

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DINÂMICA DOS OCEANOS E DA TERRA

FLÁVIO ALVES DA CUNHA SILVA

**ANÁLISE DE TÉCNICAS DE LEVANTAMENTOS DE LINHA DE COSTA DA
REGIÃO DE NITERÓI**

Niterói-RJ
2024

FLÁVIO ALVES DA CUNHA SILVA

**ANÁLISE DE TÉCNICAS DE LEVANTAMENTOS DE LINHA DE COSTA DA
REGIÃO DE NITERÓI**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e Terra, da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre.
Área de Concentração: Hidrografia.

Orientador: Prof. Dr. Arthur Ayres Neto

Niterói, RJ
2024

Ficha catalográfica automática - SDC/BIG
Gerada com informações fornecidas pelo autor

S586a Silva, Flávio Alves Da Cunha
ANÁLISE DE TÉCNICAS DE LEVANTAMENTOS DE LINHA DE COSTA DA
REGIÃO DE NITERÓI / Flávio Alves Da Cunha Silva. - 2024.
77 f.: il.

Orientador: Arthur Ayres Neto.
Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense,
Instituto de Geociências, Niterói, 2024.

1. Hidrografia. 2. Linha de costa. 3. Geodésia. 4.
Sensoriamento Remoto. 5. Produção intelectual. I. Neto,
Arthur Ayres, orientador. II. Universidade Federal Fluminense.
Instituto de Geociências. III. Título.

CDD - XXX

FLÁVIO ALVES DA CUNHA SILVA

**ANÁLISE DE TÉCNICAS DE LEVANTAMENTOS DE LINHA DE COSTA DA
REGIÃO DE NITERÓI**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e Terra, da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre.
Área de Concentração: Hidrografia.

Aprovada em 30 de Agosto de 2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Arthur Ayres Neto
UFF – Universidade Federal Fluminense

Dr. Christopher Florentino.
CHM – Centro de Hidrografia da Marinha

Prof. Dr. Luiz Guimarães Barbosa
UFRRJ – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Vitor Hugo Fernandes
UFRRJ – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Niterói, RJ
2024

*Ao meu avô Murilo Alves
Da Cunha pelo apoio e incentivo
aos estudos geográficos...*

AGRADECIMENTOS

À minha família, por todo amor e apoio de sempre, que foram essenciais para minha trajetória até aqui.

À minha companheira Ruth Venturini, por todo amor, apoio e incentivo, como também, parceria em longas conversas técnicas advindas de sua excelência como Engenheira Cartógrafa.

Ao Prof. Dr. Arthur Ayres Neto, pelas oportunidades, apoio e orientação, ao longo de todo o período da pesquisa, sem sua serenidade e conhecimento de excelência em hidrografia o processo científico não teria ocorrido.

Aos membros da banca, por aceitarem o convite e assim contribuírem com seus conhecimentos e expertises para a melhoria do trabalho.

Aos professores do DOT, por darem suas aulas com excelência, criando assim, um ambiente próspero para a produção científica.

Ao CIAARA, CHM e à Marinha do Brasil, pelo apoio nos dados levantados, bem como em todo suporte e incentivo para a pesquisa deste trabalho.

A todo o grupo de professores do CIAARA, que com suas expertises, me apoiaram, instruíram e discutiram ideias, sendo de suma importância para a construção científica deste trabalho.

Aos militares do CIAARA, que apoiaram tanto na construção dos dados como no esforço para me disponibilizar tempo para a produção científica, em especial aos comandantes Dante Jose de Andrade, Romivaldo Silva Vasques e Rodrigo Felipe Marques.

A todos os meus amigos que me apoiaram e incentivaram ao longo da trajetória, em especial aos amigos Iane Silva Pereira e Heraldo Alcântara de Andrade, que estiveram presentes nos momentos difíceis da construção da pesquisa.

A todos que, de alguma maneira, contribuíram para que este trabalho tenha sido realizado.

“Descobri que são as pequenas coisas, as tarefas diárias de pessoas comuns que fazem as grandes diferenças, simples ações de bondade e amor.”
-Mithrandir, J.R.R Tolkien.

RESUMO

Com a grande dimensão da fronteira marítima brasileira e sua diversidade morfológica, o estudo da costa se mostra significativo para a vida dos habitantes. Entre as diversas áreas de estudo costeiro, o traçado da linha de costa impacta diretamente a navegação e o patrimônio territorial. Tendo em vista essas problemáticas, o presente trabalho analisa as técnicas de rastreo cinemático GNSS, fotogrametria com drones e vetorização de imagens por satélite com o intuito de dimensionar as possíveis qualidades de cada técnica para a os levantamentos dos diversos tipos de linha de costa brasileira. As técnicas foram utilizadas repetidas vezes na região leste de Niterói, produzindo linhas de costa da região sobrepostas a pontos de controle de alta precisão, nos quais os levantamentos aerofotogramétricos obtiveram a melhor acurácia posicional em relação às três técnicas estudadas, e a vetorização de imagens por satélite se mostrou a técnica mais efetiva em termos de tempo de produção por quilômetros. Estes resultados apontam que a técnica cinemática GNSS, diferente do apontado por outros estudos, pode não ser a melhor técnica em termos posicionais, bem como trazem dados significativos para uma análise de qual técnica usar para cada determinado tipo de levantamento.

Palavras-chave: Linha de costa; rastreo cinemático; drone; imagem por satélite.

ABSTRACT

Given the extensive Brazilian maritime border and its morphological diversity, the study of the coast is significant for the lives of its inhabitants. Among the various coastal study areas, the coastline tracing directly impacts navigation and territorial heritage. Considering these issues, this dissertation analyzes the techniques of kinematic GNSS tracking, photogrammetry with drones, and satellite image vectorization to assess the potential advantages of each technique for the diverse surveys of Brazilian coastlines. The techniques were repeatedly applied in the eastern region of Niterói, producing coastline overlaid with high-precision control points, in which aerophotogrammetric surveys achieved the best positional accuracy among the three studied techniques, while satellite image vectorization proved to be the most time-efficient method for production per kilometer. These findings suggest that the kinematic technique, unlike to other studies, may not be the best technique in terms of positional accuracy. Additionally, the data provide valuable insights for selecting the appropriate technique for specific types of surveys.

Keywords: Coastline; kinematic GNSS; drone; satellite image.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	pág. 13
1.1. PROBLEMA	pág. 13
1.2. HIPÓTESE	pág. 14
1.3. JUSTIFICATIVA	pág. 14
1.4. OBJETIVOS	pág. 14
2. REFERENCIAL TEÓRICO	pág. 16
2.1. LINHA DE COSTA	pág. 16
2.1.1. MEDIÇÃO DE LINHA DE COSTA	pág. 17
2.1.1.1. NORMATIVAS PARA A MEDIÇÃO DE LINHA DE COSTA	pág. 17
2.2. INTRODUÇÃO AO GNSS	pág. 18
2.2.1. OBSERVÁVEIS GNSS	pág. 19
2.2.2. ERROS NAS OBSERVÁVEIS	pág. 20
2.2.2.1. MULTICAMINHAMENTO	pág. 21
2.3. DILUIÇÃO DE PRECISÃO	pág. 22
2.4. MÉTODOS DE POSICIONAMENTO	pág. 22
2.4.1. POSICIONAMENTO RELATIVO	pág. 23
2.4.1.1. POSICIONAMENTO RELATIVO ESTÁTICO	pág. 23
2.4.1.2. POSICIONAMENTO RELATIVO CINEMÁTICO	pág. 24
2.5. SENSORIAMENTO REMOTO	pág. 25
2.5.1. IMAGENS ORBITAIS	pág. 25
2.5.2. IMAGENS AÉREAS	pág. 26
2.5.2.1. VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO	pág. 27
2.5.3. PROCESSAMENTO DE DADOS	pág. 27
3. MATERIAL E MÉTODOS	pág. 29
3.1. ÁREA DE ESTUDO	pág. 29
3.2. LEVANTAMENTO ESTÁTICO	pág. 30
3.3. LEVANTAMENTO CINEMÁTICO	pág. 37

3.4. LEVANTAMENTO AEROFOTOGRAMÉTRICO	pág. 39
3.4.1 VETORIZAÇÃO DOS ORTOMOSAICOS	pág. 44
3.5. IMAGEM DE SATÉLITE	pág. 45
3.5.1 VETORIZAÇÃO DAS IMAGENS POR SATÉLITE	pág. 47
4. RESULTADOS	pág. 48
4.1. PONTOS DE CONTROLE.....	pág. 48
4.2. RASTREIOS CINEMÁTICOS	pág. 48
4.3. AEROFOTOGRAMETRIA	pág. 57
4.4. IMAGENS DE SATÉLITE	pág. 59
5. DISCUSSÃO	pág. 63
5.1. ANÁLISES INDIVIDUAIS DOS MÉTODOS	pág. 63
5.2. ANÁLISES POSICIONAIS COMPARATIVAS	pág. 70
5.3. ANÁLISES COMPARATIVAS DE TEMPO	pág. 72
6. CONCLUSÃO	pág. 73
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	pág. 74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Levantamentos Estáticos	pág. 31
Tabela 2. Precisão do posicionamento relativo em função do tempo de observação, equipamento utilizado e comprimento da linha de base	pág. 32
Tabela 3. Levantamentos Cinemáticos	pág. 37
Tabela 4. Resultado dos pontos de controle.....	pág. 48
Tabela 5. Qualidade posicional dos processamentos cinemáticos	pág. 49
Tabela 6. Discrepância entre o cinemático 1 e os pontos de controle.....	pág. 51
Tabela 7. Discrepância entre o cinemático 2 e os pontos de controle.....	pág. 52
Tabela 8. Discrepância entre o cinemático 3 e os pontos de controle.....	pág. 53
Tabela 9. Discrepância entre o cinemático 4 e os pontos de controle.....	pág. 54
Tabela 10. Discrepância entre o cinemático 5 e os pontos de controle.....	pág. 56
Tabela 11. Discrepância entre os rastreios cinemático e os de controle.....	pág. 56
Tabela 12. Discrepância entre as vetorizações dos ortomosaicos e os pontos de controle....	pág. 59
Tabela 13. Discrepância entre as vetorizações das imagens de satélite e os pontos de controle	pág. 61
Tabela 14. Qualidade posicional dos processamentos cinemáticos	pág. 63
Tabela 15. Enquadramento da qualidade posicional dos processamentos cinemáticos	pág. 67
Tabela 16. Enquadramento da qualidade posicional das vetorizações dos ortomosaicos ...	pág. 68
Tabela 17. Enquadramento da qualidade posicional das vetorizações das imagens de satélite	pág. 70
Tabela 18. Diferença da acurácia média e melhores resultados entre as três técnicas estudadas	pág. 71
Tabela 19. Tempo médio envolvido nas etapas das três técnicas estudadas	pág. 72

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Quadro 1 – Valores de incerteza exigida em cada ordem de levantamento hidrográfico ...	pág. 18
Quadro 2 – Fontes e erros envolvidos no GNSS	pág. 20
Figura 1 – Definição da Geolocalização da Linha de Costa	pág. 16
Figura 2 – Erro de multicaminhamentos	pág. 21
Figura 3 – Posicionamento Relativo Estático	pág. 24
Figura 4 – Localização da área de estudo, região de Gragoatá, Ingá, Icaraiá	pág. 29
Figura 5 – Ponte da Boa Viagem – Gragoatá	pág. 30
Figura 6 – Localização dos pontos de verificação.....	pág. 31
Figura 7 – Distribuição de RBMC	pág. 33
Figura 8 – Antena da RJNI instalada na UFF	pág. 34
Figura 9 – Interface do software RTKLIB com RTKPOST em vermelho	pág. 35
Figura 10 – Interface do módulo RTKPOST com dados RINEX, Efemérides e Erros	pág. 35
Figura 11 – Interface do módulo RTKPOST com configuração estática	pág. 36
Figura 12 – Interface do módulo RTKPOST com posição da RBMC	pág. 36
Figura 13 – Operadores em deslocamento sobre linha de costa fixa	pág. 38
Figura 14 – Interface do módulo RTKPOST com configuração cinemática	pág. 39
Figura 15 – Início do voo fotogramétrico do drone DJI MAVIC 2 PRO	pág. 40
Figura 16 – Rastreamento dos pontos de controle com tecido fotoidentificável	pág. 41
Figura 17 – Ortomosaico do Drone processado com <i>Agisoft Metashape</i>	pág. 42
Figura 18 – Mosaico de ortofotos selecionadas no SisGeo	pág. 43
Figura 19 – Ortofotos em camadas no software QGIS	pág. 44
Figura 20 – Processo de vetorização com a ferramenta “ <i>Add Line Feature</i> ” do software QGIS	pág. 45
Figura 21 – Utilização da ferramenta “ <i>QuickMapService</i> ” do software QGIS	pág. 46
Figura 22 – Ruídos pontuais nos Rastreamento Cinemático	pág. 49
Figura 23 – Rastreamento Cinemático da equipe 1	pág. 50
Figura 24 – Desvio de trajeto do rastreamento cinemático da equipe 1 (verde)	pág. 51
Figura 25 – Rastreamento Cinemático da equipe 2	pág. 52
Figura 26 – Rastreamento Cinemático da equipe 3	pág. 53
Figura 27 – Rastreamento Cinemático da equipe 4	pág. 54

Figura 28 – Rastreo Cinemático da equipe 5	pág. 55
Figura 29 – Vetorizações dos ortomosaicos sobrepostas	pág. 57
Figura 30 – Mosaico das diferenças entre as vetorizações dos ortomosaicos	pág. 58
Figura 31 – Vetorizações das linhas de costa sobrepostas na imagem de satélite.....	pág. 60
Figura 32 – Mosaico das diferenças entre as vetorizações da imagem de satélite	pág. 60
Figura 33 – Sobreposição dos 5 levantamentos cinemáticos	pág. 64
Figura 34 – Sobreposição dos 5 levantamentos cinemáticos em um trecho de linha de costa fixa e retilínea.....	pág. 65
Figura 35 – Sobreposição dos 5 levantamentos cinemáticos com mudança de tipo de linha de costa	pág. 66

1. INTRODUÇÃO

A região costeira representa ambientes complexos e dinâmicos, sujeitos a processos naturais de erosão e deposição, devido à ação das ondas e das correntes, bem como a fatores antrópicos, como a urbanização e a ocupação desordenada. A delimitação da linha de costa é essencial para o planejamento adequado de diversas atividades humanas, como a navegação, construção de infraestruturas costeiras, gerenciamento de riscos naturais e conservação dos ecossistemas litorâneos.

Tendo em vista a diversidade de tipos de costa ao longo do litoral brasileiro, as definições de linha de costa ainda se desencontram em algumas publicações da literatura.

Quando uma informação de linha de costa é dúbia quanto a sua definição, ou mesmo se existe um erro significativo na sua qualidade posicional, podem vir a ocorrer acidentes na navegação, envolvendo vidas humanas, como também problemas jurídicos advindos de erros de projetos ou até mesmo disputas de propriedade. Isso faz com que estudos que resultem em melhorias na definição e demarcação da linha de costa sejam imprescindíveis para ajudar a minimizar essas problemáticas.

Existem diversas técnicas de levantamento de geoinformação, que podem ser utilizadas para a demarcação de linha de costa. Entre elas podem-se destacar o sensoriamento remoto, a aerofotogrametria e o posicionamento cinemático por satélites GNSS (*Global Navigation Satellite System*). Todas têm resultados posicionais e custos operacionais diferentes, bem como podem ser usadas em diferentes tipos de regiões costeiras.

Assim, este trabalho envolve três etapas principais: i) levantamento da bibliografia existente acerca do assunto, ii) análise crítica de diferentes metodologias usadas na demarcação de linha de costa e iii) a proposição da utilização de técnicas de levantamento específicas para diferentes regiões costeiras.

1.1. PROBLEMA

Qual das técnicas disponíveis para demarcação de linha de costa permite alcançar a melhor qualidade posicional e com melhor relação custo/benefício dos levantamentos de linha de costa? Existe um método de levantamento que melhor se aplica a um tipo específico de linha de costa?

1.2. HIPÓTESE

Diferentes técnicas de levantamento e métodos de processamento dos dados fornecem qualidades posicionais diferentes. Além disso, cada tipo de linha de costa requer uma técnica de levantamento específica para alcançar uma melhor acurácia e maximizar as logísticas envolvidas no processo.

1.3. JUSTIFICATIVA

É comum a mudança natural da linha de costa ao longo do tempo devido à erosão costeira, aumento do nível do mar e outros fatores ambientais e antrópicos. Quando as autoridades não ajustam suas demarcações de linhas de costa, à medida que essas mudanças acontecem, problemas em relação à gestão costeira e ao desenvolvimento urbano próximo à costa podem ocorrer.

O Brasil tem uma região costeira de proporções continentais, sendo o quinto maior país do mundo em extensão, com aproximadamente 8 mil quilômetros de linha de costa, sem levar em conta os recortes como as baías, reentrâncias, que ampliam significativamente essa extensão, elevando-a para mais de 8,5 mil quilômetros (IBGE,2011).

Tendo em vista a magnitude citada, evidencia-se a complexidade de mapeamento e atualização dos dados de linha de costa pelas autoridades competentes, na qual o trabalho mesmo que constante tem dificuldade para se manter atualizado em todo território nacional.

Neste contexto o avanço da tecnologia e o estudo de técnicas que otimizem o processo de levantamento de informações costeiras e aumentem a precisão das informações é uma forma de minimizar as desatualizações, como também apoiar as atividades humanas que dependem de tal dado, muitas vezes evitando acidentes e até mesmo problemas jurídicos.

1.4. OBJETIVOS

Geral

O objetivo do trabalho será avaliar e comparar as técnicas de levantamento de linhas de costa na região do município de Niterói, Estado do Rio de Janeiro.

Objetivos específicos

- Obter dados de levantamentos GNSS, aerofotogramétricos e de satélites nas diferentes feições de linha de costa da região leste de Niterói.
- Processar os dados com softwares livres e técnicas padronizadas.
- Determinar as coordenadas geodésicas e os respectivos desvios padrões de cada levantamento.
- Comparar as discrepâncias de cada técnica de levantamento de linha de costa nos pontos de verificação.
- Identificar as vantagens e desvantagens das respectivas técnicas de levantamento para as diferentes regiões costeiras estudadas.

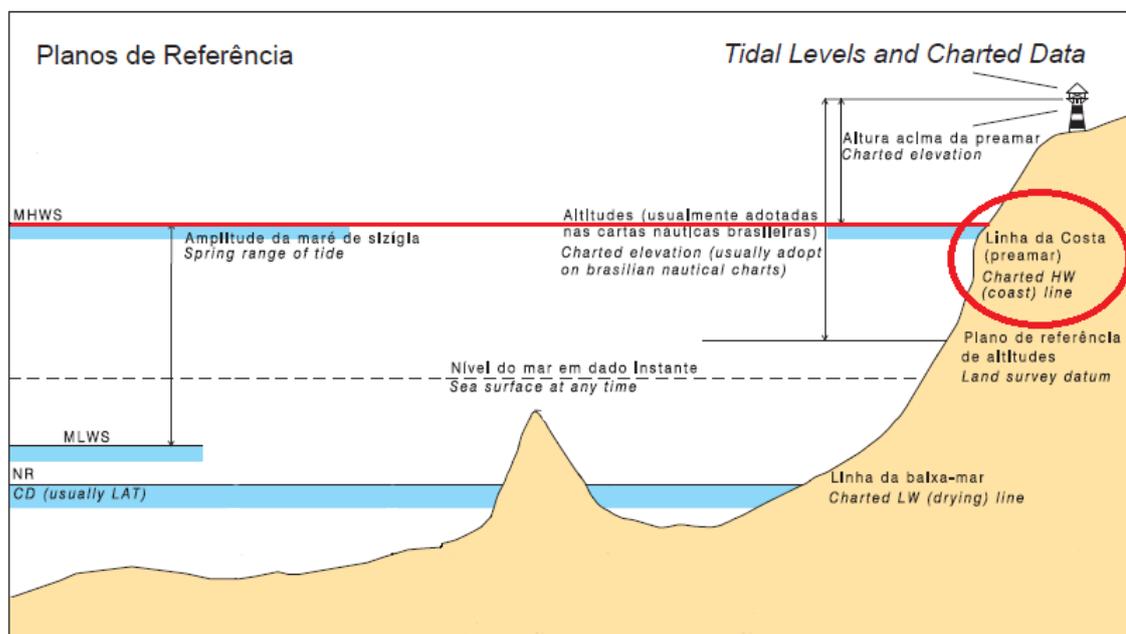
2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. LINHA DE COSTA

Existem diversas definições para linha de costa. A Organização Hidrográfica Internacional, em uma publicação do Dicionário de Hidrografia, define de maneira abrangente como a linha onde a costa e a água se encontram (IHO, 2019), enquanto na publicação sobre Regulamentos e Especificações para cartas é descrita como a linha de maré alta ou a linha do nível médio de água, onde não há variação considerável do nível de água (IHO, 2021).

