

# Análise de performance de um sistema integrado GNSS/INS em posicionamento urbano

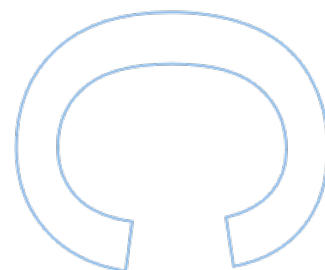
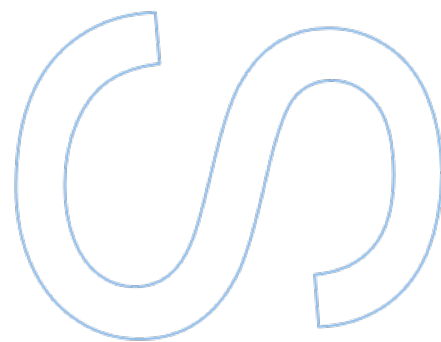
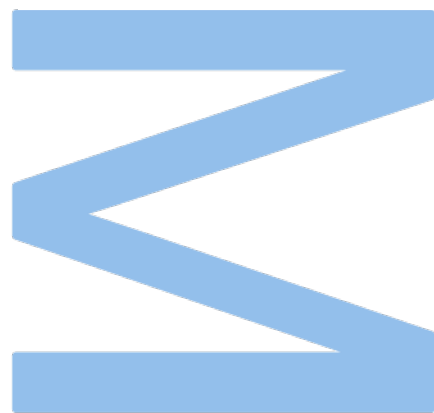
Joana Isabel Fernandes Machado

Mestrado em Engenharia Geoespacial

Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território

Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

2024





# Análise de performance de um sistema integrado GNSS/INS em posicionamento urbano

**Joana Isabel Fernandes Machado**

Dissertação realizada no âmbito do Mestrado em Engenharia Geoespacial  
Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território  
2024

**Orientador**

José Alberto Álvares Pereira Gonçalves, Professor Auxiliar,  
Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

**U.** PORTO

**FC** FACULDADE DE CIÊNCIAS  
UNIVERSIDADE DO PORTO

*"You've got to expect things are going to go wrong. And we always need to prepare ourselves for handling the unexpected."*

*Neil Armstrong*

## Agradecimentos

Gostaria de expressar os meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a realização desta dissertação.

Em primeiro lugar, agradeço ao Professor José Alberto Gonçalves, o meu orientador de dissertação, pela oportunidade concedida, pela sua disponibilidade e pela orientação constante ao longo de todo o projeto. Destacando que, o apoio foi crucial para o desenvolvimento e concretização deste trabalho.

Um agradecimento especial ao André Pinhal, aluno de doutoramento em Engenharia Geográfica, pela colaboração e orientação nos momentos mais determinantes e cruciais, que permitiram ultrapassar diversos desafios técnicos e científicos, nomeadamente no que respeita à montagem do sistema GNSS/INS, à execução do percurso e ao tratamento dos dados.

Quero também deixar o meu agradecimento ao Professor Américo Magalhães, que me ajudou diretamente com o tratamento dos dados.

Por fim, o meu agradecimento estende-se a todas as pessoas que, de forma direta ou indireta, me apoiaram ao longo deste percurso, aos meus colegas, amigos e família.

A todos, o meu sincero obrigado.

# Resumo

Este estudo teve como objetivo colocar em funcionamento um sistema GNSS/INS da marca OxTS, modelo XNAV650, para levantamento cinemático numa viatura e avaliar a sua performance. Inicialmente, fizeram-se testes com um recetor GNSS simples, com posicionamento RTK (Real Time Kinematic) num veículo, no qual foi realizado um percurso estratégico com o intuito de avaliar o desempenho em ambientes desfavoráveis, tais como a presença de vegetação densa, viadutos, pontes ou túneis. Posteriormente foi adotado o sistema integrado GNSS/INS, reconhecido por fornecer posição, velocidade e atitude, e que se espera ter uma precisão superior e um desempenho dinâmico mais eficaz quando comparado com um GNSS individualmente. Consequentemente, ambos os sistemas foram instalados no mesmo veículo possibilitando a comparação de resultados obtidos quando efetuado o mesmo trajeto. Antecipa-se que o sistema GNSS possa apresentar um desempenho inferior nos ambientes anteriormente mencionados. Acontece porque o posicionamento RTK depende do número de satélites visíveis, e em ambientes com visibilidade reduzida, o processo de posicionamento torna-se mais complicado.

Assim, para a navegação de veículos autónomos, como os automóveis numa cidade, a integração GNSS/INS desempenha um papel crucial ao possibilitar uma navegação precisa. Os GNSS fornecem informações globais de posição, enquanto os INS compensam as limitações dos GNSS em áreas urbanas, túneis ou quando ocorrem perdas temporárias de sinal GNSS. Este sistema é também de extrema importância para as áreas da geodesia e da topografia, sendo utilizado para posicionamento de precisão, permitindo que os levantamentos sejam realizados com elevada precisão, mesmo em áreas onde a receção dos sinais GNSS possa ser obstruída.

**Palavras-Chave:** posicionamento de precisão; sistema integrado GNSS/INS; GNSS; INS; performance; antena; recetor; RTK; pós-processamento; satélites.

# Abstract

In order to perform this study, the GNSS system with RTK (Real Time Kinematic) positioning will be initially implemented on a vehicle, in which a strategic route will be carried out with the goal of evaluating its performance in unfavorable environments, such as presence of dense vegetation, viaducts, bridges or tunnels. After that first step, an integrated GNSS/INS system will be adopted, known for providing position, speed and attitude with superior precision and more effective dynamic performance when compared to a GNSS or INS individually. Consequently, both systems will be installed in the same vehicle, making it possible to compare the results obtained for each one on every journey.

The expected results are, in general, direct and straight forward. It is anticipated that the GNSS system may underperform in the previously mentioned environments. This happens because RTK positioning is dependent on the number of visible satellites, and in environments with reduced visibility, the positioning process can be more complicated. Taking that into consideration, regarding the navigation of autonomous vehicles such as cars, GNSS/INS integration plays a crucial role in enabling an accurate navigation. GNSS's provides global position information, while INS compensates for GNSS limitations in urban areas, tunnels, or when temporary GNSS signal losses occur. This system is also extremely important for the area of Geodesy and topography, and it's used for precision positioning, allowing the results to be obtained with high precision, including the areas where the reception of GNSS signals may be obstructed.

**Keywords:** precision positioning; integrated GNSS/INS system; GNSS; INS; performance; antenna; receiver; RTK; post-processing; satellites.

# Índice

Lista de Tabelas .....	vii
Lista de Figuras .....	viii
Lista de Abreviaturas .....	x
1. Introdução .....	1
1.1. Objetivo.....	1
1.2. Caracterização.....	2
1.3. Estrutura da dissertação .....	2
2. Revisão do estado da arte e metodologias utilizados neste trabalho .....	4
2.1. Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS).....	4
2.3. Princípio de funcionamento de um GNSS .....	6
2.5. RTK (Real Time Kinematic) .....	7
2.6. Sistema Global de Navegação por Satélite - “SEPTENTRIO MOSAIC-X5” ...	9
2.7. Sistema de Navegação Inercial (INS).....	10
2.7.1. Vantagens e desvantagens: INS.....	10
2.8. Sistema integrado GNSS/INS.....	11
2.8.1. Vantagens da interação de um sistema integrado GNSS/INS.....	12
2.8.2. Aplicações.....	12
2.9. OXTS Inertial + GNSS – modelo xNAV 650 .....	14
2.10. QGIS (Quantum Geographic Information System) .....	16
3. Metodologias e Resultados .....	17
3.1. Sistema GNSS.....	17
3.2. Sistema GNSS/INS e Sistema GNSS.....	22
4. Discussão .....	33
4.1. Sistema GNSS.....	33
4.2. Sistema GNSS/INS – “OXTS Inertial + GNSS – modelo xNAV 650” e Sistema GNSS – “SEPTENTRIO MOSAIC-X5” .....	<b>Erro! Marcador não definido.</b>
5. Conclusão e Estudos Futuros .....	43

Referências Bibliográficas ..... 45

## Lista de Tabelas

Tabela 1 Diferentes Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS) associados a cada sigla e região. US: América. RU: Russia. EU: União Europeia. CN: China.....	5
Tabela 2 - Descrição do posicionamento RTK. ....	8
Tabela 3 - Número de pontos e a respetiva posição obtida durante o trajeto executado com o sistema GNSS. ....	35
Tabela 4 - Número de pontos e a respetiva posição obtida durante o trajeto executado com o sistema SEPTENTRIO MOSAIC X5. ....	39

## Lista de Figuras

Figura 1 - OXTS Inertial + GNSS – modelo xNAV 650. ....	14
Figura 2 - Menu NAVsuite. ....	15
Figura 3 - Importação de dados no QGIS. ....	19
Figura 4 - Definição da simbologia da camada no QGIS. ....	19
Figura 5 - Localização do trajeto efetuado. ....	20
Figura 6 - Posição dos pontos coordenados: fix, float e single. ....	20
Figura 7 – Sistema inercial, antenas e cabo coaxial. ....	23
Figura 8 - Montagem do sistema GNSS/INS no automovel. ....	23
Figura 9 - Visualização da performance do sistema GNSS/INS através do NAVdisplay. .....	24
Figura 10 - Localização do trajeto efetuado: GNSS. ....	26
Figura 11 - Posição dos pontos coordenados GNSS: fix, float e single. ....	26
Figura 12 - FileZilla: dados Renep. ....	28
Figura 13 - NAVsuite Application: Source. ....	29
Figura 14 - NAVsuite Application: Preview, product information. ....	29
Figura 16 - Pré-visualização através do Map. ....	30
Figura 16 - Pré-visualização através do Bing Map. ....	30
Figura 17 - NAVsuite Application: Process, estações de base e World View. ....	30
Figura 18 - NAVsuite Application: Process, Base station – Time Overlap. ....	31
Figura 19 - Posição dos pontos coordenados com correções de base: Espinho (Smartnet). ....	32
Figura 20 - Posição dos pontos coordenados com correções de base: Gaia (Renep). ....	32
Figura 21 - Posição dos pontos coordenados sem correções de base. ....	33
Figura 22 - Parte do percurso com posição single: GNSS. ....	34
Figura 23 - Percentagem da posição dos pontos coordenados tendo em conta o número total de pontos obtidos. ....	35
Figura 24 - Ilustração do trajeto com correções provenientes de estações diferentes, Sistema GNSS/INS. ....	37
Figura 25 - Ilustração do trajeto: Sistema GNSS. ....	37
Figura 26 - Representação de resultados de ambos os sistemas. ....	38
Figura 27 - Percentagem da posição dos pontos coordenados tendo em conta o número total de pontos obtidos. ....	39
Figura 28 - Percurso realizado, descrito pelo ficheiro NMEA. ....	40

