando variações em metros.

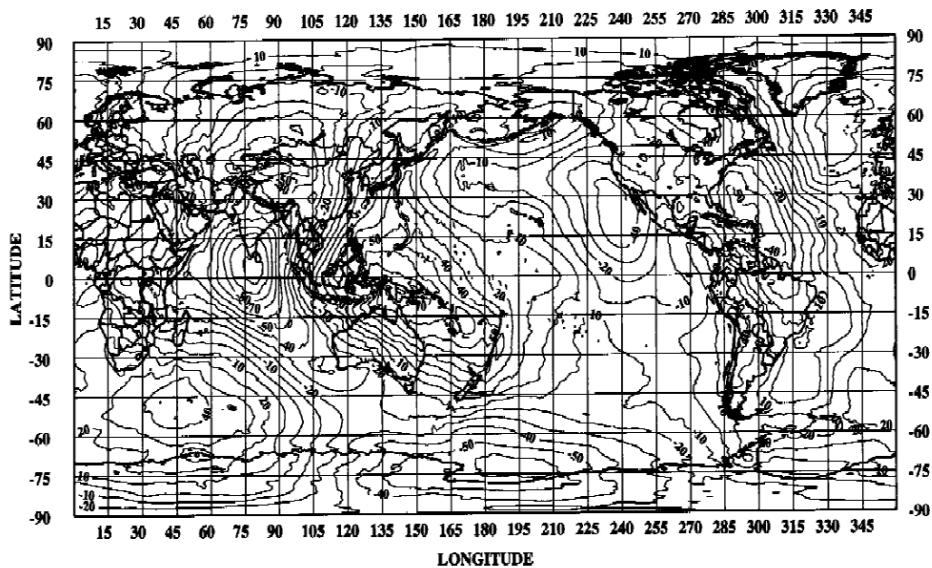


FIGURE 6.1 EGM96 Geoid(n=m=360) Referenced to WGS 84 Ellipsoid; Units = Meters

Figura 4: Mapa de contornos do geoide EGM96 referenciado ao elipsoide WGS 84, mostrando variações globais em metros (extraído de F3.pdf, página 119).

Esta representação é crucial para compreender por que razão dados de elevação como o SRTM são ajustados ao geoide: ela corrige as irregularidades gravimétricas da Terra, garantindo que as alturas refletem o nível do mar real. No contexto do nosso script, esta distinção assegura que as representações 3D sejam não só precisas em coordenadas, mas também em elevações relativas, melhorando a análise topográfica da região do Rio de Janeiro.

3 Metodologia

Para alcançar os objectivos propostos, adoptou-se um fluxo de trabalho sistemático que liga os conceitos teóricos à implementação prática, permitindo que o leitor siga o processo passo a passo.

3.1 Fluxo de Trabalho

- a. **Definição da região:** Utilizando coordenadas no sistema WGS 84 para delimitar a área de estudo.
- b. **Aquisição da grelha SRTM:** Carregamento de dados de elevação com resolução de 1 segundo de arco (30 m).
- c. **Configuração da perspectiva:** Definição do azimute e elevação para uma vista optimizada.
- d. **Renderização 3D:** Aplicação de sombreamento, curvas de nível e elementos costeiros.
- e. **Exportação:** Geração de imagem em alta resolução (600 DPI) para análise visual.

Esta sequência garante que cada etapa se baseie na anterior, criando uma cadeia lógica dos dados brutos ao mapa final.

3.2 Código Python Completo

O código seguinte implementa o fluxo descrito, servindo como ponte entre a teoria e a prática. Ele é apresentado na íntegra para reproduzibilidade.

```
1 import pygmt
2
3 # 1. Região em WGS 84
4 region = [-43.35, -43.05, -23.05, -22.83] # ~30x25 km
5
6 print("Baixando grelha SRTM 1s (~30m) - pode demorar 30-60s na
     primeira vez...")
7 grid = pygmt.datasets.load_earth_relief(
```

```

8     resolution="01s",
9     region=region,
10    registration="gridline"
11 )
12
13 # 2. Figura com perspectiva azimutal
14 fig = pygmt.Figure()
15 perspective = [135, 30] # Vista clássica do Rio (sudeste, 30° de
16           elevação)
17
18 fig.grdview(
19     grid=grid,
20     region=region + [0, 3500],
21     projection="M18c",
22     perspective=perspective,
23     frame=["a", "z500f100"],
24     zsize="4c",
25     surftype="i",
26     shading="+a45+nt0.8",
27     cmap="geo",
28     contourpen="0.3p,gray30"
29 )
30
31 fig.grdcontour(
32     grid=grid,
33     levels=100,
34     annotation="500",
35     pen="0.4p,gray10",
36     perspective=perspective
37 )
38 fig.coast(
39     resolution="f",
40     shorelines=True,
41     water="lightblue@80",
42     borders="1/0.6p,gray",