Outra definição é a da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN, 2022) que relaciona a linha de costa das cartas náuticas brasileiras com o nível médio da preamar, como pode ser visto na Figura 1.

Figura 1 – Definição da Geolocalização da Linha de Costa



Fonte: Adaptado de DHN (2022).

Já, segundo Boak e Turner (2005), linha de costa pode ser definida como um fenômeno dinâmico, no qual ocorre a interseção entre as superfícies do terreno e da água em um determinado instante. Esta pode ser afetada em diferentes escalas de tempo e espaço e variar por inúmeros aspectos, nos quais destacam-se a influência de fenômenos naturais (como ondas, marés e tempestades) e as características geomorfológicas da costa.

Estas variações de relevo são em função da geologia do terreno que pode incluir ambiente arenoso, costões rochosos, falésias, campo de dunas, limites de deltas e outros ambientes relacionados à área costeira (FONSECA, 2009). A depender do tipo de relevo, os recuos podem variar de apenas alguns milímetros ou serem da ordem de vários metros por ano (OLIVEIRA, 2005).

2.1.1. MEDIÇÃO DE LINHA DE COSTA

Algumas técnicas podem ser utilizadas para a extração da linha de costa, como a topografia, a aerofotogrametria e o posicionamento por satélite. Boak e Turner (2005) fizeram uma revisão sobre o tema mostrando que a maior parte das fontes de informação eram as fotografias aéreas, cuja extração era feita quase que exclusivamente de maneira manual.

Já o trabalho desenvolvido por Pajak e Leatherman (2002), demonstra que os dados adquiridos por meio de levantamentos GNSS foram considerados mais precisos do que os adquiridos por fotointerpretação. Entretanto, devido à evolução das técnicas e equipamentos, são necessários novos estudos acerca do tema.

2.1.2.1. NORMATIVAS PARA A MEDIÇÃO DE LINHA DE COSTA

A Organização Hidrográfica Internacional, em sua norma sobre Especificação para Levantamentos Hidrográficos, dita parâmetros e medidas a serem adotados pela comunidade visando a garantir a segurança de navegação e qualidade dos dados.

Nesta norma (IHO, 2020) os levantamentos são classificados em cinco ordens, de acordo com profundidade, propriedades geofísicas e o tipo de uso esperado, sendo elas:

- Ordem Exclusiva: áreas onde a folga abaixo da quilha e a manobrabilidade são estritamente mínimas;
- Ordem Especial: áreas onde a folga abaixo da quilha é crítica;
- Ordem 1A: áreas onde, embora a folga abaixo da quilha não seja um problema, espera-se que possam existir estruturas/feições que podem colocar em risco a navegação;
- Ordem 1B: áreas onde a folga abaixo da quilha não é considerada um problema para o tipo de navios à superfície esperado na área;
- Ordem 2: áreas onde a descrição geral do fundo é considerada adequada.

No Quadro 1, a seguir, são apresentados os requisitos mínimos relativos às incertezas horizontais e verticais segundo as ordens de levantamento para linha de costa (linha de preamar, baixa-mar, nível médio etc.) e objetos fixos (ajudas/auxílios, estruturas/feições significativas para a navegação, acima do referencial vertical).

Quadro 1 – Valores de incerteza exigida em cada ordem de levantamento hidrográfico

Crítérios	Tipo de Incerteza	Ordem 2	Ordem 1B	Ordem 1A	Ordem Especial	Ordem Exclusiva
Linha De Costa	Incerteza Horizontal Total	10 metros	10 metros	10 metros	10 metros	5 metros
Objetos Fixos	Incerteza Horizontal Total	5 metros	2 metros	2 metros	2 metros	1 metro
	Incerteza Vertical Total	2 metros	2 metros	1 metro	0,5 metro	0,25 metro

Fonte: Adaptado de IHO (2020).

2.2 INTRODUÇÃO AO GNSS

O termo *Global Navigation Satellite Systems* - GNSS - teve origem em 1991, sendo adotado para unificar os sistemas de navegação por satélite, já que esta junção pode proporcionar uma maior cobertura, acarretando uma melhora na acurácia, uma vez que os mesmos podem ser combinados de forma a oferecer ao usuário uma melhor resposta, devido ao maior número de satélites disponíveis (SEEBER, 2003; TEUNISSEN e MONTENBRUCK, 2017).

O GNSS possibilita a determinação da posição de um objeto de interesse situado sobre a superfície terrestre por meio das informações de tempo e posição. Estas informações podem ser utilizadas para estabelecer coordenadas tridimensionais de pontos com precisão milimétrica. As características desse sistema são: fornecimento contínuo aos usuários, disponibilidade e integridade (HUINCA, 2009).

O GNSS é formado atualmente por quatro constelações de caráter global, dos quais os primeiros sistemas foram declarados operacionais em 1995, sendo esses o GPS - *Global*

Positioning System - desenvolvido pelos Estados Unidos e o GLONASS – Sistema global de navegação por satélite - de responsabilidade da Rússia e posteriormente os sistemas Galileo (europeu) e o BeiDou - *Big Dipper* (chinês), juntamente com outros sistemas locais de posicionamento, gerenciados por outros países (TEUNISSEN e MONTENBRUCK, 2017).

2.2.1. OBSERVÁVEIS GNSS

Segundo Teunissen e Montenbruck (2017), é possível identificar por meio das informações dos sinais transmitidos pelos satélites quatro tipos de observáveis GNSS, sendo as principais utilizadas no posicionamento a pseudodistância e a fase da onda portadora.

A pseudodistância, segundo Camargo (1999), recebe este nome devido ao não sincronismo entre os relógios do receptor e do satélite. É determinada pelo tempo de propagação do sinal, contado a partir da sua geração no satélite até a sua chegada ao receptor multiplicado pela velocidade da luz no vácuo, além de outros fatores que interferem no sinal. Pode ser modelada pela seguinte equação (MONICO, 2008):

$$PD_R^S = \rho_r^S + d\rho_r^S + c[dt_r - dt^S] + I_r^S + T_r^S + dm_r^S + \varepsilon_{PDR}^S \quad (1)$$

em que:

- ρ_r^S : distância geométrica entre o satélite, no instante de transmissão do sinal, e o receptor no instante de recepção do sinal (m);
- $d\rho_r^S$: é o erro na distância geométrica (normalmente devido ao erro na órbita do satélite) (m);
- c : velocidade da luz no vácuo (m/s);
- dt_r : erro do relógio do receptor (s);
- dt^S : erro do relógio do satélite (s);
- I_r^S : erro devido à ionosfera (m);
- T_r^S : erro devido à troposfera (m);
- dm_r^S : erro devido ao multicaminho (m); e
- ε_{PDR}^S : erros dos efeitos não modelados e aleatórios.

Já a fase da onda portadora é, segundo Monico (2008), uma observável básica para a maioria das atividades geodésicas, uma vez que é mais precisa que a pseudodistância. É obtida a partir da diferença entre a fase gerada pelo satélite no instante de transmissão do sinal e sua réplica gerada pelo receptor no instante de recepção do sinal. Apenas uma medida fracionária é obtida, restando um número inteiro de ciclos no instante inicial do rastreo, denominado de ambiguidade, sendo sua equação dada por (MONICO, 2008):

$$\Phi_r^S(t) = \Phi^S(t) - \Phi_r(t) + N_r^S + \varepsilon\Phi_r^S \quad (2)$$

em que:

- Φ^S : diferença de fase do sinal do satélite recebido no receptor;
- Φ_r : réplica do sinal gerado pelo receptor;
- t : momento de recepção do sinal;
- N_r^S : ambiguidade de fase; e
- $\varepsilon\Phi_r^S$: o erro da fase da onda portadora.

2.2.2. ERROS NAS OBSERVÁVEIS

Durante o processo de medição as observáveis envolvidas podem apresentar erros aleatórios, sistemáticos e grosseiros. No Quadro 2 são apresentados os erros sistemáticos (e suas fontes) que podem deteriorar a confiabilidade do posicionamento, sendo necessário tratamento dos mesmos para a obtenção de melhores resultados (MONICO, 2008).

Quadro 2 – Fontes e erros envolvidos no GNSS

Fontes	Erros
Satélite	Erro da órbita Erro do relógio Relatividade Atraso entre duas portadoras no <i>hardware</i> do satélite Centro de fase da antena do satélite Fase <i>wind-up</i>
Propagação do Sinal	Refração troposférica Refração ionosférica Perdas de ciclos Multicaminho ou sinais refletidos Rotação da Terra
Receptor/Antena	Erro do relógio Erro entre os canais Centro de fase da antena do receptor Atraso entre duas portadoras no <i>hardware</i> do receptor

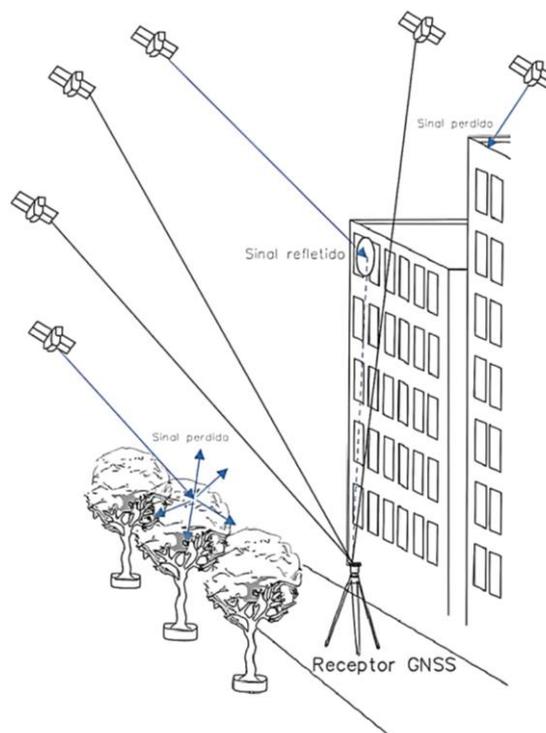
Fontes	Erros
	Fase <i>wind-up</i>
Estação	Erro nas coordenadas Multicaminho ou sinais refletidos Marés terrestres Movimento do Polo Carga oceânica Pressão atmosférica

Fonte: Monico (2008).

2.2.2.1. MULTICAMINHAMENTO

O efeito do multicaminhamento (Figura 2) pode ser descrito como os sinais que chegam ao receptor além dos propagados diretamente pelas antenas. Estes sinais podem ser refletidos pelas superfícies vizinhas da antena receptora, como árvores e construções. Esta reflexão gera um atraso no sinal, originando um maior comprimento do caminho percorrido, provocando uma distorção do sinal emitido (MONICO, 2008; TEUNISSEN e MONTENBRUCK, 2017).

Figura 2 – Erro de multicaminhamento



Fonte: Brito (2023).

Nas aplicações de posicionamento estático e cinemático, este pode ser considerado como uma das maiores fontes de erros, uma vez que possui um maior impacto quando comparado a outros tipos de efeitos (TEUNISSEN e MONTENBRUCK, 2017).

2.3. DILUIÇÃO DE PRECISÃO

A disposição geométrica dos satélites afeta diretamente a qualidade do posicionamento. O *Dilution of Precision* – DOP – descreve a configuração geométrica dos satélites visíveis, como apresentado na seguinte equação (YUEN e DRIELS 2009):

$$\text{Acurácia da solução} = \text{Acurácia da observações} \times \text{DOP} \quad (3)$$

Segundo Monico (2008), o volume da figura geométrica formada pelos vetores unitários que unem os satélites e os receptores são inversamente proporcionais ao DOP, uma vez que, quanto mais dispersos estiverem os satélites visíveis, menor será a propagação dos erros de observação.

O DOP pode assumir as seguintes formas: GDOP (*Geometric DOP*) – contribuição da geometria na qualidade da posição tridimensional e do tempo; PDOP (*Position DOP*) - contribuição da geometria na qualidade da posição tridimensional; HDOP (*Horizontal DOP*) - contribuição na qualidade da posição horizontal (latitude e longitude); VDOP (*Vertical DOP*) - contribuição na qualidade da posição vertical (altitude geométrica); TDOP (*Time DOP*) - contribuição na qualidade da determinação do tempo (ou seja, do erro do relógio do receptor).

2.4. MÉTODOS DE POSICIONAMENTO

O posicionamento GNSS está relacionado à determinação da posição de objetos sobre a superfície terrestre em relação a um referencial específico. Existem diversos métodos que podem ser executados de maneira absoluta ou relativa (MONICO, 2008).

O posicionamento absoluto ocorre quando as coordenadas se encontram associadas diretamente ao geocentro, enquanto que no relativo as coordenadas são determinadas com relação a um referencial materializado por um ou mais vértices com coordenadas conhecidas (HOFFMANN-WELENHOF; LICHTENEGGER e COLLINS, 2007).

Variações vão ocorrer em função do método utilizado, como: posicionamento por ponto preciso, relativo estático, relativo cinemático, posicionamento em tempo real, entre outros.

2.4.1. POSICIONAMENTO RELATIVO

Para realizar o posicionamento relativo, é fundamental dispor de pelo menos dois receptores, onde um deles deve estar em uma estação de referência com coordenadas conhecidas no referencial de interesse e outro na estação de interesse, formando assim uma linha de base (LEICK, 2004).

Entretanto, atualmente é possível realizar o posicionamento relativo com apenas um receptor. Graças ao surgimento dos Sistemas de Controle Ativo – SCA –, não existe mais a exigência de ocupar a estação base, havendo apenas a necessidade de acessar os dados de uma ou mais estações pertencentes ao SCA (MONICO, 2008).

No Brasil a principal rede de referência é a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS – RBMC –, disponibilizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE –, sendo possível encontrar estações por todo o território brasileiro.

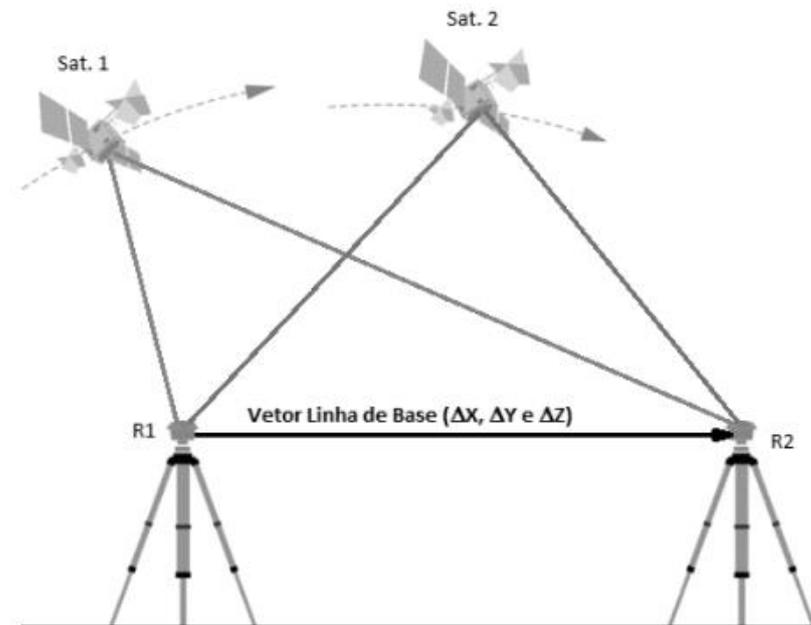
Para a determinação da linha de base, é necessário o uso de dois receptores GNSS simultaneamente para que combinações lineares possam ser formadas e levem à simples diferença de fase, dupla diferença de fase e tripla diferença de fase, sendo possível eliminar os principais erros sistemáticos comuns aos dois receptores. Porém, nesse método quanto maior a linha de base, menor a eficiência da redução dos erros espacialmente correlacionados (HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER e WASLE, 2008).

O posicionamento relativo pode ser diferenciado em quatro grupos: estático, estático-rápido, semicinemático e cinemático.

2.4.1.1. POSICIONAMENTO RELATIVO ESTÁTICO

No posicionamento relativo estático (Figura 3) tanto o receptor de referência quanto o da estação com coordenadas a determinar permanecem estacionários durante todo o levantamento (GEMAEL, 2004).

Figura 3 – Posicionamento Relativo Estático



Fonte: Marques, Pacheco e Tanajura (2016)

Com a duração podendo variar de 20 minutos até várias horas, no qual o tempo mínimo de coleta está relacionado ao comprimento da linha de base e do ambiente em que os receptores estão posicionados, ambientes com menor número de obstruções e com baixa atividade ionosférica necessitam de menor tempo para solucionar a ambiguidade (MONICO, 2008).

2.4.1.2. POSICIONAMENTO RELATIVO CINEMÁTICO

No posicionamento relativo cinemático a observável fundamental é a fase da onda portadora, mesmo que o uso da pseudodistância seja de extrema importância para a solução do vetor de ambiguidades. Os dados deste tipo de posicionamento podem ser processados após a coleta (pós-processado) ou durante a própria coleta (tempo real).

Quando é utilizado o método de posicionamento cinemático pós-processado, um receptor ocupa uma estação de coordenadas conhecidas enquanto o outro se desloca sobre as feições de interesse. As observações simultâneas dos dois receptores possibilitam calcular as duplas diferenças, nas quais vários erros envolvidos nas observáveis são reduzidos (MONICO, 2008).

2.5.SENSORIAMENTO REMOTO

O sensoriamento remoto é a técnica utilizada para a coleta de informações de um objeto sem o contato físico, muitas vezes a longas distâncias, podendo ainda ser em diversas faixas do espectro eletromagnético. As primeiras medições por sensoriamento remoto foram realizadas por meio de câmeras acopladas em aeronaves, balões, pipas, foguetes e até pássaros. Atualmente, imagens de sensores remotos podem ser obtidas a partir de diversas plataformas, como satélites, aeronaves e VANT - veículos aéreos não tripulados (SHIRATSUCHI, 2014).

Os sensores podem ser classificados de diversas maneiras: quanto à fonte de energia captada, ao nível de altitude, região do espectro em que operam, resolução, entre outros.

Segundo Florenzano (2002), como a distância entre os sensores empregados e a superfície da Terra é variável, os mesmos podem ser classificados em três níveis de altitude: orbital – sensores a bordo de satélites artificiais, aéreo – sensores a bordo de aeronaves e campo – sensores implantados em estruturas terrestres.

Já de acordo com Crosta (1999) e Mustard e Sunshine (1999), a resolução pode ser dividida em espacial, espectral, temporal e radiométrica. A resolução espacial refere-se à habilidade do sistema sensor de distinguir objetos que são próximos espacialmente, quanto menor o objeto, maior deve ser a resolução espacial do sistema, para que sua detecção seja possível. Já a resolução espectral é a quantidade e a largura dos intervalos de comprimentos de onda do espectro eletromagnético medida pelo sistema, de modo que, quanto maior o número de faixas e menor sua largura, maior é a capacidade do sistema registrar diferenças espectrais entre os objetos. A resolução temporal é a frequência temporal com a qual um determinado alvo será amostrado pelo sensor, enquanto a resolução radiométrica é dada pela sensibilidade dos sensores em distinguir os sinais de retorno da energia radiante que atinge o alvo.