Figura 29 - Comparação entre os resultados de posicionamento do sistema GNSS e do sistema GNSS/INS: exemplo 1. ....	40
Figura 30 - Comparação entre os resultados de posicionamento do sistema GNSS e do sistema GNSS/INS: exemplo 2. ....	41
Figura 31 - Comparação entre os resultados de posicionamento do sistema GNSS e do sistema GNSS/INS: exemplo 3. ....	41
Figura 32 - Comparação entre os resultados de posicionamento do sistema GNSS e do sistema GNSS/INS: exemplo 4. ....	42
Figura 33 - Comparação entre os resultados de posicionamento do sistema GNSS e do sistema GNSS/INS: exemplo 5. ....	42

## Lista de Abreviaturas

GNSS	GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM
INS	INERTIAL NAVIGATION SYSTEM
RTK	REAL TIME KINEMATIC
PPK	POST PROCESSING KINEMATIC
PNT	POSITIONING, NAVIGATION AND TIMING
GPS	GLOBAL POSITIONING SYSTEM
GLONASS	GLOBALNAYA NAVIGATSIONNAYA SPUTNIKOVAYA
BDS	BEIDOU NAVIGATION SATELLITE SYSTEM
CNSS	COMPASS NAVIGATION SATELLITE SYSTEM
WGS84	WORLD GEODETIC SYSTEM 1984
ITRF	INTERNATIONAL TERRESTRIAL REFERENCE FRAME
IMU	INERTIAL MEASURING UNIT
OAPMB	OBSERVATÓRIO ASTRONÓMICO “PROFESSOR MANUEL DE BARROS”
FCUP	FACULDADE DE CIÊNCIAS DA UNIVERSIDADE DO PORTO
UP	UNIVERSIDADE DO PORTO
PTP	PRECISION TIME PROTOCOL
ASCII	AMERICAN STANDARD CODE FOR INFORMATION INTERCHANGE
SIG	SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA
QGIS	QUANTUM GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM

# 1. Introdução

O posicionamento por satélite é, desde a entrada em funcionamento do sistema GPS, uma técnica fundamental para a Topografia e Geodesia e, duma forma geral, para todo o tipo de aquisição de informação geoespacial. O posicionamento de precisão, diferencial, é mais exigente, requerendo que exista uma continuidade de receção de sinais, sem interrupção. Para as situações em que, devido a obstáculos, o posicionamento de precisão é mais difícil, os recetores GNSS podem ser integrados com sistemas de navegação inercial que permitem complementar o posicionamento nessas situações. Além disso os sistemas integrados GNSS/INS fornecem também informação dos ângulos de orientação de câmaras, sendo assim também muito importantes na Fotogrametria.

Desde há algumas décadas que existem sistemas integrados desse tipo, mas com custos normalmente muito elevados e restritos a mercados profissionais muito específicos. Contudo, recentemente, devido à necessidade deste tipo de técnica também para drones, têm surgido no mercado sistemas miniaturizados, com custos muito mais acessíveis. Muitos deles vêm já incorporados nos equipamentos, por exemplo, em drones com sistemas de LiDAR, prontos a funcionar. Noutros casos, há a necessidade de serem associados a outros sensores e exigirem ainda algum desenvolvimento. Podem ser utilizados para muitos fins, como por exemplo, para o posicionamento de precisão em ambiente urbano, ou locais densamente arborizados, onde o posicionamento cinemático em tempo real (RTK) ou em pós-processamento (PPK) é difícil. É, por isso, importante estudar esse tipo de situações.

## 1.1. Objetivo

A presente dissertação de mestrado tem como objetivo analisar a performance de um sistema integrado GNSS/INS que está disponível no Observatório Astronómico da Universidade do Porto, em concreto, o sistema OXTS xNAV 650. O estudo envolverá a comparação com recetores, também de pequena dimensão, concretamente um recetor Septentrio MOSAIC-X5. Pretende-se certificar a precisão e qualidade, especialmente em ambientes desfavoráveis.

## 1.2. Caracterização

O tema escolhido para a realização desta dissertação de mestrado visa aprofundar o conhecimento na área dos Sistemas de Navegação Inercial, explorando as diversas aplicações e o funcionamento intrínseco. É fundamental destacar que um sistema acoplado GNSS/INS possibilita a compreensão de conceitos essenciais relacionados com a precisão do posicionamento em ambientes desfavoráveis, tais como: presença de vegetação densa, edifícios muito altos ou túneis.

A investigação desenvolvida ao longo desta dissertação centrou-se na execução de vários percursos experimentais, culminando num estudo que procura compreender os comportamentos predominantes destes sistemas de navegação. Inicialmente, foi realizada a montagem de um sistema GNSS no automóvel da FCUP, seguida pela realização de um percurso que incluiu diversos pontos com visibilidade reduzida de satélites, levando à degradação do posicionamento RTK. Na fase seguinte, utilizando o software QGIS, foi possível analisar a quantidade de pontos coordenados obtidos ao longo de todo o percurso, bem como o estado de cada um deles.

Posteriormente, iniciou-se a montagem do sistema integrado GNSS/INS, com o objetivo de repetir o mesmo percurso sob as mesmas condições, permitindo assim a observação e análise comparativa do comportamento de cada sistema. Esta abordagem metódica visa não apenas validar os resultados obtidos, mas também contribuir para um entendimento mais abrangente das dinâmicas envolvidas na navegação inercial e na interação com o GNSS.

## 1.3. Estrutura da dissertação

A presente dissertação está estruturada de forma a proporcionar uma compreensão clara e sistemática do tema abordado, organizando-se em quatro capítulos principais, complementados por subsecções e pelas referências bibliográficas.

O primeiro capítulo, "Introdução", tem como objetivo a contextualização da dissertação, apresentando o tema de estudo e os objetivos. Para além disso, aborda a caracterização do problema e a relevância do trabalho.

O segundo capítulo, "Revisão do Estado da Arte e Metodologias Utilizadas", visa apresentar uma análise crítica do conhecimento existente na área, com ênfase nas tecnologias e sistemas relevantes para a investigação. Este capítulo inicia-se com uma explicação dos GNSS, abordando os princípios fundamentais e as diversas aplicações. Segue-se uma análise das tecnologias específicas, como o RTK (Real Time Kinematic) e os sistemas GNSS integrados com Sistemas de Navegação Inercial (INS), incluindo modelos como o SEPTENTRIO MOSAIC-X5 e o OXTS xNAV 650. Aborda também as ferramentas utilizadas, como o software QGIS (Quantum Geographic Information System), fundamental na análise dos dados.

O terceiro capítulo, "Metodologias e Resultados", descreve detalhadamente os métodos e procedimentos adotados, incluindo os sistemas GNSS, a combinação entre GNSS e INS, e a análise comparativa entre os diferentes sistemas utilizados. São apresentados os resultados obtidos de forma clara e estruturada, com o objetivo de evidenciar os principais dados da investigação. A explicação sobre as metodologias permite compreender o processo que levou à obtenção dos dados e à análise realizada, enquanto os resultados são apresentados com base nas ferramentas e técnicas descritas na revisão do estado da arte.

Por fim, o quarto capítulo, "Discussão e Conclusão", apresenta uma análise crítica dos resultados obtidos, comparando as diferentes tecnologias e discutindo as implicações para a área de estudo. A conclusão sintetiza as principais conclusões do trabalho.

## 2. Revisão do estado da arte e metodologias utilizados neste trabalho

No panorama da crescente evolução dos sistemas de navegação, esta dissertação de mestrado propõe-se a aprofundar, comparar e analisar dois sistemas de navegação: Sistema Global de Navegação por Satélite - “SEPTENTRIO MOSAIC-X5” e o Sistema Global de Navegação por Satélite integrado com Sistema de Navegação Inercial - “OXTS Inertial + GNSS – modelo xNAV 650”.





A relevância deste trabalho reside para a contribuição científica, podendo ser uma solução viável para a navegação de alta precisão mesmo perante ambientes desfavoráveis. A presente introdução visa a orientação do trabalho, proporcionando uma visão geral do contexto.

### 2.1. Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS)

Um Sistema Global de Navegação por Satélite é constituído por uma constelação de satélites com cobertura global, os quais transmitem informações de posição e tempo para utilizadores em terra, mar ou ar.

Cada constelação de satélites está distribuída de forma a garantir a disponibilização do serviço em todo o globo, existindo ainda sistemas de reforço, tanto globais como regionais, com o objetivo de melhorar a performance dos GNSS para a navegação. Estes sistemas providenciam serviços de posicionamento, tempo e navegação (Positioning, Navigation and Timing, PNT) em escala global. Para garantir a navegação, é necessário que sinais sincronizados no tempo sejam transmitidos por, pelo menos, quatro satélites com posições conhecidas, sendo também imprescindível o uso de, no mínimo, duas frequências, de modo a permitir a correção das perturbações ionosféricas.

Tabela 1 Diferentes Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS) associados a cada sigla e região. US: América. RU: Rússia. EU: União Europeia. CN: China.