```

```

43     perspective=perspective
44 )
45
46 fig.colorbar(
47     perspective=perspective,
48     frame=["a500f100", "x+lElevação (m)", "y+lm"],
49     position="JBR+o1c/1c+w14c/0.8c+h"
50 )
51
52 fig.text(
53     text="Rio de Janeiro - Topografia 3D (30 m)",
54     position="TC",
55     font="18p,Helvetica-Bold,white",
56     offset="0/0.8c",
57     perspective=perspective,
58     fill="black@90"
59 )
60
61 fig.savefig("figuras/mapatopografico.png", dpi=600)
62 print("Mapa 3D salvo como 'mapatopografico.png'")
63 fig.show()

```

Listagem 1: Script completo de geração do mapa
3D do Rio de Janeiro

4 Resultados

O mapa topográfico 3D gerado (`mapatopografico.png`) representa com alta fidelidade a complexa topografia da região metropolitana do Rio de Janeiro, abrangendo aproximadamente 30×25 km, com resolução espacial de 30 metros. A seguir, detalham-se os principais elementos visuais e suas implicações técnicas e cartográficas, conforme princípios estabelecidos pelo USGS para mapas topográficos [3] e técnicas de sombreamento descritas por Kennelly para realçar o relevo [4]. Esta análise visa ligar os resultados aos conceitos anteriores, mostrando como cada elemento contribui para uma compreensão clara do terreno.

4.1 Resolução e Escala de Elevação

A grelha SRTM de 1 segundo de arco (30 m) foi renderizada com uma escala vertical exagerada (`zsize="4c"`), permitindo uma percepção clara das variações altimétricas de 0 a 3500 m. A barra de cores (`cmap="geo"`) utiliza uma paleta hipsométrica que varia de tons azuis (baixas elevações, áreas costeiras e baía de Guanabara) a verdes, amarelos e castanhos (elevações intermédias e altas, como o maciço da Tijuca). Esta escala segue recomendações do USGS para mapas topográficos [3], onde cores são associadas a intervalos de altitude para facilitar a leitura. Em termos práticos, isto significa que o leitor pode identificar rapidamente zonas baixas (ex.: praias) e altas (ex.: montanhas), ligando-se à precisão do WGS 84 na definição das coordenadas.