2.5.1. IMAGENS ORBITAIS

O Sensoriamento Remoto Orbital tem destaque devido a sua capacidade de fornecer imagens em intervalos regulares de diversos ambientes. Tem como característica a obtenção de informações sobre a superfície da Terra por meio de imagens adquiridas do espaço, utilizando radiação eletromagnética refletida ou emitida, em uma ou mais regiões do espectro eletromagnético (ZANOTTA, 2019).

Segundo Câmara et al. (2001), algumas características importantes de imagens provenientes dos satélites são as resoluções espaciais, temporais, espectrais e radiométricas, citadas acima.

Existem várias séries de satélites em operação, entre eles têm destaque: *LAND SATellite* – LANDSAT –, desenvolvido pela NASA, iniciou sua operação em 1972 foi o primeiro a obter de forma sistemática imagens sinópticas de média resolução; *Système Probatoire d'Observation de la Terre* – SPOT –, projeto francês lançado em 1978; *China-Brazil Earth Resources Satellite* – CBERS –, parceria entre Brasil e China, lançado em 1999; IKONOS da empresa DigitalGlobe, lançado em 1999 e com alta resolução (FIGUEIREDO, 2005).

Para a obtenção de uma imagem de satélite são necessários alguns passos. Destacam-se como os principais a identificação de instituições ou softwares que comercializam ou distribuem estas imagens e a definição da área de interesse. No Brasil, por exemplo, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE – distribui imagens LANDSAT, SPOT e CBERS. Quanto à definição da área, a depender de sua localização e dimensão, uma imagem pode ser suficiente, entretanto, existem casos mesmo de pequenas áreas nas quais há a necessidade da aquisição de várias imagens (FIGUEIREDO, 2005).

2.5.2. IMAGENS AÉREAS

Para realizar o levantamento fotogramétrico de uma área, de acordo com Marotta et al (2015), são captadas imagens sucessivas ao longo de linhas paralelas de voos, por meio de sensores aéreos, ou seja, a bordo de aeronaves. As imagens são obtidas de forma que haja sobreposição longitudinal e lateral entre elas, permitindo a composição de pares estereoscópicos. Estas sobreposições podem variar de acordo com o levantamento. Porém, a sobreposição longitudinal comumente utilizada é de 60% e é controlada pela distância entre as imagens capturadas na mesma linha de voo, enquanto a sobreposição lateral mais usual é de 30% e controlada pela distância entre as linhas de voo adjacentes.

A estereoscopia (visualização tridimensional) é obtida por meio das diferentes posições de visada de um mesmo ponto no terreno de imagens bidimensionais, sendo fundamental para o trabalho de restituição e construção dos ortomosaicos. Este princípio é o mesmo utilizado pelo cérebro para ter noção de profundidade a partir da imagem obtida pelos dois olhos, com pontos de vista ligeiramente diferentes (ANDRADE, 1998).

Para realizar um levantamento aerofotogramétrico satisfatório é necessário o planejamento de alguns aspectos importantes, dependendo do projeto para o qual serão

utilizadas as imagens. Alguns destes aspectos são: delimitação da aérea, resolução espacial, o tipo da câmera e da aeronave, velocidade do voo, altura e altitude de voo, sobreposição lateral e longitudinal, número de faixas, número de fotos por faixa, pontos de controle, entre outros (ANDRADE, 1998).

2.5.2.1. VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO

O termo Veículo Aéreo Não Tripulado – VANT – é adaptado do termo em inglês *Unmanned Aerial Vehicle* – UAV –, utilizado pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos. No Brasil a Agência Nacional de Aviação Civil – ANAC – e o Departamento de Controle do Espaço Aéreo – DECEA – se referem aos VANTs como Aeronaves Remotamente Pilotadas – ARP, todos os termos remetem ao equipamento usualmente conhecido como Drone.

Segundo Pegoraro et al. (2013), foram desenvolvidos originalmente para fins militares e com o tempo passaram a ser utilizados em aplicações civis. Pode ser definido como qualquer veículo que possa voar e ser controlado sem a necessidade de uma pessoa a bordo (EISENBEISS, 2004).

Quanto a normas ou classificações não existe um consenso, uma vez que cada país ou organização classifica à sua maneira, pois não existe nenhuma organização internacional que regulamente sua utilização e legislação (MAROTTA ET AL, 2015).

No Brasil o uso de VANTs para operações civis é regulamentado pela ANAC, em complementação às normas de operação estabelecidas pelo DECEA e pela Agência Nacional de Telecomunicações – ANATEL.

2.5.3. PROCESSAMENTO DE DADOS

Neste tópico serão abordados alguns dos processamentos dos dados aerofotogramétricos realizados nesta pesquisa.

Para a geração de produtos aéreos de qualidade, uma das primeiras operações a ser realizada é o georreferenciamento da imagem para sua orientação (ANDRADE, 1998). Este georreferenciamento pode ser direto ou indireto. O direto recupera a posição da fotografia em relação à câmera, permitindo a reconstrução do feixe perspectivo que gerou as fotografias com o auxílio de outros equipamentos como o *Inertial Measurement Unit* – IMU – e o GNSS. Já o georreferenciamento indireto permite recuperar a posição de cada fotografia segundo um

referencial terrestre, ou seja, a partir de pontos de apoio (LUGNANI, 1987; ANDRADE, 1998; MARTINS, 2010).

Outro processo necessário é a ortorretificação, que é o processo de correção de imagens aéreas ou orbitais para remover distorções geométricas e posicionar os elementos da fotografia em ângulos corretos em relação à superfície terrestre. Este processo da origem ao produto denominado ortofoto (THROWER, JENSEN, 1976). Já o ortomosaico é a junção de cada uma dessas ortofotos contendo escalas aproximadas em uma única fotografia (WOLF, 2014).

Já o processo de vetorização consiste em converter informações visuais contidas nas imagens em dados vetoriais (linhas, pontos e polígonos). Este processo pode ser realizado de maneira manual, semiautomática e automática. No processo de vetorização manual cabe ao operador realizar a extração da feição de interesse a partir da sua interpretação sobre o que está representado na imagem, ou seja, a informação extraída dependerá apenas da habilidade e acurácia visual do operador (MOURA, 2017).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado no município de Niterói, Estado do Rio de Janeiro, iniciado no bairro do Gragoatá, passando pela praia da Boa Viagem e praia das Flechas, no bairro do Ingá e com término no final da praia de Icaraí, totalizando uma extensão linear de 3km e trajeto de aproximadamente 4km. O município de Niterói está entre as 50 cidades com maior quantidade de habitantes do Brasil, com população de 481.749 pessoas, densidade demográfica de 3601,67hab/km² e IDH de 0,837 (IBGE, 2023). Tendo contato direto com as águas da Baía de Guanabara, a área se inicia na coordenada geodésica 22,9031° S; 43,1360° W e tem o término em 22,9133° S; 43,1100° W (Figura 4). Os pontos iniciais da região de estudo estão representados por triângulos amarelos e os bairros de Gragoatá, Ingá, Icaraí, por retângulos vermelhos (Figura 4).

Figura 4 – Localização da área de estudo, região de Gragoatá, Ingá, Icaraí



Fonte: Google Earth Pro (2023)

A escolha da região de estudo está diretamente ligada à facilidade da logística para o levantamento dos dados, assim como à diversidade morfológica da linha de costa.

No percurso de 4 km se encontram linhas de costa fixas, estruturas rígidas, como pontes e calçadões, bem como regiões de faixa de areia com alta dinâmica em função da ação de ondas (particularmente no inverno) e variabilidade posicional devido à influência de maré (Figura 5).

No Gragoatá, nas proximidades da Ponte da ilha da Boa Viagem, temos exemplos da diversidade costeira da região, onde na Figura 5 está caracterizada de vermelho a Ponte da Boa Viagem, em laranja a região de praia com faixa de areia variável e em verde a estrutura fixa de calçadão.

Figura 5 – Ponte da Boa Viagem – Gragoatá



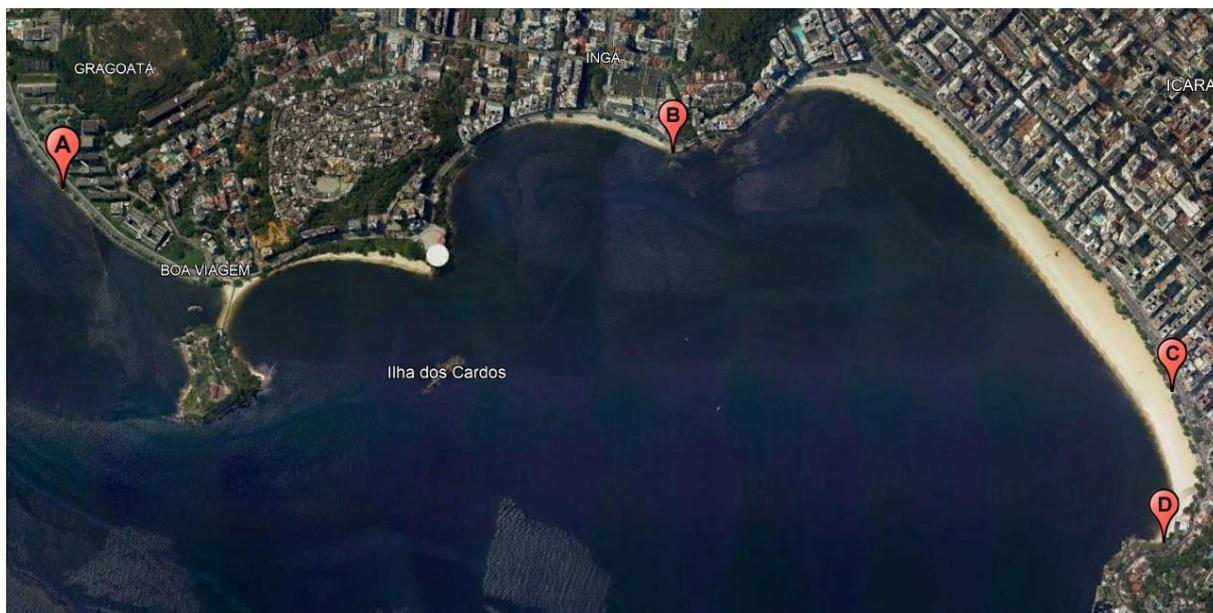
Fonte: Google Street View (2023)

3.2. LEVANTAMENTO ESTÁTICO

Com o intuito de se obter coordenadas precisas da linha de costa e para uma posterior comparação entre as técnicas estudadas, foram estabelecidos quatro pontos de controle ao longo da linha de costa, denominados A, B, C e D (Figura 6), os três primeiros em regiões fixas e um último na faixa de areia da região no final da praia de Icaraí. Vale ressaltar que o maior número de pontos em linha de costa fixa está relacionado ao foco do trabalho ser no estudo comparativo das técnicas.

Os pontos foram adotados no trabalho como verdadeiramente pertencentes à linha de costa, devido à alta precisão da técnica de pós-processamento relativo, que tem a melhor precisão entre as técnicas de levantamentos geodésicos e é indicada para implantação de marcos de referência (IBGE,2008).

Figura 6 – Localização dos pontos de verificação



Fonte: Google Earth Pro (2023)

Os levantamentos estáticos dos pontos foram executados com o receptor REACH RS2 da empresa EMILID, que é um receptor GNSS RTK - *Real Time Kinematic* - multifrequências de precisão estática horizontal de 4mm +0,5ppm, que recebe ondas portadoras L1, L2 do sistema GPS, e as respectivas portadoras dos sistemas Galileu, BeiDou GLONAS e QZSS - *Quasi-Zenith Satellite System* - (EMILID,2023).

Os Rastreios foram executados pela mesma dupla de operadores em datas diferentes e tempos de observação variando de 27, 23 até 81,13 minutos (Tabela 1).

Tabela 1. Levantamentos Estáticos

Pontos	Data	Hora Inicial	Hora Final	Tempo (min)	Proximidade da Base (m)
A	10/11/2022	10:02:14	11:20:33	78,32	63,04
B	08/03/2023	10:18:11	11:39:20	81,13	1362,16
C	08/03/2023	15:26:19	16:06:48	40,48	2521,45
D	08/03/2023	14:42:39	15:09:53	27,23	2586,52

O IBGE, de acordo com seu respectivo manual de recomendações para levantamentos relativos estáticos, tem em suas orientações, normas específicas que correlacionam a precisão

aproximada do posicionamento relativo, em função do tipo de equipamento utilizado, tempo de rastreamento das observações e comprimento das linhas de base (Tabela 2).

Tabela 2. Precisão do posicionamento relativo em função do tempo de observação, equipamento utilizado e comprimento da linha de base

Linha de Bases	Tempo de observação	Equipamento Utilizado	Precisão
00 – 05 km	05 – 10 min	L1 ou L1/L2	5 - 10 mm + 1 ppm
05 – 10 km	10 – 15 min	L1 ou L1/L2	5 - 10 mm + 1 ppm
10 – 20 km	15 – 30 min	L1 ou L1/L2	5 - 10 mm + 1 ppm
20 – 50 km	2 – 3 horas	L1/L2	5 mm + 1 ppm
50 – 100 km	mínimo 03 horas	L1/L2	5 mm + 1 ppm
<100 km	mínimo 04 horas	L1/L2	5 mm + 1 ppm

Fonte: IGN – Instituto Geográfico Nacional (Espanha) – Curso GPS em Geodesia y Cartografía by (IBGE,2008)

Dessa forma, todos os rastreios estáticos relativos executados nesta pesquisa se encontram dentro da normatização desejada, na qual linhas bases menores que 5km necessitam de rastreios com tempo inferior a 10 minutos para alcançar uma precisão milimétrica, sendo tal tempo inferior à menor duração de rastreamento do trabalho, de 27,23 minutos encontrada no ponto D. Os pontos A e B tiveram seus tempos extrapolados devido à intenção da pesquisa de avaliar um possível aumento na precisão posicional em função de um maior tempo de rastreamento.

Posterior aos rastreios estáticos dos pontos A, B, C e D, os arquivos RINEX foram armazenados para a aquisição das informações da RBMC mais próxima das efemérides precisas (arquivo.sp3) e erro do relógio (arquivo .clk), dados necessários para um pós-processamento com qualidade de precisão milimétrica (IBGE, 2008). Todos esses dados citados são disponibilizados por instituições governamentais, posterior às datas dos rastreios, dessa forma, sendo crucial para um bom processamento, a disponibilidade de tempo.

As informações da RBMC foram adquiridas no site do IBGE¹ um dia após cada o rastreamento. Nos planejamentos dos rastreios foi definida a RJNI como a RBMC a ser utilizada em todos os rastreios, devido a sua proximidade com a área de estudo. Como mostrado na Tabela

¹ Site: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/rede-geodesica/16258-rede-brasileira-de-monitoramento-contínuo-dos-sistemas-gnss-rbmc.html?=&t=downloads>. Acesso em: 14 de julho de 2024.

1, o IBGE disponibiliza em seu site a distribuição de todas as RBMCs em funcionamento no Brasil (Figura 7), possibilitando assim a melhor avaliação de qual estação utilizar para determinada região.

Figura 7 – Distribuição de RBMC



Fonte: IBGE (2021)

A RJNI é uma estação da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) construída no ano de 2019, localizada no alto do Bloco O do Instituto de Geociências da

Universidade Federal Fluminense, localizado na Av. Gal. Milton Tavares de Souza, s/nº, Campus da Praia Vermelha, Boa Viagem (Figura 8), com latitude de $- 22^{\circ} 54' 21,36876''$ e longitude $- 43^{\circ} 08' 1,69433''$ com respectivos sigmas de 0,001 m de precisão para ambos (IBGE,2019).

Figura 8 – Antena da RJNI instalada na UFF



Fonte: Relatório IBGE (2019)

As efemérides precisas foram adquiridas 17 dias após cada rastreamento devido à disponibilidade no IGS (Serviço Internacional GNSS) para o sistema GPS (IBGE,2023). As órbitas precisas do sistema GPS foram obtidas no repositório da NASA no site https://cddis.nasa.gov/Data_and_Derived_Products/GNSS/orbit_products.html, sendo as mesmas utilizadas no processamento para minimizar os erros das órbitas dos satélites.

O erro do relógio, igualmente às efemérides precisas, foi adquirido no site da NASA. Embora estando disponível em data anterior às das efemérides, todos os erros foram adquiridos juntos por uma questão de organização e logística, tendo em vista que cada ponto tem um dia de rastreamento específico, com uma efeméride e um erro do relógio para aquele respectivo dia.

Posterior à aquisição de todos os dados de Rastreamento, RBMC, Efemérides e Erros dos Relógios, os pontos foram processados no software de processamento RTKLIB, software esse que tem código aberto e a capacidade de processar pontos estáticos de maneira individual, com cada arquivo RINEX - *Receiver Independent Exchange Format* - sendo processado separadamente com as mesmas configurações.

Na interface do RTKLIB os dados foram inseridos no módulo RTKPOST (Figura 9) que compreende a função de posicionamento estático relativo.

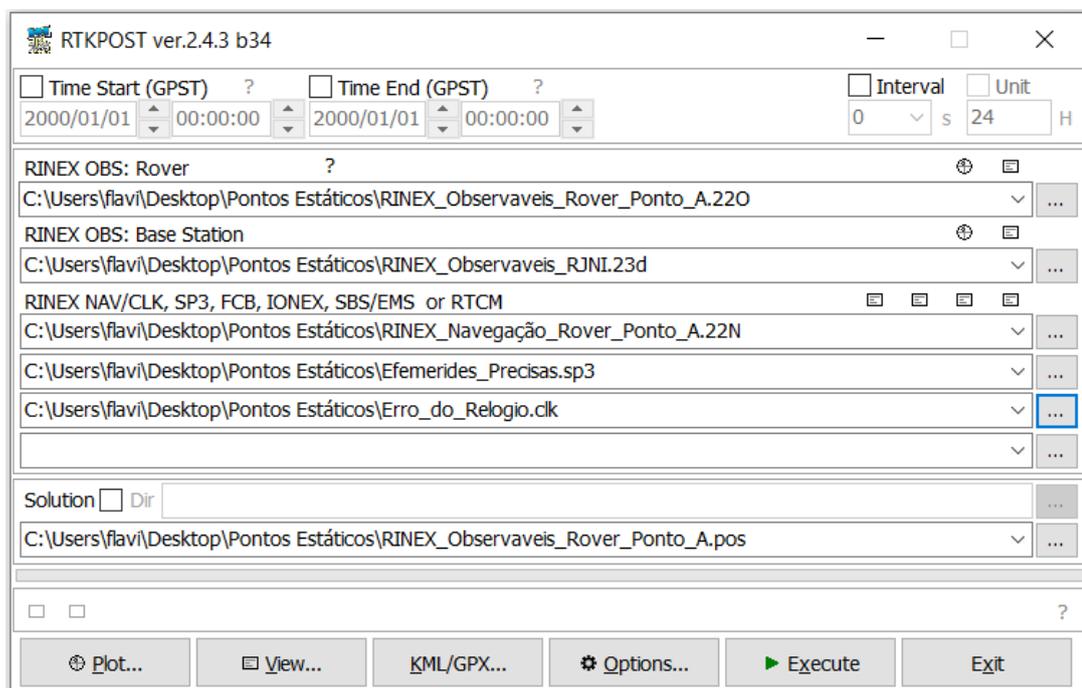
Figura 9 – Interface do software RTKLIB com RTKPOST em vermelho



Fonte: Autor (2023)

Os dados adquiridos foram inseridos na tela principal do RTKPOST, na qual o arquivo das observáveis do RINEX dos pontos rastreados foi colocado na aba “RINEX OBS: Rover”, o arquivo das observáveis da RJNI colocado na aba “RINEX OBS: Base Station”, e os arquivos das mensagens de navegação, efemérides precisas e erros do relógio inseridos na aba “RINEX NAV/CLK, SP3” (Figura 10).