Global Positioning System	GPS		US
GLObal'nayaNAvigatsionnayaSputnikovaya Sistema	GLONASS		RU
Galileo Global Navigation Satellite System	Galileo		EU
Beidou-2/Compass Navigation Satellite System	CNSS		CN

Atualmente, existem quatro constelações GNSS globais em operação, nomeadamente o GPS (Global Positioning System), o GLONASS, o Galileo e o BeiDou. Cada uma destas constelações utiliza o seu próprio sistema de referência geodésico. O GPS utiliza o sistema de referência WGS84 (World Geodetic System 1984), o qual foi desenvolvido para fornecer um sistema global consistente de coordenadas geográficas, sendo amplamente utilizado em todo o mundo, especialmente para aplicações de navegação. O GLONASS, por sua vez, adota o sistema de referência PZ-90 (Parametry Zemli 1990), que, embora semelhante ao WGS84, possui pequenas diferenças em termos do modelo elipsoidal e da posição do centro de massa da Terra. Essas discrepâncias resultam em ligeiras variações nas coordenadas geográficas quando comparadas com as definidas pelo WGS84. O Galileo, desenvolvido pela União Europeia, utiliza o sistema de referência GTRF (Galileo Terrestrial Reference Frame), que, embora também baseado no sistema ITRF (International Terrestrial Reference Frame), foi ajustado para garantir uma maior precisão no contexto europeu (Altamimi et al., 2011). Por fim, o BeiDou, o sistema de navegação por satélite da China, emprega o sistema CGCS2000 (China Geodetic Coordinate System 2000), que, tal como o Galileo, também se baseia no ITRF, mas com adaptações específicas à China, resultando em pequenas variações em relação ao WGS84.

As diferenças entre estes sistemas de referência estão principalmente relacionadas com a definição da origem do sistema e o modelo elipsoidal utilizado para representar a forma da Terra. Cada sistema tem a sua própria origem geodésica, o que significa que as coordenadas de um ponto na Terra podem variar ligeiramente consoante o sistema de referência adotado. Essas diferenças podem ser da ordem de centímetros a

decímetros, o que, embora pequeno em muitas aplicações, pode ser significativo em contextos que exigem elevada precisão, como em levantamentos geodésicos, por exemplo. Para a maioria das aplicações de navegação quotidiana, no entanto, as diferenças entre os sistemas são de pouca relevância, dado que os dispositivos GNSS frequentemente combinam os sinais de várias constelações, resultando em um sistema de coordenadas globalmente compatível.

A utilização de múltiplas constelações GNSS exige, por vezes, a transformação de coordenadas de um sistema de referência para outro. Embora as diferenças entre os sistemas de referência sejam pequenas é fundamental realizar a transformação de coordenadas. Existem algoritmos matemáticos específicos para converter coordenadas entre esses sistemas, permitindo alinhar os dados provenientes de diferentes constelações e garantindo a consistência dos resultados. A constante evolução das tecnologias e a colaboração internacional no desenvolvimento de novos sistemas de referência, como o ITRF, têm contribuído para reduzir essas discrepâncias e melhorar a precisão global dos sistemas GNSS.

### 2.3. Princípio de funcionamento de um GNSS

Os sistemas de navegação por satélite (GNSS) funcionam com base na medição de distâncias entre os recetores e os satélites, utilizando sinais transmitidos continuamente por estes. Cada satélite emite sinais contendo informações precisas sobre o tempo da transmissão e a sua posição. A partir dessas informações, os recetores calculam a sua posição por meio do princípio da trilateração. Para uma determinação precisa da posição, o recetor necessita de sinais de, pelo menos, quatro satélites, para determinar 4 incógnitas, que são a posição e o atraso do relógio do recetor. A precisão do posicionamento depende de diversos fatores, como a geometria da constelação dos satélites, as condições ambientais, o tipo de recetor e a qualidade da antena utilizada. Os recetores GNSS de dupla frequência são frequentemente utilizados, pois permitem a correção de erros provocados pela ionosfera, o que resulta numa maior precisão do sistema. Estes recetores de pequena dimensão e baixo custo têm sido amplamente utilizados em diversas aplicações, como o posicionamento de sensores de precisão transportados por drones. Estes dispositivos têm se mostrado particularmente eficazes em áreas como a monitorização ambiental e a agricultura de precisão, onde a

capacidade de realizar medições de alta precisão em tempo real é crucial. Exemplos de aplicações deste tipo podem ser encontrados em estudos como os de Fernández Álvarez et al. (2021), Famiglietti et al. (2021) e Pintér e Nagy (2022).

Além do posicionamento absoluto, também existe o posicionamento relativo, que se baseia na medição da fase das ondas dos sinais recebidos pelos recetores. Este método oferece uma precisão superior, pois a medição da fase da onda permite uma resolução mais detalhada da posição. No entanto, a utilização da fase da onda exige a resolução de ambiguidades, um processo que é realizado através de estações de referência fixas que enviam correções em tempo real para os recetores móveis. Esta técnica é particularmente útil em aplicações que requerem elevada precisão, como na topografia, no levantamento geodésico ou em veículos autónomos.

Os satélites dos sistemas GNSS são equipados com relógios atómicos de altíssima precisão, garantindo a estabilidade temporal necessária para o cálculo exato da posição. Esses relógios permitem que os recetores determinem o momento exato da transmissão do sinal e a posição do satélite (efemérides) (Lázaro, 2021), informações essenciais para a precisão das medições de distância e, conseqüentemente, para a localização do recetor.

## 2.5. RTK (Real Time Kinematic)

O posicionamento cinemático é uma técnica fundamental para determinar a posição de um recetor em movimento, utilizando dados provenientes de satélites e de uma estação base fixa. No método RTK (Real-Time Kinematic), a posição do recetor é corrigida em tempo real por uma estação de referência, que transmite correções de fase dos sinais dos satélites para o recetor móvel. Este processo, realizado via comunicação sem fio, permite que o recetor móvel ajuste a sua posição com uma precisão centimétrica em tempo real. A comunicação contínua entre a estação base e o recetor móvel assegura que as medições de fase sejam constantemente corrigidas, permitindo um cálculo de posição extremamente precisa, mesmo durante o movimento. O RTK é amplamente utilizado em diversas áreas, como a topografia e a navegação de veículos autónomos, pois oferece resultados imediatos e permite a localização precisa de objetos em movimento.

Podem ser usados recetores de uma ou duas frequências, o tipo de informação transmitida (medidas de fase, diferenças de fase, etc.) depende da capacidade do sistema de transmissão e do método de processamento adotado. Após a inicialização, a posição do recetor móvel pode ser obtida em poucos segundos e permite obter precisão centimétrica (Lázaro, 2021).

Por outro lado, o PPK (Post-Processed Kinematic) é uma técnica similar, mas que se baseia no processamento dos dados após a recolha. Neste caso, as medições de fase e os dados de posição são recolhidos durante o movimento, mas o processamento é feito posteriormente, num ambiente de pós-processamento. O PPK oferece a mesma precisão centimétrica que o RTK, mas sem a necessidade de comunicação em tempo real entre a estação base e o recetor móvel. O PPK é particularmente útil em contextos onde a transmissão em tempo real não é possível ou quando a análise em tempo real não é essencial. Uma das vantagens do PPK é que pode ser utilizado em áreas com baixa cobertura de comunicação, uma vez que as correções podem ser aplicadas após a recolha dos dados.

Ambos os métodos têm vantagens distintas, com o RTK sendo preferido quando a precisão em tempo real é essencial, enquanto o PPK é ideal quando a comunicação em tempo real não é necessária e o processamento posterior dos dados é viável. Como resultado do processamento RTK as posições obtidas podem ser classificadas como "Fix", "Float" e "Single", como se descreve na tabela 2.

Tabela 2 - Descrição dos tipos de posições obtidas no posicionamento RTK.

<b>Posição</b>	<b>Descrição</b>
Fix	Indica que o sistema RTK determinou uma posição com precisão previamente definida
Float	Indica que o sistema RTK determinou uma posição com precisão menor que a definida, mas aceitável em casos menos rigorosos. RTK "Fix" e RTK "Float" são os resultados do algoritmo RTK, que determina a posição exata usando dados GNSS e dados RTK.
Single	Os fatores decisivos para o posicionamento RTK são o número de satélites visíveis. Indica que o sistema RTK apenas tem o sinal GNSS normal disponível atualmente - sem qualquer correção.

## 2.6. Sistema Global de Navegação por Satélite - “SEPTENTRIO MOSAIC-X5”

O sistema GNSS "Septentrio Mosaic-X5" foi adotado para a aquisição de dados devido às diversas vantagens técnicas e operacionais que apresenta, nomeadamente.

- Compacto em tamanho, mas de elevado desempenho;
- Acompanhamento de satélites em linha de vista: multiconstelação, multifrequência;
- Precisão de posicionamento fiável;
- Preparado para o futuro: compatível com sinais de satélite atuais e futuros;
- Sistema exclusivo de mitigação e monitorização de interferências AIM+, integrado nos algoritmos avançados GNSS+;
- Taxa de atualização de, até 100 Hz, isto é, 100 posições por segundo;
- Baixo consumo de energia, altamente eficiente para operações contínuas
- Fácil de integrar, otimizado para montagem automatizada

O mosaic-X integra a tecnologia AIM+ da Septentrio, considerada a mais avançada tecnologia de mitigação de interferências incorporada no mercado. Esta tecnologia é capaz de suprimir uma ampla variedade de interferências, desde sinais de banda estreita contínuos simples até aos bloqueadores de banda larga e pulsados mais complexos. O espectro de radiofrequência (RF) pode ser visualizado em tempo real, tanto no domínio do tempo como no da frequência.

Este sistema oferece posicionamento RTK com o menor consumo de energia em comparação com qualquer outro dispositivo semelhante disponível no mercado, segundo a empresa.

## 2.7. Sistema de Navegação Inercial (INS)

O sistema de navegação inercial foi desenvolvido para determinar a posição de um objeto de forma autónoma e independente sem receber ou enviar sinais. São sistemas de navegação capazes de determinar a posição relativamente a um sistema/ponto de referência ou a coordenadas absolutas. O conceito de um INS é a medição de mudanças no movimento (através da medição da aceleração linear e angular), para projetar uma mudança de posição num referencial inercial ao longo do tempo.