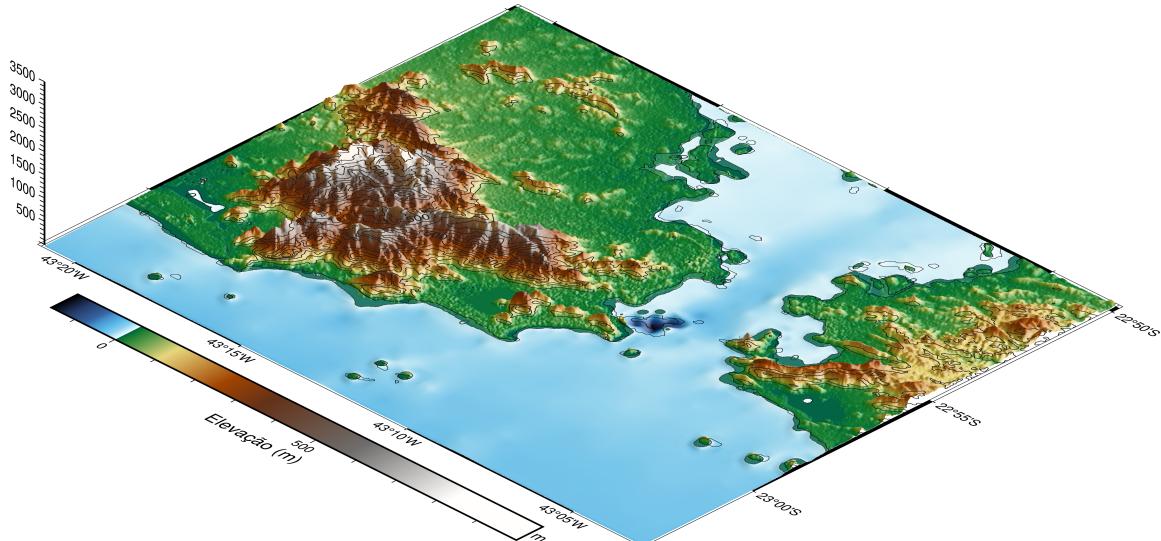


Figura 5: Mapa topográfico 3D do Rio de Janeiro gerado pelo script. Resolução: 30 m; perspectiva: $135^\circ/30^\circ$; sombreamento direccional de 45° .

4.2 Curvas de Nível e Análise Topográfica

As curvas de nível são traçadas a intervalos de 100 m (`levels=100`) e anotadas a cada 500 m (`annotation="500"`), seguindo o padrão cartográfico clássico descrito no documento *Topographic Map Symbols* [3]. Este intervalo permite:

- Análise de gradientes de inclinação: encostas íngremes (ex.: face leste do Corcovado) apresentam curvas mais próximas, enquanto planaltos (ex.: interior da Tijuca)

mostram espaçamento maior.

- Reconhecimento de formas de relevo: vales fluviais, cristas e depressões são facilmente perceptíveis, ligando-se aos algoritmos de contorno eficientes [5] que inspiraram a implementação ordenada das curvas.

Esta representação facilita a compreensão de como o relevo influencia o ambiente urbano, como o escoamento de águas ou o planeamento de infra-estruturas.

4.3 Sombreamento Hipsométrico e Iluminação

O sombreamento direccional (`shading="+a45+nt0.8"`) simula uma fonte de luz a 45° de azimute e intensidade normalizada de 0.8, conforme técnicas de *hill-shading* descritas por Kennelly [4]. Este método:

- **Realça micro-relevos:** encostas voltadas para a luz (nordeste) aparecem mais claras, enquanto as opostas (sudeste) ficam sombreadas, criando um efeito de profundidade.
- **Evita artefactos:** o azimute de 45° evita sombras planas em encostas paralelas à luz, um problema comum em iluminações de 0° ou 90°.
- **Combina com a perspectiva:** o ponto de vista de 135°/30° foi escolhido para maximizar o contraste de sombreamento, oferecendo uma visão clássica e informativa do relevo carioca, ligando-se à perspectiva azimutal explicada anteriormente.

O resultado é uma imagem que simula uma vista natural, ajudando o leitor a “sentir” a tridimensionalidade do terreno.

4.4 Elementos Cartográficos e Legibilidade

- **Linha de costa:** renderizada com resolução completa (`resolution="f"`), em azul claro translúcido (`water="lightblue@80"`), destacando a interface terra-mar e facilitando a identificação da Baía de Guanabara.
- **Fronteiras administrativas:** traçadas em cinza (`borders="1/0.6p,gray"`), permitindo contextualização urbana sem sobrecarregar a imagem.

- **Título e legenda:** posicionados de forma não obstrutiva, com fundo semitransparente para legibilidade, garantindo que o mapa seja autoexplicativo.

Estes elementos, inspirados em símbolos topográficos padrão [3], tornam o mapa acessível, ligando a teoria cartográfica aos resultados práticos.

5 Geração Automática do Mapa

O mapa topográfico é gerado automaticamente através do seguinte script Python, que utiliza a biblioteca PyGMT para processar dados SRTM e criar a visualização 3D:

Mapa 3D gerado com sucesso: 'figuras/mapatopografico.png' (600 DPI)

6 Conclusão

6.1 Síntese da Integração de Conceitos

A integração bem-sucedida dos conceitos de **WGS 84**, **perspectiva azimutal**, **curvas de nível**, **sombreamento hipsométrico** e **algoritmos eficientes para contornos** (conforme [5]) foi fundamental para a geração de uma visualização topográfica 3D precisa, cientificamente rigorosa e esteticamente clara da região metropolitana do Rio de Janeiro.