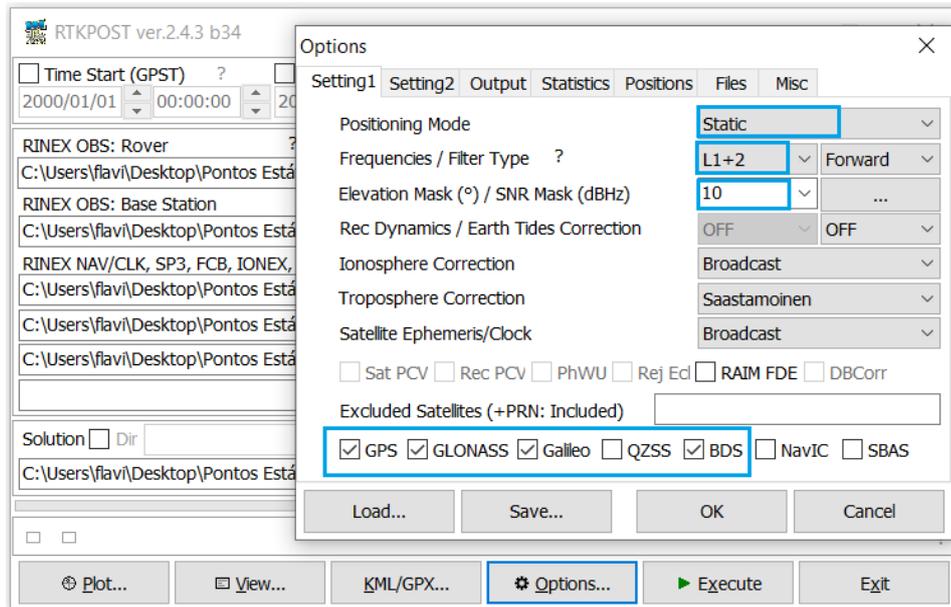
Figura 10 – Interface do módulo RTKPOST com dados RINEX, Efemérides e Erros.



Fonte: Autor (2023)

Para o processamento de pontos estáticos, além dos dados inseridos, foram configuradas as funções de posição estática (IBGE, 2008), as frequências das ondas portadoras L1 e L2, a definição da máscara de elevação em 10° e os sistemas de posicionamentos globais: GPS, GLONAS, Galileu e BeiDou (Figura 11).

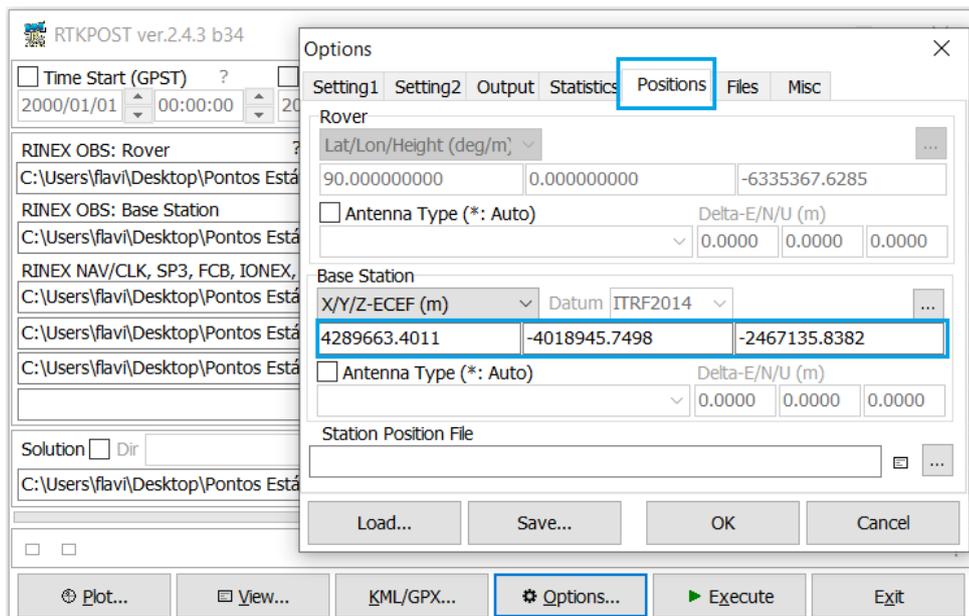
Figura 11 – Interface do módulo RTKPOST com configuração estática



Fonte: autor (2023)

Vale ressaltar que, de acordo com o manual do RTKLIB, as correções ionosféricas e troposféricas foram retiradas dos próprios modelos do *software*. Para o processamento relativo utilizando a base de referência da RJNI, foi necessária a inclusão das coordenadas precisas da estação, retiradas dos relatórios das RBMC e incluídas na aba *Positions* (Figura 12).

Figura 12 – Interface do módulo RTKPOST com posição da RBMC.



Fonte: Autor (2023)

Ainda no processamento dos dados, foram escolhidos e configurados no *software* o sistema de referência e o tipo coordenadas de saída, sendo escolhido o sistema WGS84 devido à sua equivalência posicional com o sistema SIRGAS2000, sistema oficial do Brasil (GALERA, 2008). Para a saída dos dados foram utilizadas coordenadas geográficas tendo em vista a capacidade de transformação para coordenadas UTM - *Universal Transverse Mercator* -, bem como simplicidade de transformação entre sistemas de coordenadas.

O processo descrito no processamento dos dados estáticos foi completado com os cálculos do software e com as correções posicionais, que geraram um relatório das coordenadas finais de cada ponto do levantamento estático.

3.3. LEVANTAMENTO CINEMÁTICO

Os levantamentos cinemáticos, igualmente aos levantamentos estáticos, foram executados com o receptor REACH RS2 da empresa EMILID, um receptor GNSS RTK multifrequências de precisão cinemática pós-processada de 5mm + 0,5ppm, que recebe ondas portadoras L1, L2 do sistema GPS, e as respectivas portadoras dos sistemas Galileu, BeiDou GLONAS e QZSS (EMILID,2023).

Para os levantamentos foram estabelecidos 5 grupos, compostos por 5 profissionais hidrógrafos em cada equipe, que executaram um levantamento completo (do Gragoatá até Icaraí). Os grupos foram acompanhados durante todo o processo de levantamento, porém sem interferência no levantamento para não eximir a possível avaliação de erros grosseiros dos operadores.

Os rastreios ocorreram nos dias 26 de setembro, 8,10,14 e 17 de novembro do ano de 2022 em horários aleatórios (Tabela 3), não coincidentes com o horário de preamar.

Tabela 3. Levantamentos Cinemáticos

	Levantamentos	Data	Hora Inicial	Hora Final
1	Cinemático 01	26/09/2022	08:49:00	09:52:30
2	Cinemático 02	08/11/2022	10:06:59	11:20:24
3	Cinemático 03	10/11/2022	14:06:31	16:08:31
4	Cinemático 04	14/11/2022	10:42:08	11:49:48
5	Cinemático 05	17/11/2022	14:26:39	15:42:15

Todos os levantamentos tiveram tempo de execução de aproximadamente uma hora e meia, com taxa de aquisição de dados de 1s e máscara de elevação de 10° , minimizando erros sistemáticos envolvidos na propagação do sinal (GALERA, 2008). Foi adotado um procedimento específico para o erro de perda de ciclos, no qual o operador do aparelho GNSS, durante o deslocamento sobre o percurso, ao ouvir o sinal sonoro do rastreador em relação à perda de sinal, interrompia o deslocamento e se mantinha estático até o restabelecimento do sinal (Figura 13), que é indicado pelo termo “fixo” na interface do GNSS.

Figura 13 – Operadores em deslocamento sobre linha de costa fixa



Fonte: O autor (2023)

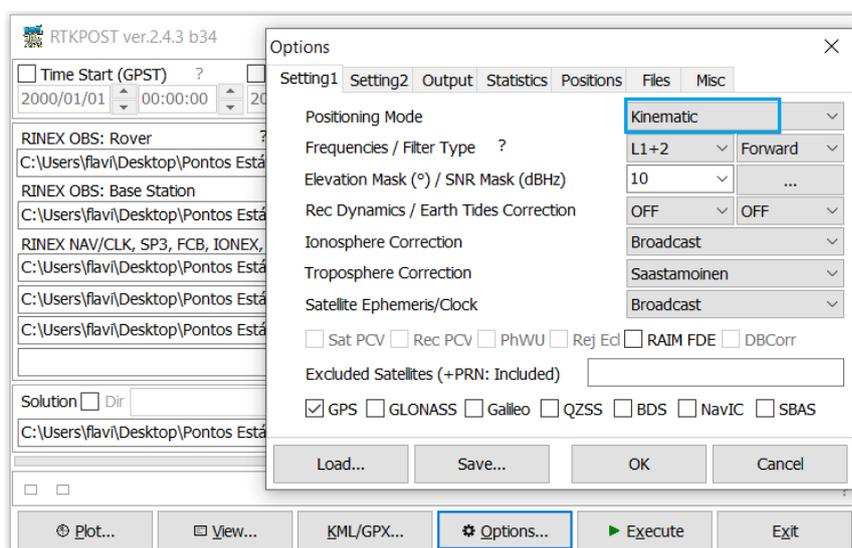
Ao término de cada um dos 5 levantamentos cinemáticos de campo, os dados brutos no formato RINEX foram levados para tratamento e processamento através de técnicas absolutas e relativas.

Primeiramente os dados brutos foram enviados para o IBGE para o processamento via técnica PPP (Posicionamento por Ponto Preciso), com intuito de realizar uma visualização de problemas primários de levantamento, como feriados nos dados, ruídos de multicaminhamento, e também um *preview* da qualidade dos produtos processados, de maneira a avaliar e corrigir qualquer erro no método empregado.

No dia seguinte ao levantamento, o dado retroativo da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo) mais próxima (RJNI) ao levantamento executado era adquirido.

A aquisição dos dados da RJNI teve o mesmo objetivo do processamento estático, ou seja, a correção diferencial dos rastreios cinemáticos, que foram executados pelo mesmo módulo RTKPOST do software RTKLIB, com as correções das efemérides precisas e erros do relógio dos respectivos dias de rastreamento, com as mesmas configurações do processamento estático descrito no item 3.2. A única exceção foi do modo de posicionamento (*position mode*), onde o modo *Static* foi substituído pelo modo *Kinematic* (Figura 14).

Figura 14 – Interface do módulo RTKPOST com configuração cinemática



Fonte: O autor (2023)

Os levantamentos cinemáticos e estáticos têm metodologias distintas apenas em relação aos processos de levantamento de campo. O processamento, como já mencionado, sendo relativo estático ou relativo cinemático, tem metodologias iguais em grande parte. Assim, todos os cinco levantamentos cinemáticos acompanharam e foram processados com a mesma metodologia de processamento descrita no item 3.2, com as ressalvas já citadas, e geraram relatórios de dados posicionais independentes.

3.4. LEVANTAMENTO AEROFOTOGRAMÉTRICO

Os dados dos ortomosaicos aerofotogramétricos com abrangência total da área de estudo foram adquiridos dos somatórios de duas aquisições distintas, uma região levantada com drone

da Marinha do Brasil e uma parte complementar através de sites governamentais com disponibilização de dados aerofotogramétricos.

O levantamento aerofotogramétrico com drone foi executado por uma equipe de 5 profissionais (Figura 15), um operador de voo com um assistente e três operadores GNSS para execução dos pontos de apoio. O drone utilizado no levantamento foi o drone multirrotor DJI Mavic 2 Pro PPK, um drone portátil de quatro rotores, com estabilização automática, uma velocidade máxima de voo de aproximadamente 72Km/h, com autonomia de 31 minutos por bateria e uma câmera Gimbal Hasselblad L1D-20c de 20MP. A câmera oferece um sensor CMOS de 1" com uma abertura f/2.8 a f/11 ajustável (DJI,2018), que transmite informações em tempo real para o controle remoto do produto, com alcance máximo de 8km. Apesar dos 8 km de transmissão serem superiores ao perímetro da área de estudo, a autonomia de 31 minutos não permitia a abrangência da área com apenas um voo.

Figura 15 – Início do voo fotogramétrico do drone DJI MAVIC 2 PRO.



Fonte: O autor (2023)

O voo foi executado no dia 10 de novembro de 2022, teve início às 11 horas e 41 minutos e término às 12 horas e 4 minutos, totalizando 21 minutos de tempo de voo para abranger uma área de extensão linear de aproximadamente 1 km.

Os pontos de controle foram executados com a mesma metodologia do item 3.2 desse trabalho, porém com tempos de aproximadamente 20 minutos de rastreo em cada ponto, estando estes em conformidade com a proximidade da RBMC constantes na Tabela 2, com a diferença da inclusão de marcadores fotoidentificáveis, que consistiam de um tecido xadrez preto e branco (Figura 16), de modo que os tecidos ajudam na identificação dos pontos nas imagens aerofotogramétricas para a posterior georreferenciamento.

Figura 16 – Rastreo dos pontos de controle com tecido fotoidentificável.



Fonte: Relatório LHFC da MB (2022)

Durante o voo o drone estava com o equipamento PPK acoplado, identificado por um retângulo vermelho na figura 15, que consiste em um receptor GNSS multifrequências L1 e L2, com abrangência dos sistemas GPS, Galileu, BeiDou, GLONAS, QZSS e erro posicional estimado entre 1 e 2 centímetros (Topodrone, 2023). O dispositivo PPK georreferencia as imagens no momento de aquisição, retirando a necessidade de um adensamento de pontos de controle GNSS de terra, bem como melhora a precisão posicional do ortomosaico final.

O planejamento de voo foi feito no software *DJI pilot*, no qual foram configurados além da área de levantamento, a sobreposição longitudinal de 80% e lateral de 70% entre as imagens. A altura de voo também foi selecionada no software de planejamento, de modo que para a área de estudo foi escolhida a altura de 100 m, decisão essa que afeta diretamente a quantidade das

fotos obtidas bem como o tempo de execução do percurso pré-estabelecido, para que o drone obtenha o imageamento completo da área desejada.

Foram obtidas 166 imagens com os parâmetros citados acima, que foram posteriormente processadas no software *Agisoft Metashape* (versão estudante), gerando um ortomosaico com GSD 10 cm (Figura 17), que foi incluído como uma das camadas do software livre QGis para posterior vetorização do mesmo, após a complementação com ortomosaicos públicos.

Figura 17 – Ortomosaico do Drone processado com *Agisoft Metashape*.



Fonte: Relatório LHFC da MB (2022)

Com o fim de abranger a totalidade da área de estudo, foram incluídos nas camadas do software QGis, ortomosaicos aerofotogramétricos do projeto SisGeo Niterói (Sistema de Gestão da Geoinformação da prefeitura de Niterói), adquiridos no site governamental <https://www.sigeo.niteroi.rj.gov.br/pages/ortofotos>, principal depositório do projeto.

O SisGeo Niterói é um sistema desenvolvido pela prefeitura de Niterói, com o propósito de fazer o gerenciamento dos dados geoespaciais do município. Com foco no Cadastro Técnico Multifinalitário (CTM), ele é composto da junção de informações de diversas secretarias municipais de Niterói (SisGeo, 2023), bem como levantamentos aerofotogramétricos de 2014

e 2019, dos quais foram escolhidos para a pesquisa os levantamentos mais recentes para a utilização dos dados.

Foram selecionados 5 ortomosaicos de 2019 do SisGeo, no site já citado, para a utilização de complementação dos dados fotogramétricos (Figura 18) da área de estudo, sendo os mesmos produzidos por levantamentos aerofotogramétricos contratados pela prefeitura de Niterói.

Figura 18 – Mosaico de ortofotos selecionadas no SisGeo.

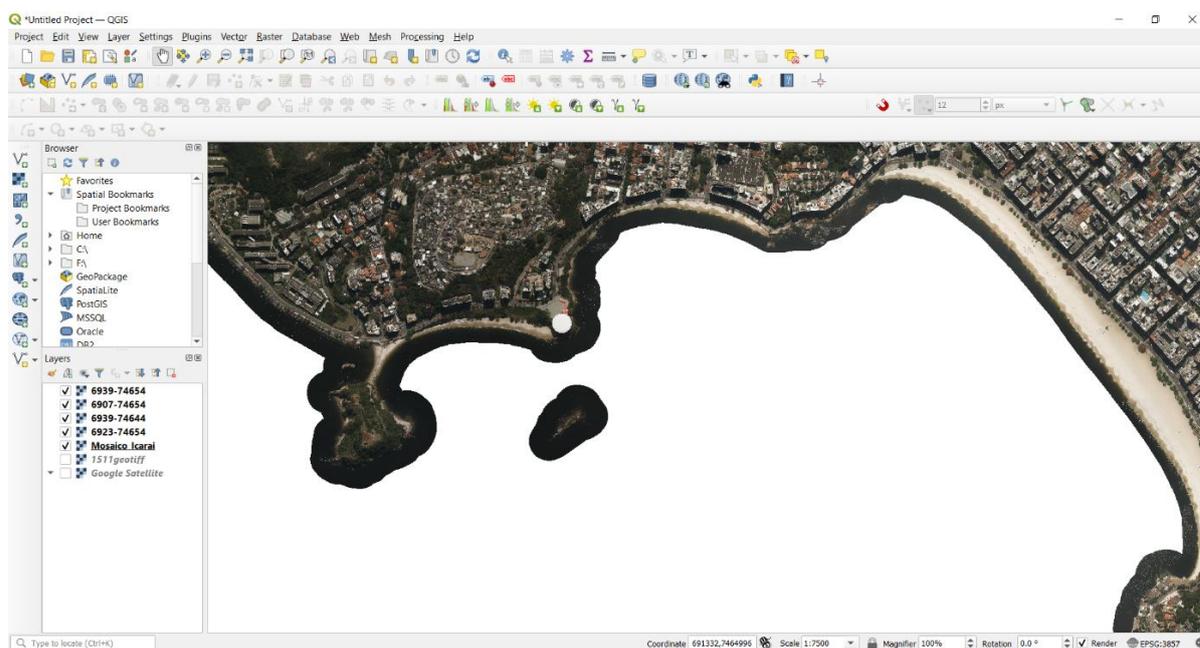


Fonte: SisGeo (2019)

De acordo com os metadados disponibilizados (SisGeo,2023), os levantamentos aerofotogramétricos foram executados por aeronave tripulada com altitude média de voo de 6285 m, sobreposição longitudinal de 80% e lateral de 60% entre as imagens, produzindo um ortomosaico na escala de 1:1000, no sistema de referência SIRGAS2000, com resolução espacial de 10 cm.

Posterior à aquisição, os dados do SisGeo e dos ortomosaicos levantados com drone, foram inseridos como camadas no *software* QGIS (Figura 19), para o processo de vetorização.

Figura 19 – Ortofotos em camadas no software QGIS.



Fonte: Autor (2023)

A inserção dos dados georreferenciados no QGIS teve a definição do SISGAS 2000 como sistema de referência, e a definição da localização das coordenadas geográficas no fuso 23 sul, tendo assim um modelo de camadas com uma continuidade espacial entre as imagens e uma sobreposição simétrica, possibilitando a vetorização.