Um INS é composto por três giroscópios (sensores que permitem obter as direções (orientação) em que os acelerómetros estão a fazer medidas de aceleração) e três acelerómetros (sensores que medem a aceleração linear, permitindo calcular a variação de velocidade e posição através de sucessivas integrações matemáticas ao longo do tempo), que medem a velocidade angular e aceleração linear, respetivamente. O processamento dos sinais destes sensores combinados resulta na possibilidade de determinar a posição e a orientação. Os acelerómetros e os giroscópios são vulgarmente designados por sensores inerciais e constituem a base de uma Inertial Measuring Unit (IMU) que mede o movimento segundo seis graus de liberdade: três movimentos de translação e três movimentos de rotação.

Os sistemas de navegação inercial permitem fornecer uma solução precisa apenas por um curto período de tempo. Como a aceleração é integrada duas vezes para obter a posição, qualquer erro na medição da aceleração também será integrado e causa um deslocamento na velocidade estimada e um desvio contínuo na estimativa da posição.

### 2.7.1. Vantagens e desvantagens: INS

O Sistema de Navegação Inercial (INS) oferece várias vantagens significativas, particularmente em cenários dinâmicos. Uma das suas principais características é a capacidade de determinar, de forma imediata e contínua, a posição e a velocidade do objeto em movimento. Esta capacidade torna-se especialmente útil em situações em que é necessário monitorizar o movimento em tempo real, como no caso de veículos ou aeronaves, cujas condições de navegação exigem atualizações constantes. Além disso, os sistemas INS operam de maneira totalmente autónoma e independente, uma vez que

se baseiam em medições internas de aceleração linear e angular, sem depender de sinais externos que possam estar sujeitos a interferências. Esta autonomia confere ao sistema uma flexibilidade considerável, permitindo-lhe operar em qualquer tipo de região, incluindo as zonas polares, e independentemente das condições meteorológicas. Adicionalmente, o sistema dispensa a necessidade de estações terrestres de apoio, tornando-se uma solução eficaz em áreas remotas ou de difícil acesso. Para além disso, o sistema INS fornece não apenas informações sobre a posição e a velocidade, mas também sobre a atitude em relação a um referencial terrestre, o que o torna adequado para uma vasta gama de aplicações que exigem um acompanhamento detalhado do movimento.

Apesar das suas vantagens, o uso dos sistemas INS também envolve algumas desvantagens. A principal limitação está relacionada com a degradação da precisão da posição e da velocidade ao longo do tempo, um fenómeno conhecido como deriva posicional. Esta degradação impede o uso prolongado do sistema sem a necessidade de correções externas. Para mitigar essa limitação, torna-se essencial integrar o sistema INS com outras tecnologias, como os sistemas GNSS, que fornecem correções periódicas para manter a precisão do posicionamento. Outra desvantagem é o elevado custo associado aos equipamentos de alto desempenho, necessários para garantir medições de maior precisão. Além disso, os sistemas INS exigem um alinhamento inicial sempre que são ativados, o que implica um tempo adicional de configuração. Finalmente, a precisão do sistema pode ser afetada pela dinâmica do veículo, uma vez que manobras bruscas ou movimentos rápidos podem comprometer a estabilidade e a fiabilidade das medições de aceleração e rotação.

## 2.8. Sistema integrado GNSS/INS

O sistema integrado GNSS/INS aproveita as medidas de cada um destes dois sistemas individuais podendo assim ser combinadas usando técnicas avançadas para formar um sistema de navegação preciso e fiável, uma vez que, o Sistema Global de Navegação por Satélite e o Sistema de Navegação Inercial têm propriedades complementares.

Este sistema combinado é capaz de fornecer posição, velocidade e atitude com maior precisão e com melhor desempenho dinâmico do que um sistema GNSS ou INS individualmente.

### 2.8.1. Vantagens da interação de um sistema integrado GNSS/INS

A integração de um sistemas GNSS e um INS oferece diversas vantagens significativas. O segundo é autónomo e independente de fontes externas, o que lhe confere uma flexibilidade considerável em comparação com o sistema GNSS, que depende da visibilidade dos satélites. Enquanto que o GNSS fornece dados precisos, mas apenas quando há boa visibilidade, os sistemas INS não são afetados por obstruções, como edifícios ou condições meteorológicas adversas. Deste modo, a combinação dos pontos fortes de ambos os sistemas resultam num desempenho superior, pois o sistema integrado pode operar de forma contínua e precisa, independentemente das condições externas. A integração do GNSS com o INS é amplamente aplicada em diversas áreas, como navegação aérea, marítima e terrestre, proporcionando maior precisão, fiabilidade e continuidade na navegação. Para além disso, enquanto os sistemas inerciais tendem a sofrer desvios posicionais ao longo do tempo devido à acumulação de erro no processo de integração dos acelerómetros, o GNSS permite corrigir esses erros, assegurando a manutenção da precisão da posição ao longo de períodos mais prolongados. Assim, a combinação de ambos os sistemas proporciona redundância, o que contribui para um desempenho de navegação mais robusto e uma maior fiabilidade do sistema como um todo.

No entanto, a integração dos sistemas GNSS e INS também apresenta algumas desvantagens. A principal limitação está relacionada com o erro posicional no INS, o qual se propaga e acumula ao longo do tempo devido à imprecisão dos sensores inerciais. Este erro acumulativo ocorre porque cada medição instantânea do INS depende das medições anteriores, sendo que qualquer imprecisão nas primeiras medições afeta as subseqüentes. Embora o GNSS corrija periodicamente esse erro, a precisão do sistema INS pode degradar-se caso a integração com o GNSS não seja eficiente ou ocorra uma falha na comunicação entre ambos os sistemas.

### 2.8.2. Aplicações

- Levantamento topográfico e deteção remota: em aplicações de levantamento aéreo, terrestre ou marítimo, a integração GNSS/INS é fundamental para obter

a posição precisa de sensores que obtêm imagens. A combinação dos dados dos GNSS e INS permite a georreferenciação precisa dos dados recolhidos, por exemplo com sensores de varrimento laser ou câmaras, resultando em modelos tridimensionais rigorosos, sem pontos de apoio no terreno.

- Navegação aérea: a integração GNSS/INS desempenha um papel crucial na navegação aérea. É utilizada em aviões, fornecendo informações de posição e orientação para planeamento da rota e aterragem. Esta combinação melhora a precisão e a integridade da navegação em todas as fases do voo.
- Posicionamento geodésico e topográfico: na área da geodesia e topografia, a integração GNSS/INS é utilizada para posicionamento de precisão. Esta combinação permite que os levantamentos sejam realizados com elevada precisão, mesmo em áreas onde a receção dos sinais GNSS pode ser obstruída, como áreas urbanas com estruturas muito altas ou florestas densas.
- Navegação e posicionamento marítimo ou fluvial: a integração GNSS/INS é utilizada na navegação marítima, incluindo embarcações comerciais, navios de guerra e embarcações de investigação. Fornece informações precisas de posicionamento e orientação para auxiliar na navegação e execução de tarefas específicas, como mapeamento do fundo marinho e recolha de dados oceanográficos. Os INS são também amplamente utilizados em aplicações com veículos subaquáticos.

## 2.9. OXTS Inertial + GNSS – modelo xNAV 650



Figura 1 - OXTS Inertial + GNSS – modelo xNAV 650.

Na figura 1, o modelo xNAV650 é um sistema de navegação inercial (INS) compacto (77 x 63 x 24 mm e 130 g), ideal para aplicações com limitações de espaço. Este GNSS/INS oferece precisão de posicionamento de 2 cm, suportando quatro constelações GNSS (GPS, GLONASS, BeiDou e Galileo), mesmo em ambientes desfavoráveis.

O sistema destaca-se pela sua configuração simples e *software* simples, incluindo a funcionalidade opcional de marcação temporal com Precision Time Protocol (PTP). A tecnologia de acoplamento estreito gx/ix da Oxts assegura medições precisas nas condições difíceis já descritas para a utilização do GNSS.

O software NAVsuite, Figura 2, oferece ferramentas para configuração, monitorização e pós-processamento de dados adquiridos com o xNAV 650. O NAVsuite inclui produtos para facilitar a análise e exportação dos dados de navegação, tais como as que se apresentam na Figura 2:

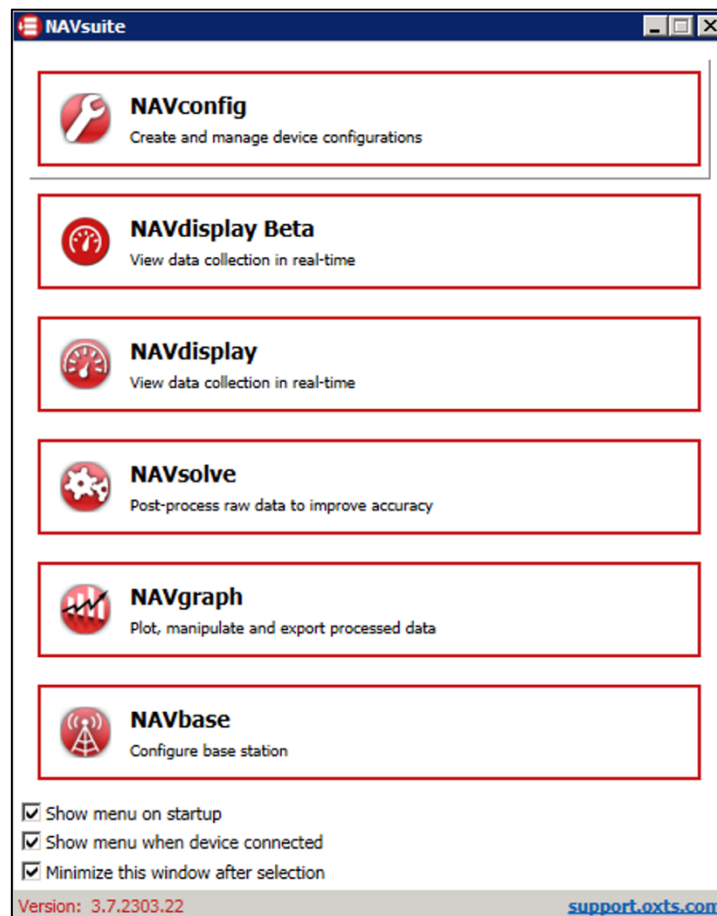


Figura 2 - Menu NAVsuite.