6.2 Precisão Geodésica com WGS 84

O sistema WGS 84 revelou-se um alicerce de extraordinária robustez para a presente modelação, garantindo que cada feição topográfica do Rio de Janeiro emergisse com fidelidade cartográfica irrepreensível. Ao adoptar este referencial geocêntrico global, o projecto beneficiou de uma coerência posicional que eliminou discrepâncias entre os dados SRTM e a biblioteca PyGMT, permitindo que a delimitação da área de estudo — compreendida entre as coordenadas $[-43.35, -43.05, -23.05, -22.83]$ — se traduzisse directamente em resultados visuais precisos e consistentes.

6.3 Optimização Visual com Perspectiva Azimutal

A **perspectiva azimutal**, configurada como $[135, 30]$ (azimute de 135° a partir do norte, elevação de 30° acima do horizonte), foi estrategicamente escolhida para optimizar a

percepção tridimensional do relevo. Este ângulo de visão, combinado com o sombreamento direccional (`shading="+a45+nt0.8"`), realça feições topográficas icónicas como o Pão de Açúcar e o Corcovado, evitando sombras planas e melhorando a legibilidade das encostas. A técnica de **hill-shading** discutida por Kennelly [4] — que varia intensidade luminosa com base em direcção e inclinação — foi implementada de forma computacional, reforçando o contraste entre vales e picos.

6.4 Precisão Cartográfica com Curvas de Nível

As **curvas de nível**, geradas a cada 100 m e anotadas a 500 m, seguem princípios cartográficos consolidados pelo USGS [3], representando isolinhas de igual elevação com precisão. Inspirado em algoritmos eficientes para contornos em terrenos triangulados [5], o script utiliza `fig.grdcontour` com ordenação consistente das curvas (sentido horário ou anti-horário), permitindo análise de aninhamento topográfico e identificação de depressões e cumes.

6.5 Contribuição e Perspectivas Futuras

Em suma, este trabalho demonstra que a combinação rigorosa de **geodésia (WGS 84)**, **cartografia computacional (PyGMT)**, **algoritmos de contorno**, **técnicas de sombreamento** e **princípios de visualização 3D** resulta numa ferramenta poderosa para análise territorial. A abordagem é escalável, reproduzível e prontamente adaptável a outras regiões, constituindo uma contribuição prática e teórica no campo da cartografia digital.

Futuras evoluções incluem:

- Animações de rotação azimutais para exploração interactiva.
- Integração com dados vectoriais urbanos (ruas, edifícios, transportes).
- Aplicação de algoritmos de contorno em tempo real para grandes áreas.

Referências

- [1] National Imagery and Mapping Agency. *Department of Defense World Geodetic System 1984: Its Definition and Relationships with Local Geodetic Systems*. Rel. téc. National Imagery e Mapping Agency, 2000. URL: <https://gis-lab.info/docs/nima-tr8350.2-wgs84fin.pdf>.
- [2] Pankaj K. Agarwal, Lars Arge, Thomas Mølhave e Bardia Sadri. *I/O-Efficient Algorithms for Computing Contour Maps on Terrains*. Rel. téc. Duke University, University of Aarhus e University of Toronto, 2010. URL: <https://www.cs.toronto.edu/~sadri/publications/contours.pdf>.
- [3] U.S. Geological Survey. *Topographic Map Symbols*. U.S. Geological Survey. 2020. URL: <https://pubs.usgs.gov/gip/TopographicMapSymbols/topomapsymbols.pdf>.
- [4] Patrick J. Kennelly. *Hill-shading Techniques to Enhance Terrain Maps*. Rel. téc. C.W. Post Campus of Long Island University, 2009. URL: https://carto.geogr.msu.ru/cmc/publications/papers/ica_cmc_sessions/6_Santiago_Session_Mountain_Carto/santiago_kennelly.pdf.
- [5] MicroImages, Inc. *3D Perspective Visualization with TNTmips*. MicroImages, Inc. 2008. URL: https://www.academia.edu/23618207/3D_Perspective_Visualization.
- [6] Mei-Po Kwan e J. Lee. «Geovisualization of Human Activity Patterns Using 3D GIS: A Time-Geographic Approach». Em: *Spatially Integrated Social Science* (2003). URL: http://meipokwan.org/Paper/Best_2003.pdf.