3.4.1. VETORIZAÇÃO DOS ORTOMOSAICOS

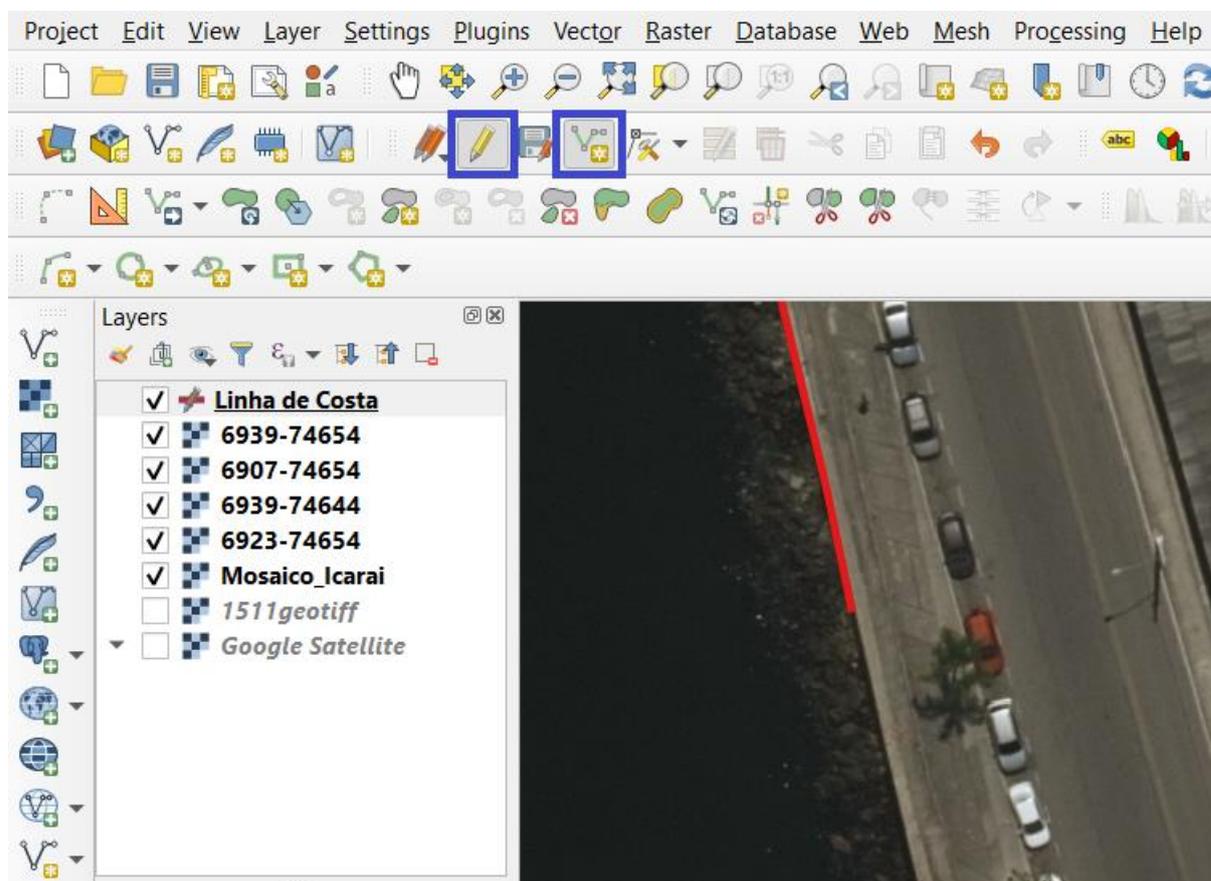
A vetorização do ortomosaico está compreendida apenas na vetorização da linha de costa do modelo. O processo foi executado uma vez por cada um de 5 operadores selecionados do grupo de profissionais hidrógrafos, com o intuito de gerar 5 vetores distintos. Nenhum operador teve contato com o a execução do outro, para possível análise de erro humano, bem como não gerar tendência de percurso.

O processo de vetorização foi feito no *software* QGIS, iniciando com a criação de camada vetorial para os dados do vetor de linha de costa, de maneira que cada produto ficasse em uma camada, possibilitando uma junção futura, bem como colaborando para a integridade do dado.

A ferramenta utilizada no QGIS foi a *Add Line Feature*, indicado por um quadrado azul na figura 20, que permite que se crie uma linha sobre o ortomosaico georreferenciado, de

maneira que a própria linha foi criada já com coordenadas geográficas no sistema de referência SIRGAS2000.

Figura 20 – Processo de vetorização com a ferramenta “Add Line Feature” do software QGIS.



Fonte: Autor (2023)

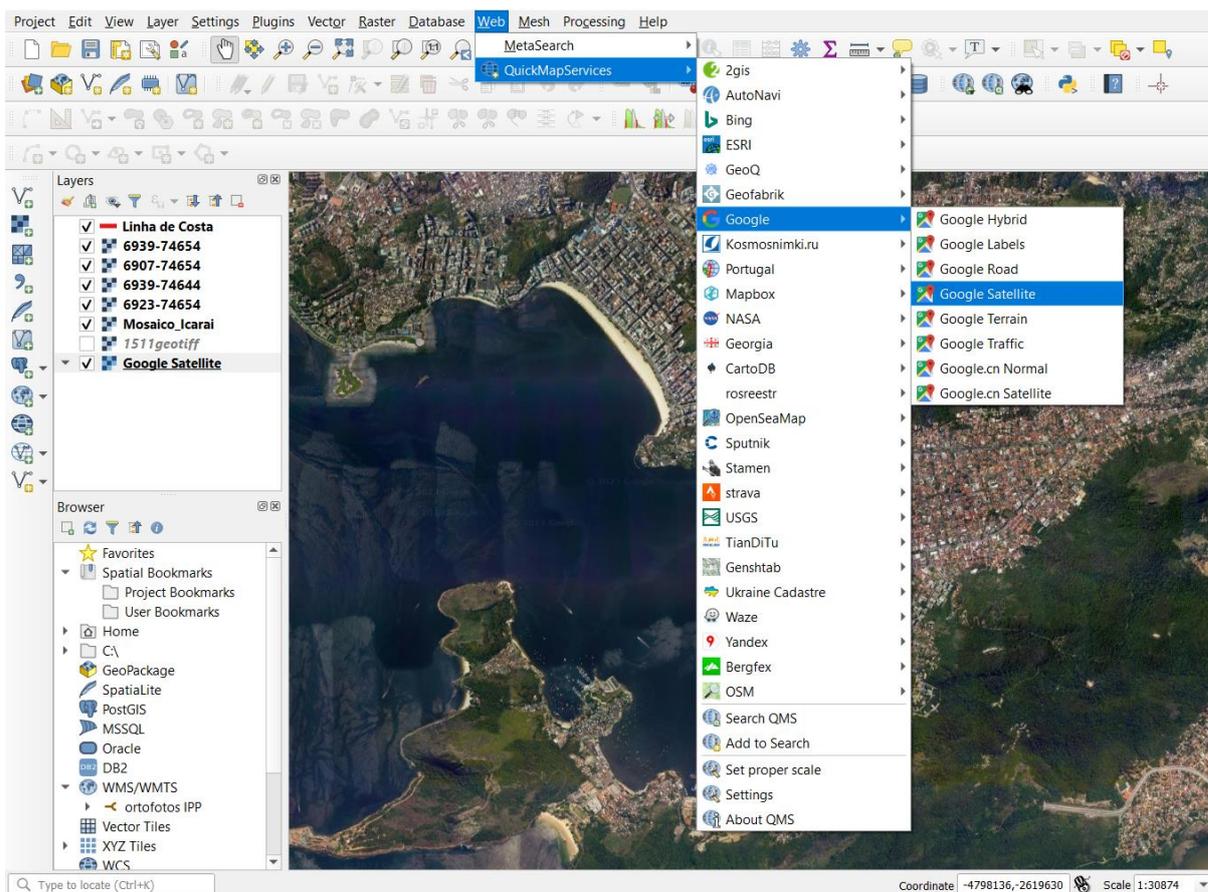
Todos os 5 vetores foram criados do Norte até o Sul da área de estudo (Figura 6), iniciando na região do Gragoatá e terminando a vetorização no final da praia de Icarai, tendo cada uma dessas vetorizações percorrido um trajeto de aproximadamente 2,2 km de linha de costa.

3.5. IMAGEM DE SATÉLITE

Tendo em vista a logística de trabalho, em relação a tempo de execução nas técnicas de levantamento cinemático e levantamento aerofotogramétrico, foram executadas vetorizações sobre imagens de satélites de rápida aquisição acessadas diretamente por plugins do software QGIS, o que dispensa significativas horas de trabalho humano em levantamentos de linha de costa.

No QGIS foi utilizado a ferramenta livre *QuickMapService*, ferramenta esta da empresa NEXTGIS, encontrada no site <https://nextgis.com/blog/quickmapservices>, que consiste em um *plug-in* de gerenciamento de dados de imageamento de serviços livres que, após ser instalado, disponibiliza uma gama de imagens satelitais de bancos de dados diversos (Figura 21)

Figura 21 – Utilização da ferramenta “*QuickMapService*” do software QGIS.



Fonte: Autor (2023)

A ferramenta disponibiliza imagens da NASA, Google, ESRI, entre outras. Porém, depois de algumas avaliações de qualidade posicional, optou-se por usar apenas imagens do repositório do Google (Figura 21) como base para a extração da linha de costa através da técnica de vetorização. Entre as informações de imageamento disponibilizadas pelo Google, mostradas pela aba selecionada na figura 21, a escolhida para o processo de vetorização foram as imagens de satélite, pois as mesmas contemplam um detalhamento das feições permitindo a diferenciação entre a parte terrestre e a área marítima.

3.5.1. VETORIZAÇÃO DAS IMAGENS POR SATÉLITE

A vetorização das imagens por satélite seguiu um processo semelhante ao da vetorização dos ortomosaicos aerofotogramétricos descritos no item 3.4.1, no qual os mesmos 5 operadores selecionados para a vetorização anterior executaram a vetorização das imagens por satélite, gerando 5 vetores distintos. Todos os operadores usaram estações de trabalho distintas, para que não ocorresse influência entre os trabalhos.

Igualmente ao processo de vetorização do ortomosaico, o *software* QGIS foi utilizado para as imagens de satélite, gerando 5 camadas distintas através da ferramenta *Add Line Feature* demonstradas por um quadrado azul na Figura 20. Porém, as imagens base utilizadas como referência não foram os ortomosaicos e sim as imagens Google Satélite da ferramenta *QuickMapService* demonstrada na Figura 21. Todas as camadas foram inseridas, como todos os dados vetoriais produzidos no sistema de referência SIRGAS2000.

As 5 vetorizações foram executadas de Norte para Sul (Figura 20), com seu início na região do Gragoatá e término no final da praia de Icarai, gerando vetores de aproximadamente 2,2 km de linha de costa.

A metodologia de vetorização das imagens por satélite na ferramenta *QuickMapService* teve uma dificuldade logística simples, bem como um tempo de execução pequeno, que consistiu no download e instalação do plug-in *QuickMapService*, em cerca de 10 minutos, mais um trabalho de vetorização de cada um dos 5 operadores de cerca de 20 min, totalizando um tempo de 30 minutos por cada camada de vetor de linha de costa da área de estudo.

4. RESULTADOS

4.1. PONTOS DE CONTROLE

Após o processamento dos dados GNSS pelo software RTKLIB, foram determinadas as coordenadas com precisões horizontais submilimétricas, nas quais todos os pontos tiveram as soluções fixas e observações de números de satélites GNSS superiores a 4 em todo o período de rastreamento com média demonstrada na Tabela 4, o que permitiu uma estabilidade dos dados e a incerteza alcançada.

Tabela 4. Resultado dos pontos de controle

Pontos	Latitude (d''')	Longitude(d''')	Precisão posicional(m)	Solução	Satélites GNSS
A	22°54'23.36694''	43°08'02.39378''	0.0004	fixa	7
B	22°54'20.72633''	43°07'14.59471''	0.0001	fixa	8
C	22°54'38.03984''	43°06'35.76082''	0.0008	fixa	5
D	22°54'48.86626''	43°06'36.61801''	0.0002	fixa	6

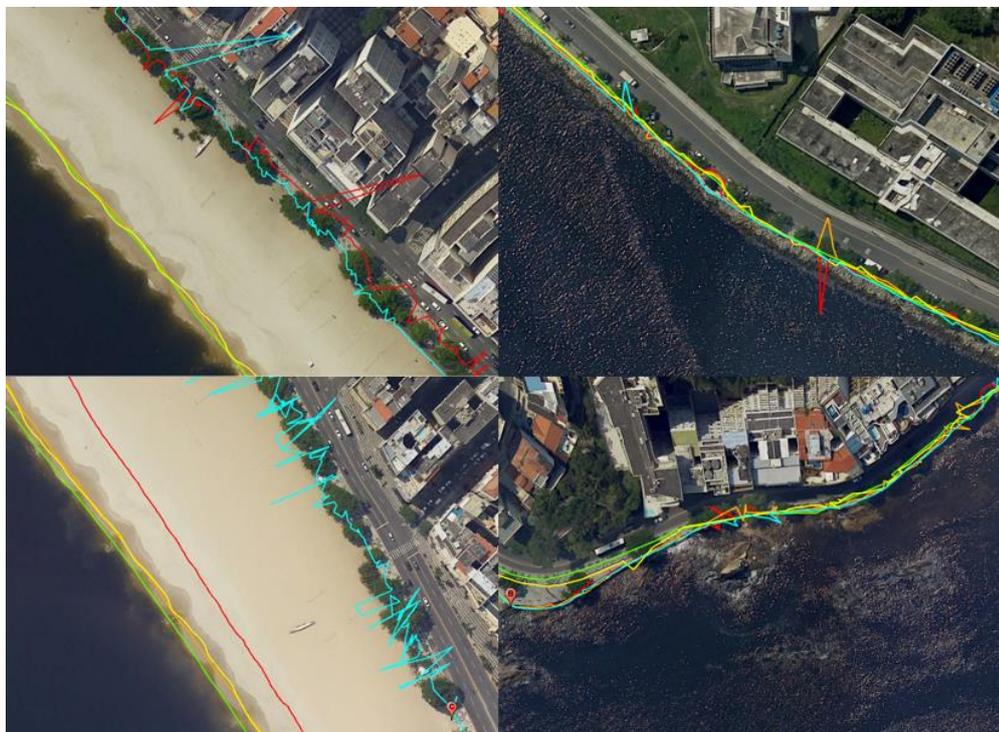
Todos os pontos foram marcados sobre a linha de costa (Figura 6), e seus processamentos resultaram em desvios padrões horizontais menores que 1 mm, fazendo com que todas as comparações das técnicas de levantamentos de linha de costa com os pontos fixos partam de uma precisão relativa menor que 1 mm. Desta forma, um erro aproximado de 20 cm de uma respectiva técnica é pelo menos 200 vezes maior que o desvio padrão dos pontos fixos, o que fez com que em algumas análises os erros dos pontos fixos fossem desconsiderados e adotados como referências basilares de linha de costa.

4.2. RASTREIOS CINEMÁTICOS

Os rastreios cinemáticos proporcionaram uma aquisição superior a mil pontos, o que produziu linhas de contorno com significativa suavidade. No entanto, apesar do número médio de satélites GNSS visíveis ter sido acima de 4, como indicado na Tabela 4, ocorreram trechos onde esse número foi inferior a 4, nesse momento o sistema perdeu a capacidade de encontrar

posição, e nos trechos onde a solução foi "float" a incerteza aumentou e provocou muita variação dos pontos em relação a linha da costa, como mostrado na Figura 22.

Figura 22 – Ruídos pontuais nos Rastreio Cinemático.



Fonte: Google Earth Pro (2023)

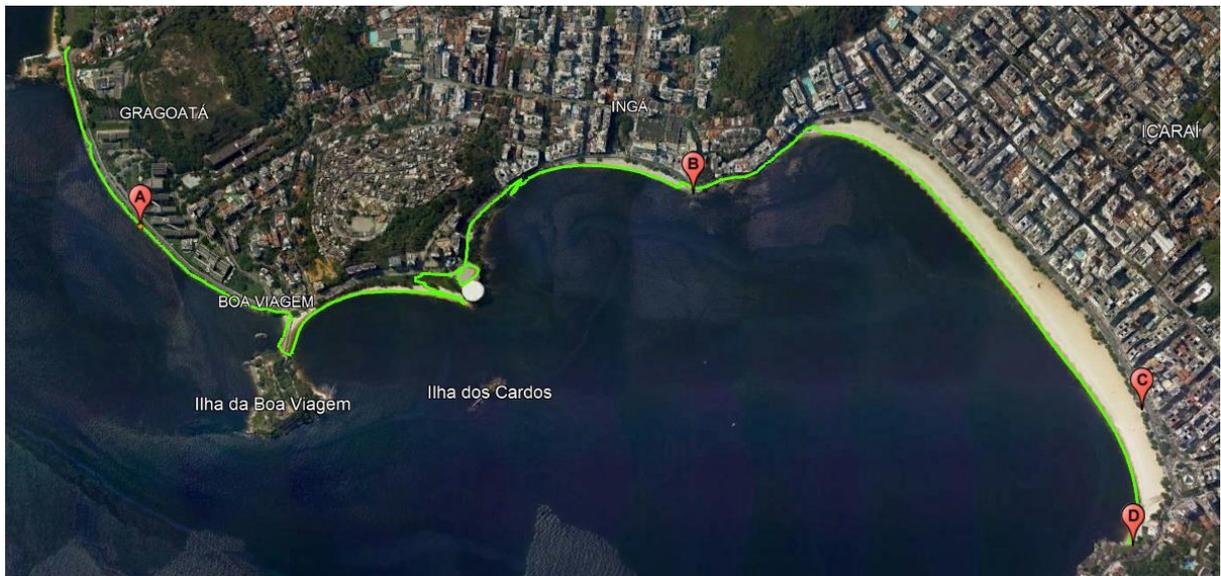
Para cada rastreio cinemático (representado por uma cor na figura 22), foi determinado a precisão posicional média, que é representado pelo resultante dos desvios padrões Leste (E) e Norte (N). Todos tiveram incertezas (precisão posicional média) na ordem do decímetro, o cinemático 5 foi o que proporcionou a menor precisão posicional média e o maior GDOP em relação aos outros, como apresentados na Tabela 5:

Tabela 5. Qualidade posicional dos processamentos cinemáticos

Cinemáticos	Desvio padrão médio em N(m)	Desvio padrão médio em E(m)	Precisão posicional média (m)	GDOP médio	Nº médio de Satélites
Cinemático 1	0,264	0,249	0,363	4,82	9
Cinemático 2	0,189	0,159	0,247	5,10	8
Cinemático 3	0,125	0,106	0,164	5,46	9
Cinemático 4	0,206	0,164	0,263	3,91	8
Cinemático 5	0,340	0,348	0,487	7,85	7

No rastreamento cinemático 1, foram processados 1358 pontos obtendo um desvio padrão médio na componente norte (N) de 0,264 metros, desvio padrão médio na componente leste (E) de 0,249 metros, resultando uma precisão posicional média de 0,363 metros, como mostrado na Tabela 5. A conexão desses pontos produziu a linha de costa apresentada em coloração verde na Figura 23, com uma representatividade da costa com poucos ruídos. Entre as possíveis razões para esse resultado, aponta-se a escolha de trajeto da equipe do cinemático 1, que evitou áreas de obstrução do sinal GNSS, alcançando um GDOP médio de 4,826 com uma média de 9 satélites GNSS observados durante o percurso.

Figura 23 – Rastreamento Cinemático da equipe 1

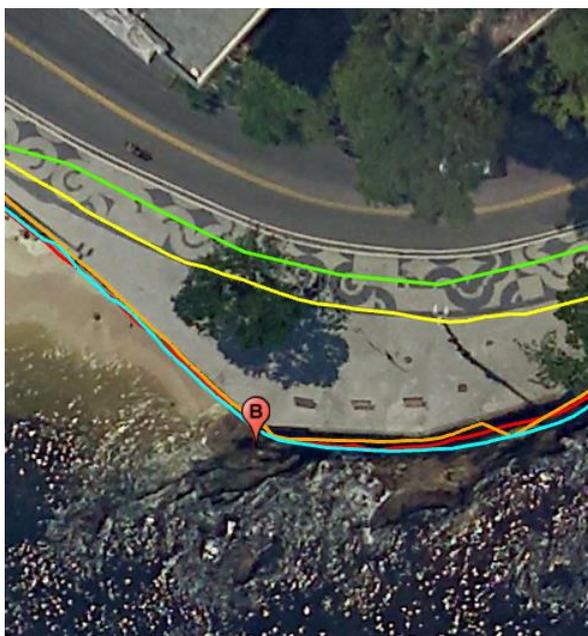


Fonte: Google Earth Pro (2023)

A linha de costa produzida pelo rastreamento cinemático da equipe 1, demonstrada na figura 23, foi resultado do trajeto escolhido pela respectiva equipe, porém este trajeto não contemplou os pontos de controle B, C e D, o que fez com que o único dado de acurácia fosse o ponto A.

Na figura 24 é exemplificado melhor como as equipes dos rastreios executaram os trajetos, eventualmente as mesmas não contemplam os respectivos pontos de controle. Em outras imagens de pequena escala como a figura 23, o traçado verde pode aparentar incluir tais pontos.