O “NAVconfig”, segundo o Manual xNAV650, apresenta um processo estruturado em dez etapas, permitindo ao utilizador configurar os parâmetros essenciais para avançar para um pós-processamento com os cuidados necessários de modo a obter-se a melhor precisão. O utilizador tem a possibilidade de retroceder a etapas anteriores ou cancelar a configuração a qualquer momento, garantindo flexibilidade durante o processo. As medições são apresentadas em unidades métricas, embora sejam permitidas outras unidades durante a introdução de dados, as quais são automaticamente convertidas para o sistema métrico. O “NAVsolve” está destinado ao processamento e manipulação de dados de navegação inercial. Permite definir os ficheiros a serem processados, verificar informações sobre os produtos de navegação e aplicar correções diferenciais a partir de ficheiros de estação base nos formatos RTCMv3 ou RINEX. O NAVsolve utiliza algoritmos avançados para aumentar a precisão dos dados, tornando-se uma

ferramenta essencial para otimizar o pós-processamento e a análise de dados de navegação, tendo em consideração o manual “NAVsolveManual”. Por último, o “NAVgraph”, permite representar graficamente os resultados do processamento.

## 2.10. QGIS (Quantum Geographic Information System)

O Quantum Geographic Information System é um *software* livre e de código aberto para sistemas de informação geográfica (SIG). Este programa permite a visualização, edição e análise de dados geoespaciais. Disponibiliza uma vasta gama de ferramentas para a manipulação de dados vetoriais e raster, é compatível com diversos formatos de ficheiros e integra-se facilmente com bases de dados espaciais, como PostGIS e SpatiaLite. Entre várias funcionalidades, destacam-se a criação de mapas temáticos, a realização de análises espaciais, a geocodificação e a modelação de dados.

O QGIS é amplamente utilizado por profissionais de diversas áreas incluindo a geografia, o urbanismo, a engenharia e o meio ambiente, devido à flexibilidade e capacidade de personalização através de plugins.

## 3. Metodologias e Resultados

### 3.1. Sistema GNSS

#### 3.1.1. Aquisição de dados

Começou-se por fazer uma aquisição exclusiva de dados GNSS com recetores de precisão, mas sem sistema inercial. A intenção era usar o recetor Septentrio Mosaic X5, mas, como não estava ainda disponível no início do trabalho, utilizou-se um recetor Emlid Reach M2, que é semelhante ao Mosaic X5, tendo, contudo apenas duas frequências. Fez-se uso de uma antena magnética u-Blox, que foi a mesma usada em testes posteriores com o recetor Mosaic X5, pelo que os resultados deverão ser semelhantes aos que se obteriam com esse recetor

Posto isto, procedeu-se à instalação do Sistema Global de Navegação por Satélite no veículo. Colocou-se o “Emlid Reach M2” no para-brisa do automóvel - com a devida segurança, permanecendo conectado a uma fonte de alimentação por meio de uma bateria portátil e ao dispositivo móvel por intermédio da rede por ele gerada. Verificou-se que o sistema estava plenamente funcional e apto para a execução da operação planeada. Com base no conhecimento prévio adquirido sobre o funcionamento e recolha de dados do sistema GNSS com posicionamento RTK, procedeu-se à conexão do sistema por meio da aplicação fornecida pela marca (programa Emlid Flow) no dispositivo móvel. Essa abordagem possibilitou o acompanhamento em tempo real da recolha dos dados adquiridos e a observação do comportamento do sistema ao longo de todo o trajeto. Apesar deste aspeto não ser fundamental para o desenvolvimento da investigação, destaca-se como atributo positivo e significativo a possibilidade de seguir detalhadamente a performance deste equipamento em tempo real. Em situações desfavoráveis, como a presença de vegetação densa, viadutos, pontes ou túneis, a aplicação permite a visualização clara da perda de precisão no posicionamento.

Em segunda instância, foi realizado um trajeto curto com a duração aproximada de 30 minutos, abrangendo uma variedade de ambientes, tanto favoráveis quanto desfavoráveis. Este percurso possibilitou a avaliação da qualidade do sinal disponível para o posicionamento de alta precisão, com uma frequência de amostragem de 10 Hz, ou seja, a captação de 10 pontos por segundo.

A ligação entre o sistema e o telemóvel revela-se simples e rápida, proporciona uma visão abrangente e detalhada do desempenho do GNSS em diversas condições fornecendo informações pertinentes sobre o estado geral do posicionamento. É possível obter dados relevantes, como: a estimativa da posição pelo sistema RTK com alta ou baixa precisão (fix, float e single), o número de satélites visíveis – um parâmetro crucial para a precisão do posicionamento – e o tempo em que o sistema está a recolher informação, entre outros parâmetros. A interação entre o sistema e o telemóvel oferece uma visão abrangente e detalhada do desempenho do GNSS em diversas condições.

Desta forma, assegurou-se que o sistema permaneceu em funcionamento diante das adversidades encontradas, cumprindo, assim, o principal propósito desta dissertação: certificar a precisão e a qualidade em todas as condições.

### 3.1.2 Tratamento de dados

A análise, verificação e apresentação dos dados adquiridos ao longo do trajeto descrito no ponto anterior foram realizadas com o auxílio do *software* QGIS. O QGIS é um sistema de informação geográfica (SIG) completo e versátil, que possibilita a visualização, edição e análise de dados geoespaciais, incluindo dados vetoriais em formatos tradicionais e em formato ASCII. A escolha do QGIS resulta da capacidade de personalização interna através de *plugins*, o que facilita o tratamento de dados geográficos e a elaboração de relatórios, permitindo a apresentação de resultados de forma clara e concisa.

#### Importação dos dados no software QGIS

Os dados recolhidos durante o percurso apresentavam-se em ficheiro de texto, com separação de campos por vírgula (extensão CSV, “Comma Separated Values”). Procedeu-se à sua importação para o *software* QGIS, na forma de tabelas de pontos em ASCII. Posteriormente, com o objetivo de otimizar a visualização e interpretação dos dados, efetuou-se a alteração da simbologia, atribuindo-se cores distintas aos pontos de acordo com o seu estado de posicionamento: fix (verde), float (amarelo) ou single (vermelho). Os passos seguidos foram os seguintes:

Na interface do *software* QGIS, para adicionar uma camada de texto delimitado, deve-se começar por selecionar a opção "Camada" no menu principal. Em seguida, deve selecionar "Adicionar camada" e, no submenu que se abre, escolher a opção "Adicionar camada de texto delimitado...". Após adicionar a camada de texto delimitado (CSV), identifica-se quais os campos que contêm as coordenadas (latitude e longitude) e escolher o sistema de coordenadas (WGS84 - EPSG:4326), como se mostra na Figura 3.

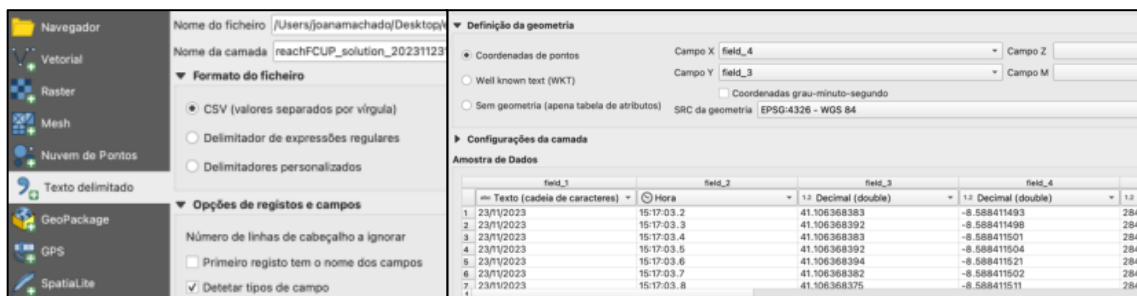


Figura 3 - Importação de dados no QGIS.

Para alterar a simbologia da camada no QGIS, deve-se aceder às "Propriedades da camada". Em seguida, no menu lateral, selecionar a opção "Simbologia" e escolher "Categorizado". No campo "Valor", deve-se indicar a variável que corresponde à "Posição". Depois, é necessário "Classificar" para agrupar os valores e atribuir a simbologia. Por fim, procede-se à "Edição da legenda de cada classe" e à definição da cor associada a cada classe, personalizando assim a representação visual dos dados como ilustrado na Figura 4.

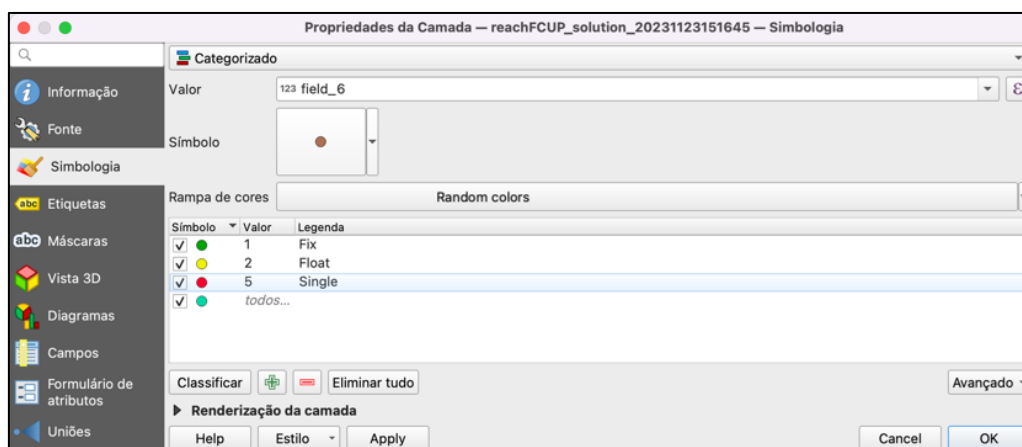


Figura 4 - Definição da simbologia da camada no QGIS.