Figura 24 – Desvio de trajeto do rastreo cinemático da equipe 1 (verde)



Fonte: Google Earth Pro (2023)

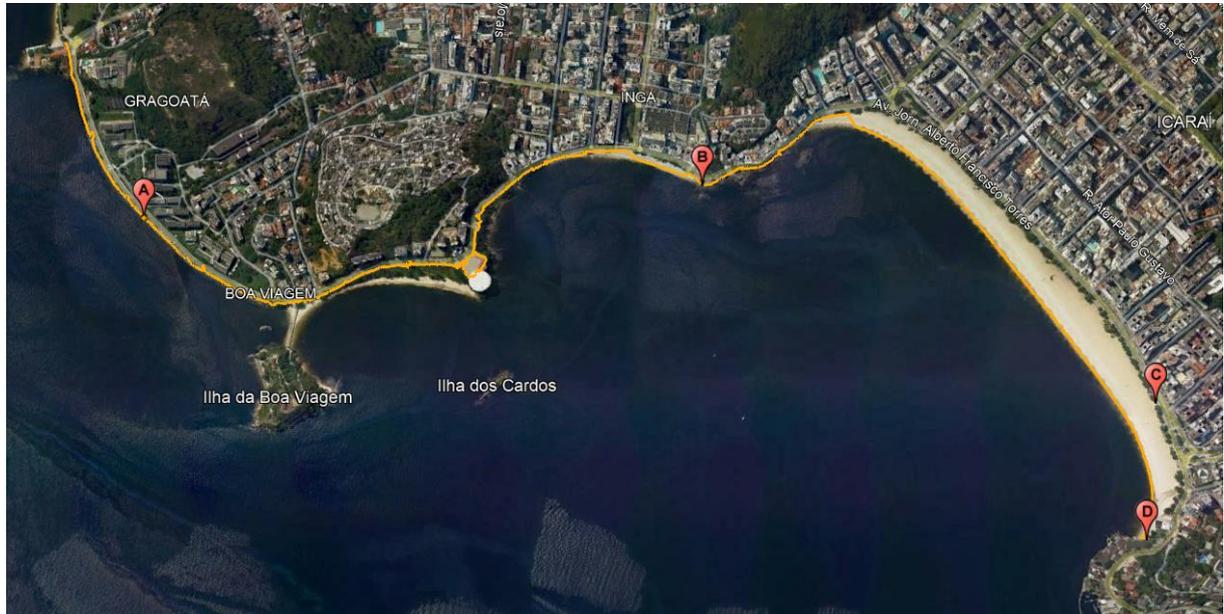
Em relação a cada ponto de controle, a linha de costa do cinemático 1 teve uma acurácia de 2,33 metros em relação ao ponto A (Tabela 6). Os outros pontos também tiveram suas respectivas acurácias indicadas na Tabela 6, porém como o percurso não contemplou esses pontos, eles não foram incluídos em análises da qualidade posicional da linha de costa.

Tabela 6. Discrepância entre o cinemático 1 e os pontos de controle.

Pontos	Discrepância (m)	Passagem pelo ponto
A	2,33	Sim
B	13,34	Não
C	88,89	Não
D	7,78	Não

O rastreo cinemático 2 processou 3893 pontos, obtendo um desvio padrão médio na componente norte (N) de 0,189 metros, desvio padrão médio na componente leste (E) de 0,159 metros, resultando em uma precisão posicional média de 0,247 metros. O resultado foi a linha de costa de coloração laranja apresentada na Figura 25. De acordo com a escolha de trajeto da equipe do cinemático 2, obteve-se um resultado com poucos ruídos, alcançando um GDOP médio de 5,101 com uma média de 8 satélites GNSS observados durante o percurso.

Figura 25 – Rastreio Cinemático da equipe 2



Fonte: Google Earth Pro (2023)

Entre os quatro pontos de controle existentes, o rastreio cinemático 2 contemplou os pontos A, B e D, só não passando pelo local do ponto C. Dessa forma, a linha de costa do rastreio cinemático 2 teve uma acurácia de 1,054 metros em relação ao ponto A, 1,38 metros em relação ao ponto B e 8,881 metros em relação ao ponto D, como mostrado na Tabela 7.

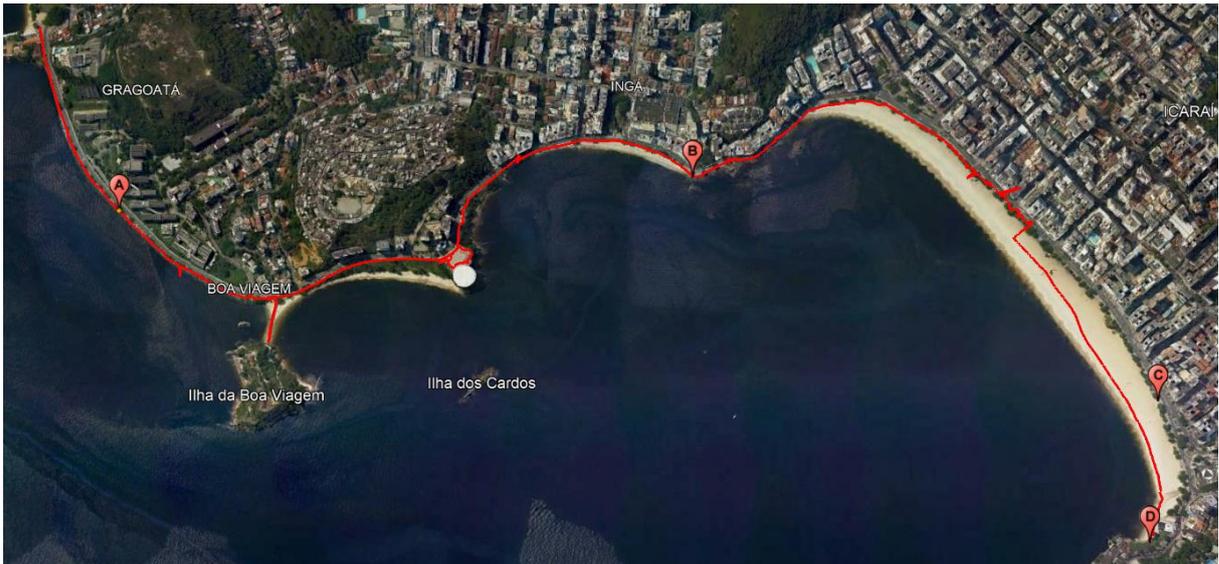
Tabela 7. Discrepância entre o cinemático 2 e os pontos de controle.

Pontos	Discrepância (m)	Passagem pelo ponto
A	1.054	Sim
B	1.38	Sim
C	79.373	Não
D	8.881	Sim

No rastreio cinemático 3, foram processados 7099 pontos obtendo um desvio padrão médio na componente norte (N) de 0,125 metros, desvio padrão médio na componente leste (E) de 0,106 metros, resultando em uma precisão posicional média de 0,164 metros. A conexão desses pontos produziu a linha de costa apresentada em coloração vermelho na Figura 26. A linha produzida não teve boa representatividade da linha de costa devido à grande quantidade

de ruídos e escolha de trajeto, o que fez com que na metade do percurso, a equipe optasse pela mudança de trajeto. Como técnica posicional os resultados foram significativos, alcançando um GDOP médio de 5,566 com uma média de 9 satélites GNSS, o que fez com que o dado fosse utilizado como análise.

Figura 26 – Rastreio Cinemático da equipe 3



Fonte: Google Earth Pro (2023)

A acurácia posicional do rastreio cinemático 3 não contemplou apenas o ponto de controle C, alcançando uma acurácia de 0,757 metros em relação ao ponto A, 1,009 metros em relação ao ponto B e 3,132 metros em relação ao ponto D, como mostrado na Tabela 8.

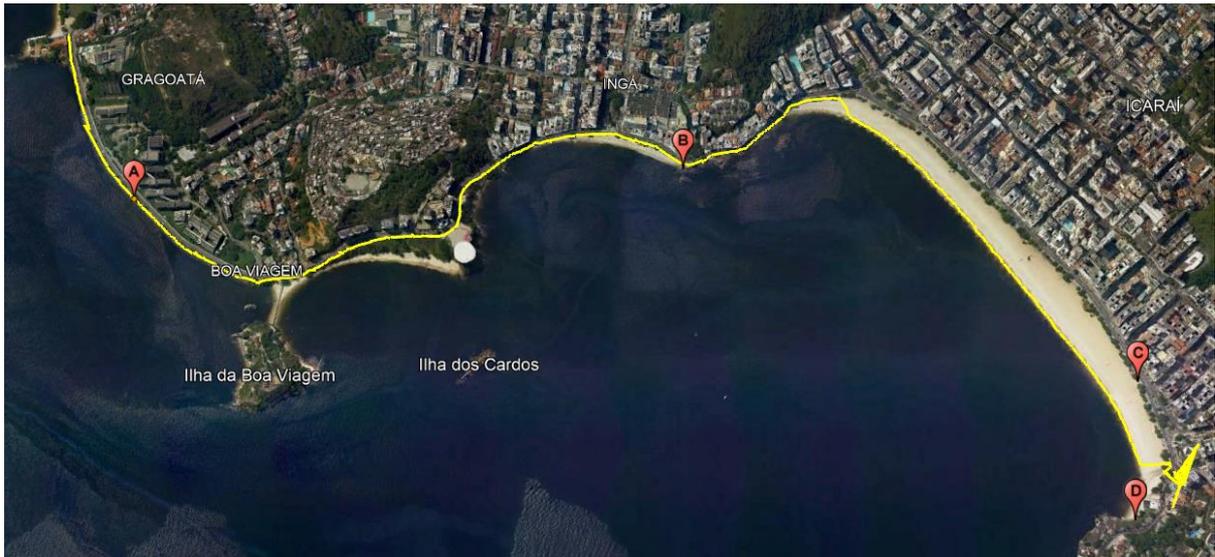
Tabela 8. Discrepância entre o cinemático 3 e os pontos de controle.

Pontos	Discrepância (m)	Passagem pelo ponto
A	0.757	Sim
B	1.009	Sim
C	64.043	Não
D	3.132	Sim

O rastreio cinemático 4 processou 3401 pontos, obtendo um desvio padrão médio na componente norte (N) de 0,206 metros, desvio padrão médio na componente leste (E) de 0,164 metros, resultando em uma precisão posicional média de 0,263 metros. A conexão desses pontos produziu a linha de costa apresentada em coloração amarela na Figura 27.

A linha produzida, com exceção do trecho final, próximo ao ponto D, teve uma representatividade da costa com poucos ruídos. Neste percurso houve pouca interferência do sinal GNSS, alcançando um GDOP médio de 3,911 com uma média de 8 satélites GNSS observados durante o percurso

Figura 27 – Rastreio Cinemático da equipe 4



Fonte: Google Earth Pro (2023)

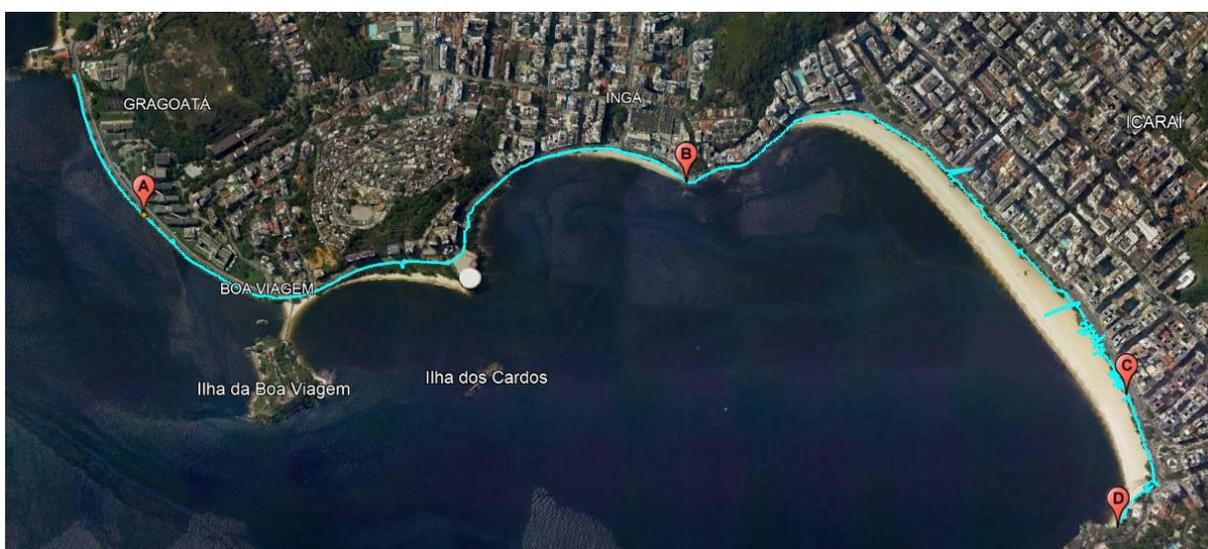
O trajeto escolhido pela equipe do rastreio cinemático 4 não contemplou os pontos fixos de controle B, C, e D. Dessa forma, a linha de costa do rastreio cinemático 4 teve uma acurácia de 2,283 metros em relação ao ponto A como mostrado na Tabela 9. Igualmente ao rastreio cinemático 1, o cinemático 4 pode aparentar na Figura 27 que o trajeto inclui mais pontos que somente o ponto A, mas a Figura 24 com uma escala maior demonstra o fato da não inclusão.

Tabela 9. Discrepância entre o cinemático 4 e os pontos de controle.

Pontos	Discrepância (m)	Passagem pelo ponto
A	2.283	Sim
B	11.104	Não
C	76.9	Não
D	82.708	Não

No cinemático 5, foram processados 4107 pontos obtendo um desvio padrão médio na componente norte (N) de 0,340 metros, desvio padrão médio na componente leste (E) de 0,348 metros, resultando em uma precisão posicional média de 0,487 metros. A conexão desses pontos produziu a linha de costa apresentada em coloração azul na Figura 28. A linha produzida teve uma quantidade significativa de ruídos, pois essa equipe seguiu em sua totalidade as linhas de costas fixas existentes na região, com influência de árvores ao longo de todo o percurso, diminuindo a quantidade média de satélites visíveis para 7, que resultaram na ocorrência de perda de ciclos em algumas regiões do trajeto, atingindo um GDOP médio de 7,852.

Figura 28 – Rastreio Cinemático da equipe 5



Fonte: Google Earth Pro (2023)

Apesar do produto de linha de costa gerado pela equipe do cinemático 5 ter significativa quantidade de ruído, o fato do trajeto seguir de maneira contínua todas as estruturas fixas de linha de costa fez com que o mesmo contemplasse todos os pontos de controles da pesquisa (A, B, C e D), alcançando uma acurácia de 1.022 metros em relação ao ponto A, 0.961 metros em relação ao ponto B, 1.047 metros em relação ao ponto C e 4.1 metros em relação ao ponto D, como mostrado na tabela 10.

Tabela 10. Discrepância entre o cinemático 5 e os pontos de controle.

Pontos	Discrepância (m)	Passagem pelo ponto
A	1.022	Sim
B	0.961	Sim
C	1.047	Sim
D	4.10	Sim

Desconsiderando os dados que não passaram pelos pontos de controle, os 5 rastreios cinemáticos geraram acurácias médias no ponto A de 1,279 metros, de 1,117 metros no ponto B, de 1,047 metros no ponto C e de 5,371 metros no ponto D (Tabela 11), como também são destacados na última linha da Tabela 11, os melhores resultados encontrados em cada ponto de controle.

Tabela 11. Discrepância entre os rastreios cinemático e os de controle.

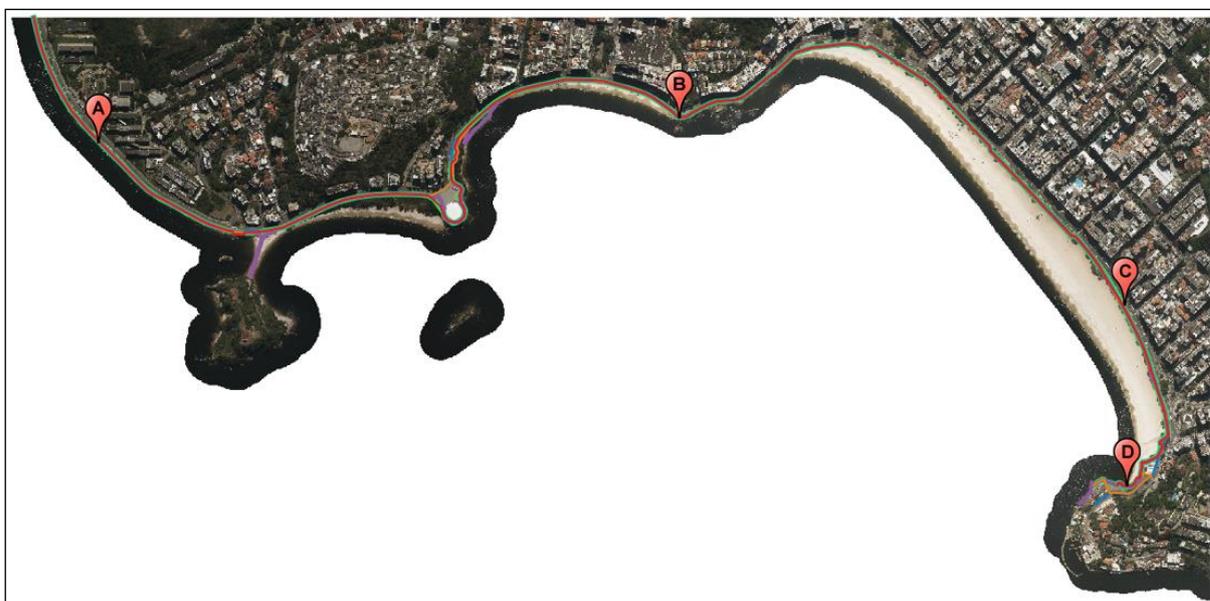
Cinemáticos	ΔA (m)	ΔB (m)	ΔC (m)	ΔD (m)
Cinemático 1	2,33	-	-	-
Cinemático 2	1,054	1,38	-	8,881
Cinemático 3	0,757	1,009	-	3,132
Cinemático 4	2,283	-	-	-
Cinemático 5	1,022	0,961	1,047	4,1
Média dos Cinemáticos	1,279	1,117	1,047	5,371
Melhores Cinemáticos	0,757	0,961	1,047	3,132

As acurácias médias encontradas nos rastreios cinemáticos nos pontos de controle implantados na linha de costa fixa tiveram valores variando de 1,047 metros até 1,279 metros, já o ponto de controle implantado na linha de costa móvel alcançou o valor de acurácia média de 5,371 metros.

4.3. AEROFOTOGRAMETRIA

As vetorizações dos ortomosaicos aerofotogramétricos foram construídas por 5 operadores, onde geraram 5 linhas distintas, com significativa suavidade e representação das linhas de costas fixas da região estudada. A figura 29 apresenta as 5 vetorizações criadas sobrepostas ao ortomosaico, como também os quatro pontos fixos de controle A, B, C e D.

Figura 29 – Vetorizações dos ortomosaicos sobrepostas.



Fonte: Autor (2024)

A figura 29, por ter visualmente o intuito de abranger a região por completo, tem uma escala que pode aparentar que as 5 vetorizações trazem o mesmo resultado. No entanto, a figura 30, apresenta a existência de significativas variações de resultados nos produtos gerados pelas diferentes vetorizações.

Figura 30 – Mosaico das diferenças entre as vetorizações dos ortomosaicos.



Fonte: Google Earth Pro (2023)

Cada vetorização passou pelos respectivos pontos de controle com exceção da vetorização do ortomosaico 2 e 5 que não contemplaram o ponto de controle D.

Dessa forma, a vetorização do ortomosaico feita pelo operador 1 contemplou os quatro pontos de controle, obtendo uma acurácia de 0,511 metros em relação ao ponto A, de 0,204 metros em relação ao ponto B, de 0,058 metros em relação ao ponto C e de 1,792 metros em relação ao ponto D, todas apresentadas na Tabela 12.