Visualiza-se os dados acrescentando as “camadas externas” do Google Maps: mapa de base (Figura 5) e cobertura de imagem de satélite (Figura 6).

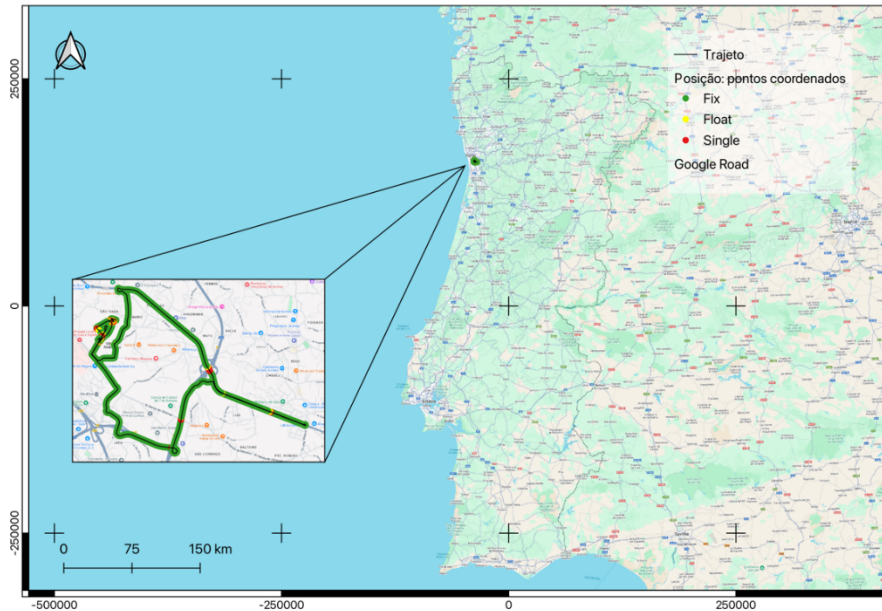


Figura 5 - Localização do trajeto efetuado.

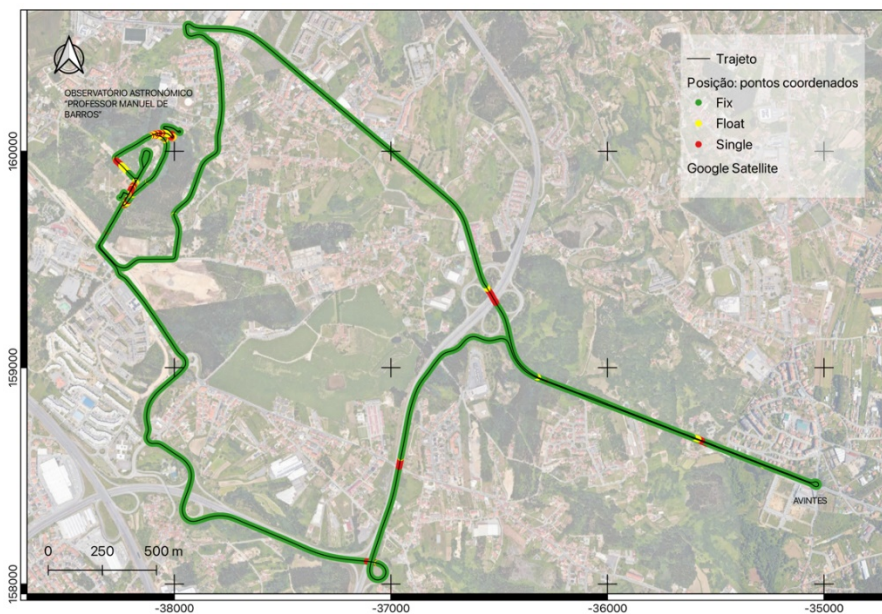


Figura 6 - Posição dos pontos coordenados: fix, float e single.

Como se pode observar na figura 6, nos trajetos em vias abertas consegue-se obter o parâmetro FIX com facilidade, mas como é que se deveria escrever: consegue-se fixar as ambiguidades com facilidade, especialmente quando se trata de autoestradas. Observa-se, sempre que se passa debaixo de viadutos, a passagem dos pontos a vermelho, devido a perda total do sinal (SINGLE), logo de seguida amarelo, com a passagem a solução FLOAT e rapidamente a passagem ao verde, com a solução FIX. É importante observar que estes testes usaram a estação base GAIA, pelo que é de esperar que o retomar da fixação das ambiguidades seja mais rápida do que se a estação estiver a grande distância.

Conforme seria de esperar, nas proximidades do Observatório Astronómico, devido ao facto de haver no trajeto muitas árvores, verificam-se mais obstruções dos sinais dos satélites GNSS e, por consequência, observa-se uma maior concentração de pontos com soluções dos tipos "float" e "single".

## 3.2. Sistema GNSS/INS e Sistema GNSS

### 3.2.1. Aquisição de dados

Os dados adquiridos nesta fase permitirão comparar a performance entre o sistema GNSS individual e o sistema integrado GNSS/INS, com maior veracidade, uma vez que serão adquiridos em simultâneo e estarão sujeitos às mesmas condições. Este processo permitirá uma análise mais precisa e abrangente, constituindo-se como base para a conclusão de resultados significativos do trabalho.

Para a realização do trajeto destinado à avaliação da performance do sistema integrado GNSS/INS, foi necessário proceder previamente à montagem adequada do equipamento (Figura 7a). O recetor, que incorpora o sistema inercial foi montado sobre uma placa de madeira preparada para este efeito, na qual também estão os espaços para duas antenas. No presente trabalho foi utilizada apenas uma. Tentou-se que o centro da antena ficasse aproximadamente sobre o eixo desenhado sobre a placa. Foi medida a distância entre uma marca de referência no recetor, que é a origem do sistema de eixos do sistema inercial (Figura 7b).

Todo o sistema foi mantido numa viatura da Faculdade de Ciências para percorrer a zona envolvente do Observatório (Figura 8). Este processo foi pensado pelo colega André Pinhal, que colaborou na preparação e instalação do sistema. A montagem incluiu a utilização de duas antenas conectadas por cabos coaxiais, o recetor inercial, e uma fonte de alimentação, no caso, uma bateria de 12V. Salienta-se que a bateria foi exclusivamente destinada ao sistema GNSS/INS, evitando a partilha com outros dispositivos, de forma a mitigar eventuais flutuações de energia e tensão, assegurando, assim, um desempenho estável e fiável durante a recolha de dados. Esta precaução foi essencial para garantir a integridade dos resultados obtidos.

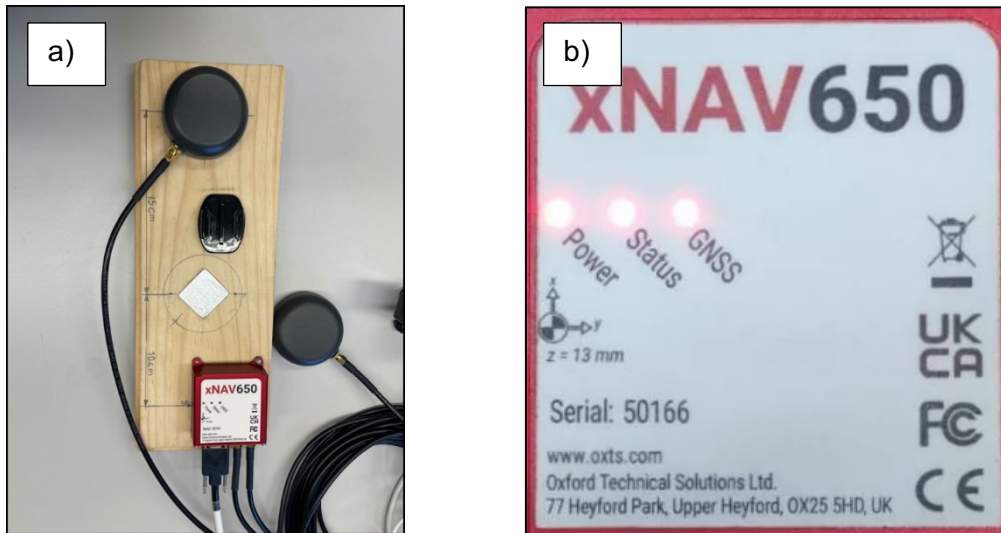


Figura 7 – Sistema inercial, antenas e cabo coaxial.



Figura 8 - Montagem do sistema GNSS/INS no automovel.

A configuração do sistema revelou-se igualmente crucial, com especial atenção ao endereço IP, uma vez que, de acordo com o manual, a terminação da rede é específica, terminando em 141. Utilizando a aplicação NAVconfig para computador portátil, foi possível configurar com precisão as posições da montagem, nomeadamente a localização e distância das antenas em relação ao recetor, garantindo a precisão dos

resultados. Nesta montagem, a primeira antena foi posicionada 10 cm à frente do sistema inercial, enquanto a segunda antena foi instalada 60 cm à frente da primeira antena. Em relação à orientação do IMU, o eixo Y foi orientado para a direita e o eixo X para a frente. Estas especificações asseguram que a antena principal, designada antena 1, se encontra devidamente alinhada com ambos os sistemas, enquanto a segunda antena serve o sistema GNSS, garantindo que os dados são adquiridos sob condições homogéneas.

Durante o percurso, a aplicação NAVdisplay (Figura9) permitiu monitorizar, em tempo real, o estado da conexão do sistema integrado GNSS/INS. Paralelamente, a aplicação SW Maps possibilitou a ligação ao recetor GNSS via Bluetooth, permitindo acompanhar o trajeto em tempo real e aceder a informações cruciais, como o estado do GNSS e o *skyplot*. Ambas as aplicações funcionam em tempo real, oferecendo um acompanhamento contínuo e detalhado.

No caso específico do OXTS Inertial + GNSS, modelo xNAV 650, os dados foram recolhidos sem correção RTK. Após muitas tentativas não se conseguiu efetivar a comunicação em tempo real da correção RTCM enviada pela ReNEP. Tornou-se assim necessário optar pelo pós-processamento para integrar as devidas correções e obter resultados precisos.

Por outro lado, através de um *splitter*, o sinal recebido pela antena foi partilhado com o recetor Mosaic-X5, com o qual foi possível ter correção RTK, utilizando a ligação à rede RENE, estação GAIA. De qualquer forma, o ficheiro Rinex recolhido por este recetor foi também tratado em pós-processamento. A combinação destas ferramentas e configurações assegurou a integridade e qualidade dos dados obtidos ao longo do trajeto.



Figura 9 - Visualização da performance do sistema GNSS/INS através do NAVdisplay.

### 3.2.2 Tratamento de dados GNSS

Primeiramente, os dados adquiridos através do sistema GNSS - SEPTENTRIO MOSAIC-X5 foram submetidos a um processo de pós-processamento, através do *software* “RTK Lib” e com correções provenientes da rede RENE, especificamente da estação GAIA.

Posteriormente, os dados corrigidos foram importados para o *software* QGIS, de forma a proceder à visualização e análise dos mesmos. Este processo revelou-se essencial para uma compreensão mais detalhada do comportamento do sistema ao longo do percurso, facilitando a identificação de possíveis discrepâncias ou limitações de sinal. A análise detalhada destes dados permitiu, numa fase subsequente, uma comparação precisa com os dados adquiridos simultaneamente pelo sistema integrado GNSS/INS, possibilitando, assim, uma avaliação aprofundada do desempenho de ambos os sistemas sob as mesmas condições.

De forma análoga ao tratamento dos dados GNSS provenientes do recetor Emlid Reach M2, os mesmos procedimentos foram seguidos para a importação e visualização dos dados do recetor SEPTENTRIO MOSAIC-X5. Este processo permitiu a visualização detalhada do percurso realizado, através da utilização de um mapa de base (Figura 10) e da sobreposição da cobertura de imagem de satélite (Figura 11).

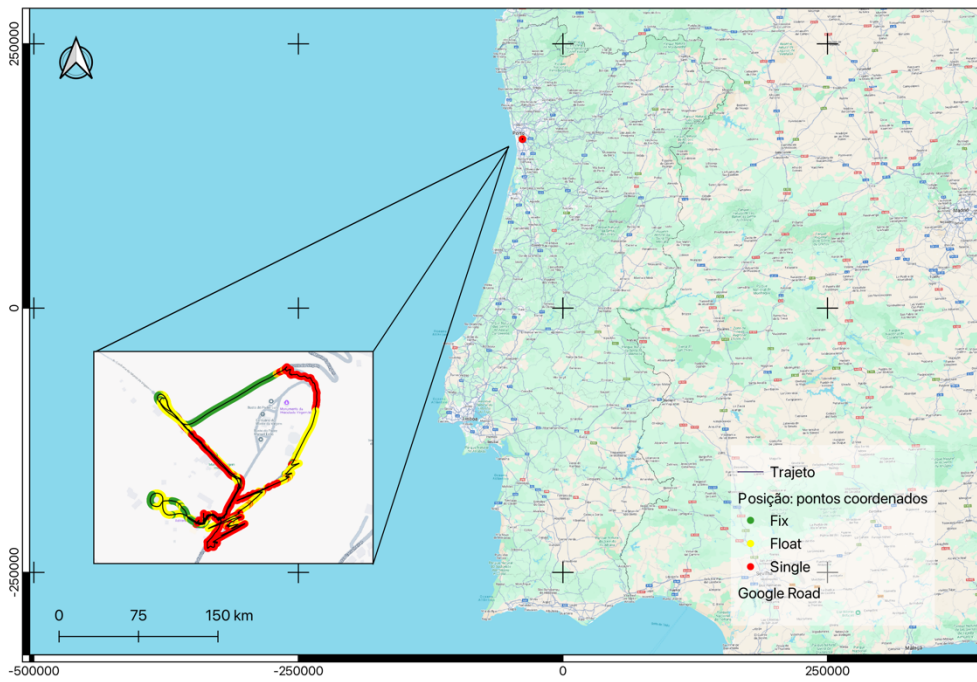


Figura 10 - Localização do trajeto efetuado: GNSS.

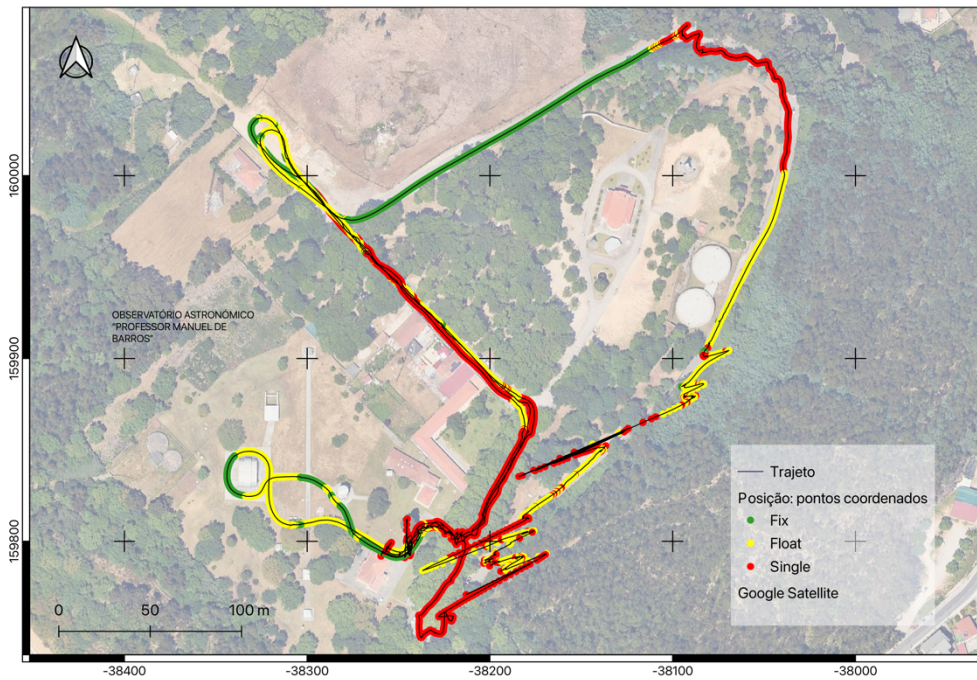


Figura 11 - Posição dos pontos coordenados GNSS: fix, float e single.

### 3.2.3 Tratamento de dados Sistema integrado GNSS/INS

Para a avaliação da performance do sistema integrado GNSS/INS, foi realizado o pós-processamento dos dados adquiridos. Este procedimento foi executado com o auxílio da aplicação “NAVsuite Application”, permitindo o tratamento rigoroso dos dados recolhidos.

Inicialmente, procedeu-se à configuração dos parâmetros da aquisição de forma a obter o centro de referência do sistema, assegurando que os dados pós-processados apresentassem a máxima precisão possível. Neste contexto, definiu-se a posição da antena, conforme descrito no ponto 3.2.1, garantindo uma correta posição espacial.

O processo de pós-processamento requer a obtenção das correções GNSS correspondentes ao dia e hora específicos da aquisição dos dados. Para tal, utilizou-se o software “FileZilla” (Figura 12), que permite uma conexão rápida e eficiente ao servidor através das seguintes credenciais:

- Servidor: ftp.dgterritorio.pt
- Porta: 21

As correções necessárias para a análise foram extraídas dos ficheiros da rede Renep, estação GAIA, correspondentes ao dia 10 de junho de 2024, no intervalo horário entre as 12h e as 18h, com uma frequência de 1Hz. Esta resolução temporal garantiu a adequação das correções aos dados adquiridos durante o levantamento de dados.

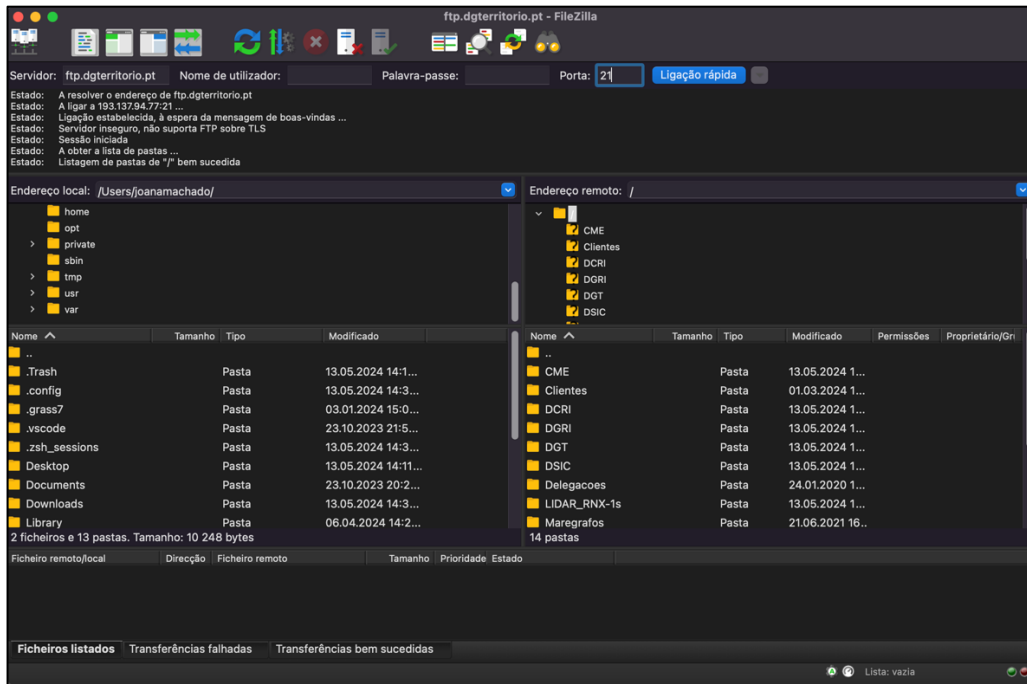


Figura 12 - FileZilla: dados Renep.

Para obter as correções disponibilizadas pela rede Smarnet, reconhecida pela vantagem de fornecer dados com correções em intervalos de um segundo, utilizou-se o acesso autorizado por meio de login pessoal. A partir desse acesso, extraiu-se as informações necessárias correspondentes ao mesmo intervalo temporal e horário previamente descrito.