O operador 2 construiu uma vetorização que obteve uma acurácia de 0,280 metros em relação ao ponto A, de 0,174 metros em relação ao ponto B e de 0,705 metros em relação ao ponto C, apresentadas na Tabela 12.

A vetorização realizada pelo operador 3 alcançou um acurácia de 0,502 metros em relação ao ponto A, de 0,255 metros em relação ao ponto B, de 0,690 metros em relação ao ponto C e de 2,520 metros em relação ao ponto D, também demonstradas na Tabela 12.

Já a vetorização realizada pelo operador 4 obteve uma acurácia de 0,301 metros em relação ao ponto A, de 0,140 metros em relação ao ponto B, de 0,158 metros em relação ao ponto C e de 1,053 metros em relação ao ponto D, respectivamente apresentadas na Tabela 12.

A quinta vetorização contemplou três pontos de controle, obtendo uma acurácia de 0,247 metros em relação ao ponto A, de 0,518 metros em relação ao ponto B e de 0,247 metros em relação ao ponto C, demonstradas na Tabela 12.

Tabela 12. Discrepância entre as vetorizações dos ortomosaicos e os pontos controle.

Ortomosaicos	ΔA (m)	ΔB (m)	ΔC (m)	ΔD (m)
Vetorização 1	0,511	0,204	0,058	1,792
Vetorização 2	0,280	0,174	0,705	-
Vetorização 3	0,502	0,255	0,690	2,520
Vetorização 4	0,301	0,140	0,158	1,053
Vetorização 5	0,247	0,518	0,247	-
Média dos Vetorizações	0,332	0,272	0,542	1,788
Melhores Vetorizações	0,247	0,140	0,058	1,053

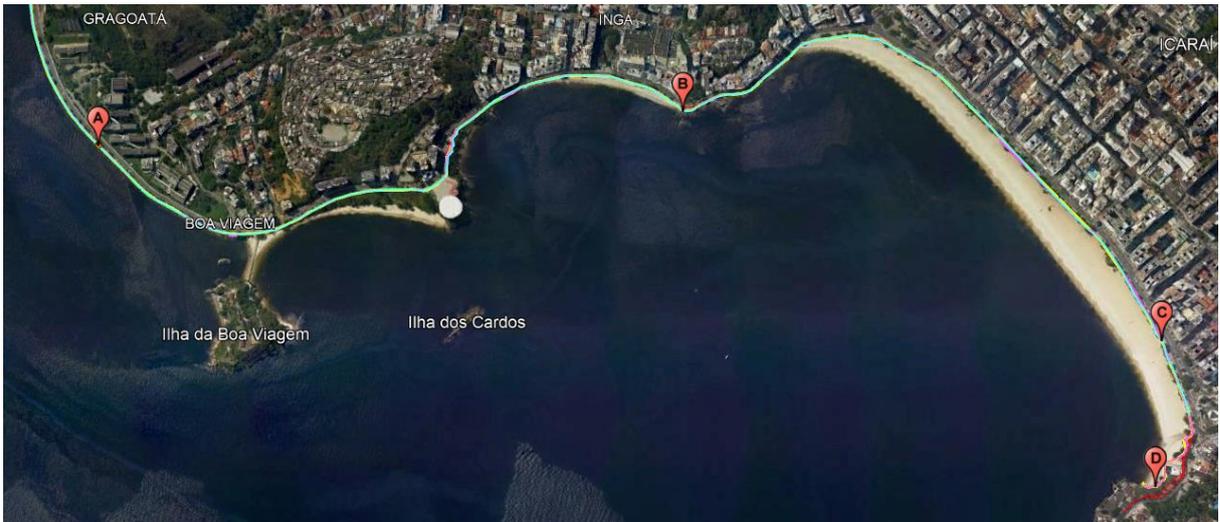
Todas as acurácias alcançadas em cada ponto de controle geraram uma acurácia média, que no ponto de controle A foi de 0,332 metros, no ponto B de 0,272 metros, no ponto de controle C de 0,542 metros e no ponto D de 1,788 metros, como demonstrado na Tabela 12. Essa mesma tabela também ressalta os melhores resultados de acurácia encontrados em cada ponto de controle.

4.4. IMAGENS DE SATÉLITE

As imagens de satélite tiveram um processo de vetorização semelhante ao processo de vetorização dos ortomosaicos aerofotogramétricos, sendo cada vetorização feita por um determinado operador distinto, focando na vetorização das linhas de costa fixas, o que levou a resultados de traçados relativamente semelhantes, como mostrados na figura 31.

As cinco linhas de costa geradas por cada um dos operadores com a ferramenta *QuickMapService* foram em conjunto, sobrepostos a uma imagem satelital gerando o resultado apresentado na figura 31, com suas respectivas passagens pelos pontos de controle da pesquisa.

Figura 31 – Vetorizações das linhas de costa sobrepostas na imagem de satélite.



Fonte: Google Earth Pro (2023)

Os resultados produzidos e apresentados na Figura 31 podem parecer mais semelhantes do que realmente são devido à escala da imagem, dessa forma, a Figura 32 apresenta algumas diferenças de resultados de traçado em cada um dos quatro pontos de controle da pesquisa.

Figura 32 – Mosaico das diferenças entre as vetorizações da imagem de satélite.



Fonte: Autor (2024)

Todas as vetorizações tiveram seus traçados passando pelos pontos de controle A e C, já o ponto B não foi contemplado pela vetorização 5 e o ponto de controle D não foi contemplado pela vetorização 2 e 5.

Com o exposto, a primeira vetorização da imagem por satélite da ferramenta *QuickMapService*, como apresentado na Tabela 13, obteve uma acurácia de 0,867 metros em relação ao ponto A, 1,509 metros em relação ao ponto B, 0,292 metros em relação a C e 1,448 em relação ao ponto D.

Já a segunda vetorização contemplou três dos quatro pontos de controle, alcançando uma acurácia de 0,311 metros em relação ao ponto A, 1,864 metros em relação ao ponto B e 0,828 metros em relação ao ponto C.

A terceira vetorização contemplou todos os pontos de controle A, B, C e D, alcançando as acurácias de 0,906 metros, 1,175 metros, 0,357 metros e 1,817 respectivamente, como mostrado na Tabela 13.

A vetorização 4, igualmente à 3, também contemplou todos os pontos de controle da pesquisa, obtendo uma acurácia no ponto A de 0,839 metros, no ponto B de 1,576 metros, no ponto C de 0,560 metros e no ponto D de 1,676 metros, todas apresentadas na Tabela 13.

A quinta e última vetorização da imagem de satélite abrangeu metade dos pontos de controle, atingindo os valores de acurácia de 0,469 metros para o ponto A e 0,797 metros para o ponto C, como apresentado na Tabela 13.

Tabela 13. Discrepância entre as vetorizações das imagens de satélite e os pontos controle.

Imagem de Satélite	ΔA (m)	ΔB (m)	ΔC (m)	ΔD (m)
Vetorização 1	0,867	1,509	0,292	1,448
Vetorização 2	0,311	1,864	0,828	-
Vetorização 3	0,906	1,175	0,357	1,817
Vetorização 4	0,839	1,576	0,560	1,676
Vetorização 5	0,469	-	0,797	-
Média das Vetorizações	0,631	1,531	0,567	1,647
Melhores Vetorizações	0,311	1,175	0,292	1,448

O conjunto das acurácias em cada ponto de controle gerou uma média das acurácias das vetorizações das imagens de satélite. Retirando os valores dos pontos não visitados, obtiveram-se um valor médio de 0,631 metros no ponto A, 1,531 metros no ponto B, 0,567 metros no

ponto C e um valor médio de 1,647 metros no ponto D, todos demonstrados na Tabela 13, em conjunto com os melhores valores de acurácias alcançados em cada ponto de controle da pesquisa.

5. DISCUSSÃO

Com todas as análises individuais de cada método expostas, será apresentada nesta seção inicialmente uma análise dos resultados da técnica de rastreo cinemático, das vetorizações de ortomosaicos aerofotogramétricos e imagens satelitais em relação a suas respectivas repetições, com os apontamentos em relação a possíveis vantagens e desvantagens de cada método.

Será realizada também, uma comparação qualitativa e quantitativa em termos de acurácia, para que se construam apontamentos da melhor metodologia a ser utilizada para o mapeamento da linha de costa.

5.1. ANÁLISES INDIVIDUAIS DOS MÉTODOS

Nos rastreios cinemáticos, foram obtidos resultados distintos em termos de qualidade posicional e traçado, tendo em vista que os caminhos percorridos pelas 5 equipes tiveram algumas divergências:

Durante os percursos feitos pelas equipes dos rastreios cinemáticos, o número médio de satélites GNSS visíveis foi acima de 4 (Tabela 14). Apesar disso, ocorreram trechos onde o número de satélites foi inferior a 4, resultando na perda de ciclo (MONICO, 2008). Estes trechos com alto nível de interferência no sinal GNSS influenciaram no GDOP médio dos respectivos rastreios (Tabela 14), que em grande parte do tempo se encontrava entre 2 e 3, mas nos momentos próximos às perdas de ciclo, tiveram seu valor aumentado em até 10 vezes, aumentando assim o GDOP médio.

Tabela 14. Qualidade posicional dos processamentos cinemáticos

Cinemáticos	Precisão posicional	GDOP médio	Nº médio de Satélites
Cinemático 1	0,3632	4,822	9
Cinemático 2	0,2474	5,101	8
Cinemático 3	0,1649	5,466	9
Cinemático 4	0,2638	3,911	8
Cinemático 5	0,4877	7,852	7

O rastreo cinemático 5 demonstra o fato do aumento do GDOP e a influência direta na precisão posicional média do levantamento (realçado em azul na Tabela 14), Na Figura 33,

também na cor azul, observa-se um trecho do trajeto do rastreo 5, que ao se aproximar de grandes prédios espelhados e de um setor da linha de costa fixa com significativa quantidade de árvores com copas densas, mostra um aumento do nível de ruído devido a possíveis multicaminhamentos do sinal GNSS (MONICO, 2008). Essas ocorrências seriam as causas do aumento de até 100% do GDOP médio desse rastreo, como também no aumento de até 200% dos desvios padrões médios, em relação aos outros rastreios. Na Figura 33 também é possível observar que a equipe do cinemático 3, representada pela linha vermelha, ao se aproximar da mesma região que a equipe 5, opta pela mudança de trajeto e se desloca para praia, onde a qualidade do sinal e quantidade de ruídos diminuem significativamente.

Figura 33 – Sobreposição dos 5 levantamentos cinemáticos.

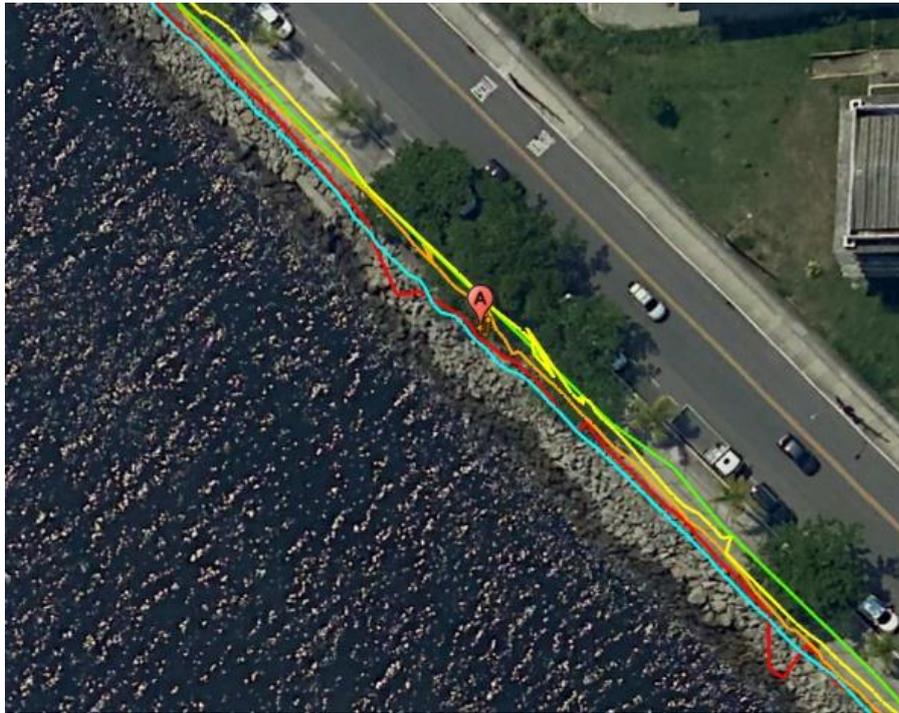


Fonte: Google Earth Pro (2023)

Dessa forma, é possível apontar que a técnica de rastreo cinemática é negativamente impactada nas regiões urbanas, tendo um melhor desempenho quando mais desobstruída é a região de linha de costa. A Figura 33 apresenta de maneira gradual onde a linha azul (caminhamento 5), mais próxima de prédios e árvores, tem uma degradação significativa do sinal e as linhas verde e amarela (caminhamentos 1 e 4), mais próximas da água e locais desobstruídos, têm um nível de ruídos menor.

Com a sobreposição dos 5 levantamentos cinemáticos é possível observar que, mesmo em região de linha de costa fixa e com pouca mudança de direção (seguimento retilíneo), a técnica cinemática tem resultados que divergem entre cada um dos caminhamentos, como mostrado na Figura 34. O afastamento máximo entre as linhas foi de aproximadamente 2 metros, sendo o maior entre as três técnicas estudadas neste trabalho. Ao analisar tal fato, houve apontamentos que o maior afastamento na técnica do rastreo cinemático é devido a ser a única das três técnicas que o operador está em campo, criando em tempo real à linha de costa, tendo dificuldades eventuais e obstáculos, sem a possibilidade de voltar após a ocorrência de um erro, diferente de vetorizações em imagens.

Figura 34 – Sobreposição dos 5 levantamentos cinemáticos em um trecho de linha de costa fixa e retilínea.



Fonte: Google Earth Pro (2023)

Com isso posto, é possível apontar que a técnica de rastreo cinemático tem a melhor capacidade de observação da situação atual da linha de costa, porém, em contrapartida, é a que mais é afetada pelos obstáculos existentes na região de levantamento.

Na mesma linha de análise, foi observado que as regiões de mudança de tipo de linha de costa, como mostrado na Figura 35, foram locais suscetíveis a erros, onde na mudança da região de faixa de areia para a região de linha de costa fixa, os grupos tomaram posturas distintas em termos de trajeto, causando assim alguns erros no produto final.

Figura 35 – Sobreposição dos 5 levantamentos cinemáticos com mudança de tipo de linha de costa.



Fonte: Google Earth Pro (2023)

A Figura 35 também ilustra a degradação do sinal GNSS de maneira conjunta por todos os levantamentos cinemáticos que passam por baixo de árvores de copas densas, reforçando assim o indício de tal fato ser um dificultador para esse tipo de técnica.

Tendo em vista os traçados gerados por cada um dos 5 rastreios cinemáticos, podemos afirmar que a equipe do cinemático 1 (Figura 23) teve a maior assertividade entre os 5 levantamentos cinemáticos quanto ao traçado de linha de costa definido pela carta 12000 (MARINHA, 2022), contemplando em grande parte todos os trechos de linha de costa fixa, como também as regiões de praia onde a linha de costa varia de acordo com as marés. A equipe do rastreio cinemático 2 (Figura 25) também alcançou boa representatividade da linha de costa como um todo (região de linhas fixas e variáveis) sem, no entanto, contemplar a praia da Boa Viagem, o que fez com que sua assertividade de traçado da linha de costa, definido pela média das preamares (MARINHA, 2022), ficasse inferior ao da equipe 1. Já a equipe 3 (Figura 26), escolheu um trajeto que teve pouca representatividade da linha de costa, onde o resultado teria que ser aperfeiçoado para ser utilizado como a única fonte de informação para a representação da região de estudo. Este fato se deve ao trajeto não contemplar de maneira significativa as linhas de costa das regiões móveis (praias), bem como a mudança de trajeto pelo nível alto de interferências por multicaminhamentos do sinal GNSS (MONICO, 2008). O produto gerado pela equipe 4 (Figura 27) foi a linha de costa com representatividade média, sendo superior aos resultados das equipes 3 e 5, e inferior ao produzido pelas equipes 1 e 2. A equipe 5 fez um

trajeto focado nas linhas de costas fixas (Figura 28), com isso, tendo pouca representatividade das regiões de praia, não alcançando um resultado satisfatório para a sua utilização sem complementação de outros levantamentos. Porém, o fato de o trajeto seguir a linha de costa fixa em totalidade possibilitou as análises de área urbanas como mostrado na Figura 33.

Os resultados dos traçados de maneira geral nos possibilitam afirmar que é possível apenas um rastreo cinemático alcançar o objetivo de representar a linha de costa de maneira a contemplar todas as regiões (linhas de costa fixas e móveis), porém também criam indícios que equipes são passíveis de erro no trajeto nos locais de mudança de tipo de linha de costa, necessitando de trabalhos posteriores para complementação.

Os 5 rastreios cinemáticos também obtiveram acurácias relativas aos pontos de controle, de modo que os rastreios resultaram em uma média que foi comparada na Tabela 15, com a acurácia preconizada no Quadro 1, retirado da norma IHO (2020). É possível observar que a acurácia média dos cinemáticos alcançou a qualidade exigida para levantamentos hidrográficos de Ordem Especial (segunda ordem mais precisa de levantamentos possíveis) e os melhores resultados dos rastreios, tirando o ponto C, alcançaram a Ordem Exclusiva (melhor ordem de levantamentos hidrográficos).

A Tabela 15 apresenta, na coloração azul, o valor de acurácia média em metros necessária para alcançar a categoria de levantamentos hidrográficos de Ordem Especial, bem como todos os valores médios encontrados nos pontos de controle, que atingiram tal qualidade posicional. Em verde são apresentados os valores para a Ordem Exclusiva, bem como os valores que alcançaram tal qualidade de levantamento hidrográfico. Vale mencionar que a Tabela 15 também subdivide os pontos de controles fixos e móveis, pois cada um deles tem uma exigência posicional diferente nas normas vigentes (IHO, 2020).

Tabela 15. Enquadramento da qualidade posicional dos processamentos cinemáticos

Pontos na linha de costa		Acurácia média (m)	Melhores acurácias(m)	Valores de referência de acurácia (m)*	
				Ordem Especial	Ordem Exclusiva
Fixos	A	1,279	0,757	2	1
	B	1,117	0,961		
	C	1,047	1,047		
Variável	D	5,371	3,132	10	5

*Os valores de referência constam no Quadro 1.

Dessa forma, é possível apontar que em termos posicionais os rastreios cinemáticos para levantamento de linha de costa são uma técnica que atingem a qualidade posicional demandada para levantamentos hidrográficos de alta qualidade.

Já nos resultados das vetorizações dos ortomosaicos, foi possível observar que não há grande variação de traçado entre um produto e outro, com as 5 vetorizações localizadas muito próximas, como mostrados na Figura 29. As variações apresentadas na figura 30 mostram que, em função dos operadores terem a visão de cima do terreno e terem o conhecimento de onde se encontram os pontos de controle, a não passagem pelos pontos de controle foi numa relação de 2 para 20, como mostrado na Tabela 12, bem inferior à técnica cinemática que foi uma relação de 8 pontos de não passagem para 20 pontos no total, como apresentado na Tabela 11.

Dessa forma, é possível apontar que as vetorizações dos ortomosaicos têm traçados que sofrem menos influências das condições do terreno. Em contrapartida, podem gerar tendências de erros, devido ao fato de o operador não ter estado propriamente na localidade da linha de costa. Vale ressaltar que o tempo de correção de uma vetorização ou, se assim se mostrar necessário, de total reconstrução, é menor e menos complexo do que retornar a campo para refazer um rastreio cinemático.

Quando se analisam as vetorizações dos ortomosaicos em termos da qualidade posicional, diferentemente dos traçados que foram possíveis apontar vantagens e desvantagens, os apontamentos são todos positivos, com todas as acurácias médias das 5 vetorizações relativas a cada ponto de controle mostrando valores abaixo da demandada para Ordem Exclusiva (melhor ordem de levantamentos hidrográficos) da IHO, como apresentado em verde na Tabela 15.

Tabela 16. Enquadramento da qualidade posicional das vetorizações dos ortomosaicos

Pontos na linha de costa		Acurácia média (m)	Melhores acurácias(m)	Valores de referência (m)*	
				Ordem Especial	Ordem Exclusiva
Fixos	A	0,332	0,247	2	1
	B	0,272	0,140		
	C	0,542	0,058		
Variável	D	1,788	1,053	10	5

*Os valores de referência constam no Quadro 1.

Com todos os valores de acurácia média atingindo a melhor ordem de referência da norma (IHO, 2020), é possível afirmar que a técnica de vetorização de ortomosaicos aerolevados não só atinge a qualidade posicional desejada, como também é indicada para regiões onde a precisão e acurácia da linha de costa são necessárias para a segurança da navegação.

As vetorizações das imagens de satélite disponibilizadas pela ferramenta *Quick Map Service* tiveram, de partida, uma grande vantagem em relação aos outros métodos. Como a aquisição das imagens foi feita diretamente de um link do programa usado para vetorização, o tempo total de produção da linha de costa foi significativamente inferior aos outros métodos, como apresentado nos materiais e métodos da pesquisa. Com isso exposto, esse método também contempla uma problemática significativa. Em primeiro lugar, as imagens são disponibilizadas sem informações exatas, não sendo possível garantir a qualidade posicional das mesmas. Além disso, a própria disponibilidade das imagens não é garantida para todos os lugares. Esse método fica apenas como um apontamento de possível solução, mas com ressalvas significativas para comparação com os outros métodos.

Com as ressalvas em relação ao método de vetorização das imagens de satélites feitas, os resultados de traçado foram próximos em termos de vantagens e desvantagens dos analisados na técnica de vetorização de ortomosaicos, na qual foi possível verificar a característica de tendência devido à visualização do produto como um todo e à noção de onde se encontram os pontos de controle, tendo uma assertividade de passagem pelos 3 pontos não contemplados para 20 tentados como mostrado na Tabela 13. As 5 vetorizações também alcançaram resultados de traçados muito próximos como mostrado na Figura 31, com as variações apresentadas na Figura 32, reforçando o apontamento de tendência.

Igualmente à técnica de vetorizações dos ortomosaicos, as vetorizações das imagens de satélites apontaram sofrer menos influências das condições do terreno, com o mesmo óbice de se criar erros devido ao fato de o operador não ter estado presencialmente na localidade da linha de costa que se está gerando. Com isso, esses dois métodos apresentam vantagens mais condizentes com levantamentos de linhas de costa com pouca necessidade de observação presencial.

Analisando as vetorizações das imagens de satélite em termos da qualidade posicional, as acurácias médias das 5 vetorizações em cada ponto de controle alcançaram no ponto A, C e D os requisitos de Ordem Exclusiva como apontado em verde na Tabela 17. Já a média no ponto B atingiu valores condizentes com a ordem especial, como apresentado em azul na Tabela 17.

Tabela 17. Enquadramento da qualidade posicional das vetorizações das imagens de satélite

Pontos na linha de costa		Acurácia média (m)	Melhores acurácias(m)	Valores de referência (m)*	
				Ordem Especial	Ordem Exclusiva
Fixos	A	0,631	0,311	2	1
	B	1,531	1,175		
	C	0,567	0,292		
Variável	D	1,647	1,448	10	5

*Os valores de referência constam no Quadro 1.

Como a Ordem Exclusiva e a Ordem Especial, são as mais precisas e restritivas categorias dentre as 6 possíveis da norma de qualidade posicional de levantamento hidrográficos da IHO (IHO,2020), é possível apontar que a técnica de vetorização de imagem de satélite atinge a qualidade posicional necessária para ser uma técnica utilizada para levantamentos de linha de costa. Porém não se pode perder de vista o fato mencionado sobre a disponibilidade do produto, deixando aqui margens para trabalhos futuros sobre a qualidade posicional de vetorizações com imagens de satélites não gratuitas.

5.2 ANÁLISES POSICIONAIS COMPARATIVAS

As três técnicas alcançaram resultados distintos em termos de traçado e qualidade posicional como apontados nas Tabelas 15, 16 e 17. Todas as três técnicas alcançaram alguma ordem de qualidade de levantamento entre as preconizadas pela IHO (2020), assim mostrando-se todas aptas a serem utilizadas em levantamentos de linha de costa.

A Tabela 18 faz um comparativo da qualidade posicional entre as três técnicas estudadas, na qual a técnica de rastreamento cinemático, a de vetorização dos ortomosaicos aerolevados e a vetorização de imagens por satélite da ferramenta *Quick Map Service* se encontram na primeira coluna em suas subdivisões, de média das acurácias dos pontos de controle e melhor resultado da técnica nos respectivos pontos (A, B, C e D).

Tabela 18. Diferença da acurácia média e melhores resultados entre as três técnicas estudadas.

Técnicas	ΔA (m)	ΔB (m)	ΔC (m)	ΔD (m)
Média dos Cinemáticos	1,279	1,117	1,047	5,371
Melhores Cinemáticos	0,757	0,961	1,047	3,132
Média dos Ortomosaicos	0,332	0,272	0,542	1,788
Melhores Ortomosaicos	0,247	0,140	0,058	1,053
Média das Imagens Satélite	0,631	1,531	0,567	1,647
Melhores das Imagens Satélite	0,311	1,175	0,292	1,448

O que foi apontado por Pajak e Leatherman (2002), de que a técnica de rastreios cinemáticos tem melhor qualidade posicional para delimitação de linhas de costa, não se concretizou nos resultados desse trabalho. A Tabela 18 aponta a técnica do rastreio cinemático como a com pior resultado em termos de acurácia posicional, com exceção do ponto B, onde essa técnica alcançou melhores resultados que a vetorização de imagens de satélite, porém, pior resultado do que a vetorização dos ortomosaicos aerolevantados.

De modo geral, é possível apontar a técnica de vetorização dos ortomosaicos como a melhor técnica em termos de acurácia posicional, com os melhores resultados individuais em cada ponto de controle e a melhor média em três de quatro pontos, tendo resultado inferior apenas no ponto D em relação à vetorização de imagem de satélite, mas ainda assim sendo superior que o rastreio cinemático.

Vale ressaltar ainda que essa técnica alcançou a acurácia média de 0,332 metros no ponto A, que é duas vezes mais acurado que o valor de 0,631 metros alcançado pela vetorização de imagens por satélite, e quatro vezes mais acurado que o valor de 1,279 metros alcançada pelo rastreio cinemático. As acurácias nos outros pontos de controle seguiram ordens de grandeza próximas, como mostrado na Tabela 18.

A popularização na última década das tecnologias de aeronaves remotamente controladas mencionadas por Munaretto (2017), bem como a evolução das câmeras para esse tipo de plataforma, é um forte indício da mudança de resultado em relação ao estudado por Pajak e Leatherman (2002).

5.3. ANÁLISES COMPARATIVAS DE TEMPO

Em última análise, vale observar os tempos necessários para cada técnica concluir o produto da linha de costa, desde a execução do levantamento de informações, o processamento de dados e a construção da linha de costa propriamente dita. A Tabela 19 indica a quantidade de horas envolvidas em cada etapa da construção da linha de costa, de modo que a coluna “Execução” tem as horas gastas em trabalho de campo de cada técnica, a coluna “Processamento” o tempo do trabalho em escritório e a coluna “Horas Totais”, como o próprio nome já indica, o somatório das duas colunas anteriores.

Tabela 19. Tempo médio envolvido nas etapas das três técnicas estudadas.

Técnicas	Execução(h)	Processamento (h)	Horas Totais
Rastreio Cinemáticos	2,5	2,5	5
Vetorização dos Ortomosaicos	1,5	3	4,5
Vetorização das Imagens Satélite	0	1	1

Tendo o tempo total de cada técnica apontado na Tabela 19, é possível afirmar que a vetorização das imagens de satélite, desde que a imagem já esteja disponível, tem um tempo de produção significativamente inferior às outras técnicas, o que agiliza em muito o trabalho de levantamento em grandes áreas.

A técnica de vetorização dos ortomosaicos aerolevantados alcançou um tempo total de 4 horas e 30 minutos para produzir uma linha de costa de 4 km, como apresentado na Tabela 19. Já a técnica de rastreamento cinemático alcançou o tempo total de 5 horas para o levantamento da mesma região, indicando que, em pequenas áreas, os resultados são relativamente equivalentes, mas esse valor pode ser significativo quando em regiões maiores.

Tendo em vista os aproximadamente 8 mil quilômetros de linha de costa do Brasil (IBGE, 2011), como sua diversidade e capacidade dinâmica de mudanças contínuas, o tempo envolvido no processo de produção de linhas de costa pode ser muito significativo. No entanto, a técnica de vetorização dos ortomosaicos aerolevantados pode ser bastante eficiente para outras regiões do Brasil, onde a vetorização das imagens de satélite possa ser impactada pela falta de garantia de abrangência e qualidade das imagens.

6. CONCLUSÃO

Diante de todo o exposto, é possível afirmar que as técnicas estudadas são indicadas para o levantamento de linha de costa das regiões brasileiras, mas tendo em vista a grande extensão e diversidade da costa do Brasil, cada técnica apontou vantagens e desvantagens para cada determinado tipo de característica costeira.

O levantamento através de vetorização de ortomosaicos aerolevantados alcançou a melhor acurácia posicional entre as três técnicas, sendo assim, o método mais indicado para regiões com linhas de costas bem definidas e com importância posicional significativa para a segurança da navegação (pontes, portos, quebra-mares e etc), bem como para interesses jurídicos.

Os levantamentos com rastreios cinemáticos tiveram a pior acurácia posicional entre as três técnicas estudadas, sendo indicados para localidades onde outras técnicas sejam impossibilitadas por qualquer motivo, ou haja necessidade de operadores em campo, para a observação de alguma outra informação específica que o dado remoto não disponibilize.

Já as vetorizações de imagens de satélite se mostraram uma técnica muito efetiva em termos de capacidade logística, nas quais o tempo por área levantada se mostrou significativamente menor do que os das outras técnicas. A principal limitação dessa técnica é a utilização de imagens livres disponibilizadas pela ferramenta *Quick Map Service*, de forma que a qualidade e disponibilidade das imagens não podem ser garantidas.

Seriam de grande valia para o aprofundamento do estudo futuros trabalhos utilizando imagens por satélite gratuitas com disponibilidade e qualidade posicional homogêneas em todo território nacional, ou até mesmo com imagens de satélites adquiridas no mercado com alta resolução espacial, para avaliar se as mesmas conseguem alcançar qualidades posicionais próximas às encontradas na técnica de vetorização de ortomosaicos aerolevantados desse trabalho.

Por fim, vale ressaltar que o estudo das técnicas de levantamentos de linha de costa produziu evidências para auxiliar as escolhas dos tomadores de decisão em futuros projetos, maximizando a capacidade de execução e produzindo traçados com qualidade posicional mais condizentes com o objetivo dos levantamentos. No entanto os estudos apresentados não se limitam somente a tal, podem também ser bons indicadores para utilização dessas técnicas em outras atividades de levantamentos de informação, desde cadastros urbanos, mapeamentos agrícolas, ou qualquer outra atividade a qual as técnicas estudadas possam agregar na sociedade.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, J. B. **Fotogrametria**. Curitiba: Sbee, 1998.
- BOAK, E. H.; TURNER, I. L. Shoreline Definition and Detection: A Review. **Journal of Coastal Research, Coastal Education and Research Foundation**, v. 2005, n.º. 214, p. 688 – 703, 2005.
- BRITO, Vítor Côrrea de. **Contribuição do Uso de Múltiplas Constelações GNSS no Posicionamento por Ponto Preciso Aplicado ao Monitoramento**. Curitiba, 2023. 84 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2023.
- CÂMARA, Gilberto et al. Introdução à Ciência da Geoinformação. São José dos Campos: **INPE**, v. 345, 2001.
- CAMARGO, Paulo De Oliveira. **Modelo Regional da Ionosfera para Uso em Posicionamento com Receptores GPS de uma Frequência**. Curitiba, 1999. 206 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1999.
- CRÓSTA, A. P. **Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Campinas: Editora da Unicamp, 1999.
- DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO (DHN). **Carta 12000** (Símbolos, Abreviaturas e Termos Usados nas Cartas Náuticas Brasileiras). Niterói: Diretoria de Hidrografia e Navegação, 2022.
- EMLID. **Reach RS2+ (Especificações Técnicas)**. Disponível em: <https://loja.emlid.com.br/product/reach-rs2-plus/>. 2023. Acesso em: 14 de julho de 2024.
- EISENBEISS, H. A Mini Unmanned Aerial Vehicle (UAV): System Overview and Image Acquisition. In: **International Workshop on Processing and Visualization Using High Resolution Imagery**. 2004, Anais. p. 18-20.
- FIGUEIREDO, Divino. **Conceitos Básicos de Sensoriamento Remoto**. São Paulo, 2005.
- FLORENZANO, T. G. **Imagens de Satélite para Estudos Ambientais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2002.
- FONSECA, Raquel Batista Medeiros da. **Classificação da Linha de Costa e Evolução Holocênica da Ilha do Cabo Frio, Arraial do Cabo - Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro, 2009. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.
- GEMAEL, C. **Geodésia Celeste**. Editora UFPR, 2004.
- HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H. & WASLE, E. **GNSS-Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more**. New York, Springer Wien: New York, 2008.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J. **GPS Theory and Practice**. Springer-Verlag, Wien, Fourth Revised Edition, 389 p., 2007.

HOLANDA, T. F.; GONÇALVES, R. M.; LINO, A. P.; PEREIRA, P. S.; SOUSA, P. H. G. O. Classificação das Variações Morfodinâmicas e Processos Costeiros, Praia do Paiva, PE, Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia (Online)**, São Paulo, v. 21, n. 2, p. 235 - 251, 2020. Acesso em: 14 de julho de 2024.

HUINCA, Suelen Cristina Movio. **Calibração Relativa de Antenas GNSS na BCAL/UFPR**. Curitiba, 2009. 130 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Atlas geográfico das zonas costeiras e oceânicas do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 2011

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Recomendações para levantamentos relativos estáticos – GPS**. Disponível em: https://geoftp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/normas/recom_gps_internet.pdf, 2008. Acesso em: 14 de julho de 2024.

_____. IBGE - RBMC - **Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS, Relatório de Informação de Estação RJNI - Niterói**. Disponível em: https://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_sobre_posicionamento_geodesico/rbmc/relatorio/Descritivo_RJNI.pdf, 2019. Acesso em: 14 de julho de 2024.

_____. IBGE-PPP: **Serviço On-line para Pós-Processamento de Dados GNSS**. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101677.pdf>, 2023. Acesso em: 14 de julho de 2024.

INTERNATIONAL HYDROGRAPHIC ORGANIZATION (IHO). **IHO S-32: Hydrographic Dictionary**. Monaco: International Hydrographic Organization. 2019.

INTERNATIONAL HYDROGRAPHIC ORGANIZATION (IHO). **IHO S-44: Standards for Hydrographic Surveys**. Monaco: International Hydrographic Organization. 6. ed. 2020.

INTERNATIONAL HYDROGRAPHIC ORGANIZATION (IHO). **IHO S-4: Regulations for International Charts and Chart Specifications of the IHO**. Monaco: International Hydrographic Organization. 4.9.0. ed. 2021.

LEICK, A. **GPS Satellite Surveying**. 3.ed. United States: John Wiley, 2004.

LUGNANI, J. B. **Introdução à Fototriangulação**. Editora UFPR, 1987.

MAROTTA, G. S.; FERREIRA, A. M. R.; ROIG, H. L.; DE ALMEIRA, T. Avaliação de Câmara de Pequeno Formato Transportada por Veículo Aéreo Não Tripulado para Uso em Aerolevantamentos. **Revista Brasileira de Cartografia**, [S. l.], v. 67, n. 3, 2015.

MARQUES, H. A. PACHECO, A. P. TANAJURA, E. L. X. Uma Abordagem de Monitoramento Geoespacial de Barragens Hidroelétricas a partir do GNSS: Resultados Preliminares. **Estudos Geológicos**. UFPE, Recife, v. 26, n. 2, p.129-146, 2016

MARTINS, M. A. R. **Geração de Ortoimagens a partir de Georreferenciamento Direto de Imagens Digitais Aéreas de Pequeno Formato com Dados LiDAR**, Curitiba, 2010. 131 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

MONICO, João Francisco Galera. **Posicionamento pelo GNSS: Descrição, Fundamentos e Aplicações**. São Paulo: Editora UNESP, 2008.

MOURA, C. J. M. **Análise da Extração Semiautomática de Lago em Ortofoto e Imagem de Satélite Utilizando Técnicas de Processamento de Imagens: Binarização e Morfologia Matemática**. Recife, 2017. 99 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Cartográfica) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

MUNARETTO, L. **VANT e Drones: A Aeronáutica ao Alcance de Todos**. 2ª. ed. São José dos Campos: Edição Independente, 2017.

MUSTARD, J. F.; SUNSHINE, J. M. Spectral Analysis for Earth Science: Investigations Using Remote Sensing Data. In: RENCZ A. N. **Remote Sensing for the Earth Sciences**. New York: John Wiley & Sons, Inc.1999.

OLIVEIRA, S. M. C. **Evolução Recente da Linha de Costa no Troço Costeiro Forte Novo – Garrão (Algarve)**. Lisboa (Portugal), 2005. 137 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia da Terra) – Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Lisboa (Portugal), 2005.

PAJAK, Mary Jean; LEATHERMAN, Stephen. The High-Water Line as Shoreline Indicator. **Journal of Coastal Research**, p. 329-337, 2002.

PEGORARO, A. J., et al. Veículo Aéreo não Tripulado: Uma Ferramenta de Auxílio na Gestão Pública. In: **XI Simpósio Argentino de Informática y Derecho (SID)-JAIIO 42 (2013)**. 2013.

SEEBER, Günter. **Satellite Geodesy**. 2nd completely rev. and extended ed ed. Berlin; New York: Walter de Gruyter, 2003.

SHIRATSUCHI, Luciano Shozo et al. Sensoriamento Remoto: Conceitos Básicos e Aplicações na Agricultura de Precisão. In: BERNARDI, Alberto Carlos de Campos; et al. **Agricultura de Precisão: Resultados de um Novo Olhar**. Brasília (DF): EMBRAPA, 2014.

SIGEO – Sistema de Gestão de Geoinformação – Niterói. **Prefeitura Municipal de Niterói**. 2023. Disponível em: <https://www.sigeo.niteroi.rj.gov.br/pages/sobre>. Acesso em: 14 de julho de 2024.

TEUNISSEN, P. J.G.; MONTENBRUCK O. Teunissen. Global Navigation Satellite Systems: Springer Handbook. Perth, Australia: **Springer International Publishing**, 2017. 1333 p. ISBN 978-3-319-42926-7.

THROWER, N. J. W.; JENSEN, J. R. The Orthophoto and Orthophotomap: Characteristics, Development and Application. **The American Cartographer**, v. 3, n. 1, p. 39-56, 1976.

VITTE, A. C. O Litoral Brasileiro: A Valorização do Espaço e os Riscos Socioambientais. **Territorium**, v. 10, p. 61 – 67, 2003.

WOLF, P. R.; DEWITT, B.A. **Elements of Fotogrammetry: With Application in GIS**. 4 ed. Boston: McGraw-Hill, 2014.

YUEN, Ming Fatt. **Dilution of Precision (DOP) Calculation for Mission Planning Purposes**. Monterey (CA/EUA), 2009. 221 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e Física Aplicada). Naval Postgraduate School. Monterey (CA/EUA), 2009.

ZANOTTA, D. C.; et al. **Processamento de Imagens de Satélite**. Oficina de Textos, 2019.