Para obter as correções da rede SmartNet, especificamente da estação de Espinho, foi utilizado o acesso pessoal, através do qual se extraiu a informação necessária para o intervalo temporal e horário previamente mencionado. Tal como no caso anterior, rede Renep, este procedimento assegurou a sincronização entre os dados recolhidos em campo e as correções aplicadas, garantindo, desta forma, a precisão dos resultados pós-processados.

Com a obtenção destas correções, foi então possível proceder ao pós-processamento dos dados adquiridos durante a execução do trajeto, utilizando correções provenientes de duas estações de redes distintas. Esta abordagem conferiu maior credibilidade aos resultados obtidos.

Em segunda instancia, após a devida configuração no menu “NAVconfig”, deu-se início à execução do pós-processamento utilizando o “NAVsolve”.

1. Na etapa "Source" (Figura 13), selecionou-se a opção "Select raw data from a folder on your computer". Este procedimento abre uma pré-visualização dos conteúdos presentes na pasta escolhida, permitindo a seleção exclusiva dos ficheiros relevantes para o pós-processamento.

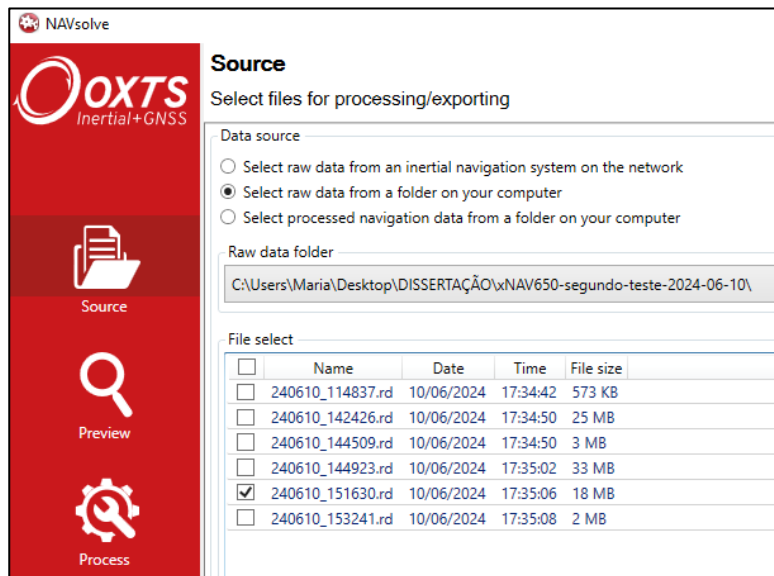


Figura 13 - NAVsuite Application: Source.

2. Na segunda etapa, é disponibilizada uma pré-visualização dos conteúdos selecionados e o modelo do recetor utilizado na primeira fase (Figura 14), a trajetória executada em dois mapas: Referências do Map (Figura 15) e Bing map (Figura 16).

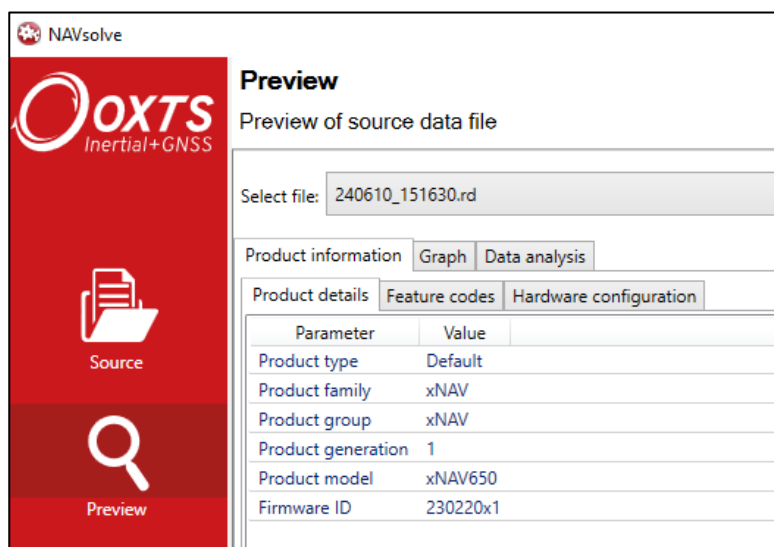


Figura 14 - NAVsuite Application: Preview, product information.

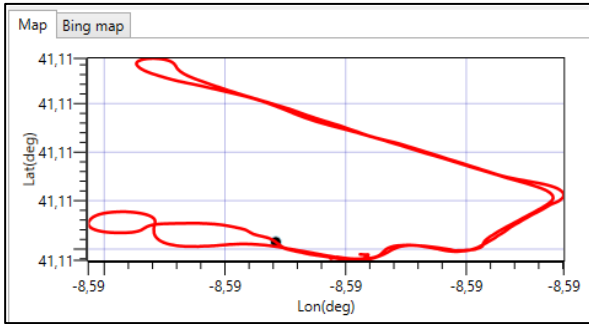


Figura 16 - Pré-visualização através do Map.

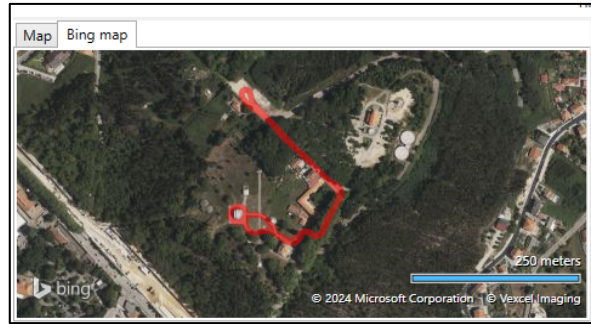


Figura 16 - Pré-visualização através do Bing Map.

3. Na terceira etapa, denominada "Process", seguiram-se os seguintes passos de forma sequencial. Primeiramente, foi selecionado o ficheiro adequado para o pós-processamento. Na secção "Base station" (Figura 17), foram escolhidos os ficheiros com as correções, realizando-se o processamento de forma separada para as duas estações. Na Figura 18, é possível observar o *Time Overlap* do ficheiro das correções selecionado, o que permite visualizar a sobreposição com os dados escolhidos na primeira etapa, garantindo que todos os dados estejam devidamente dentro do intervalo das correções. Por fim, executou-se o processamento final, concluindo assim esta fase do procedimento.

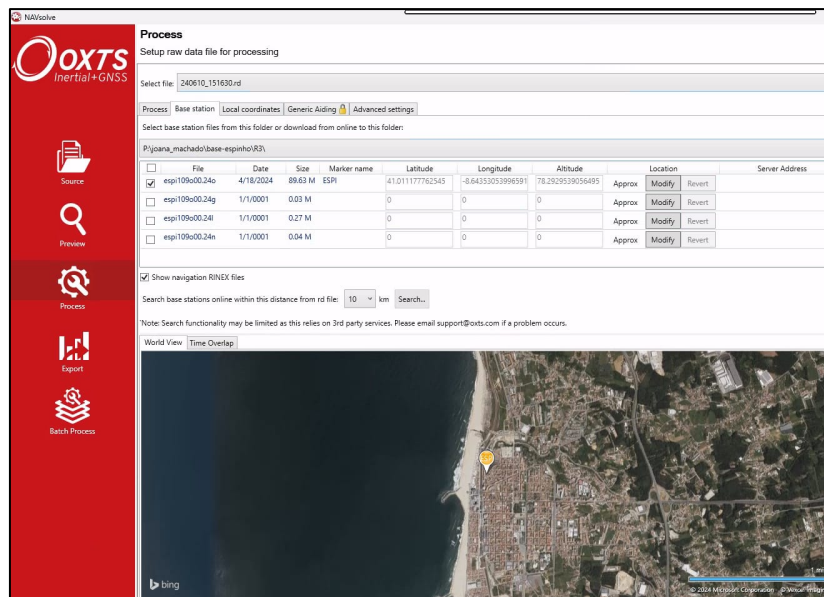


Figura 17 - NAVsuite Application: Process, estações de base e World View.

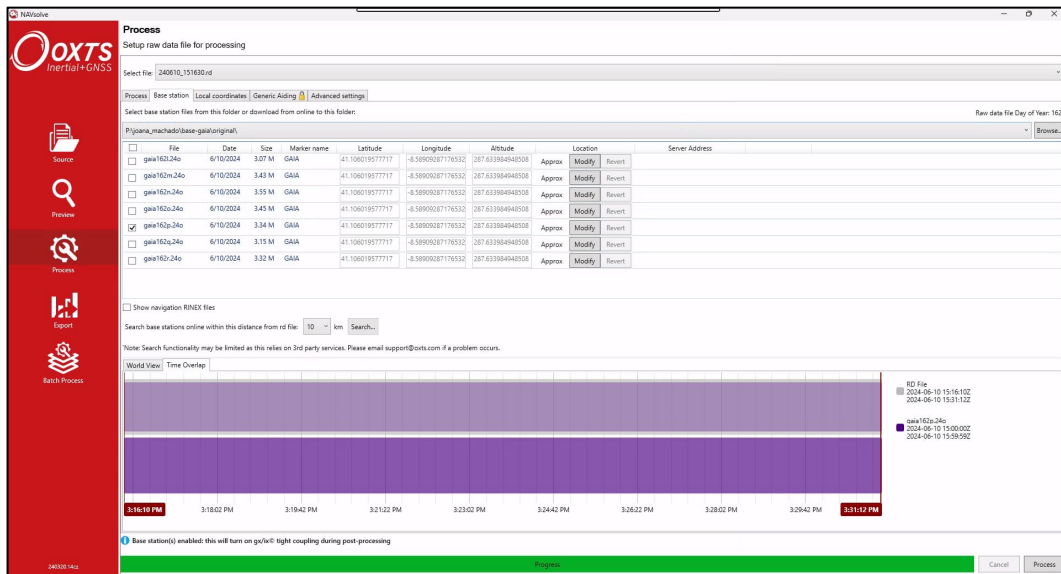


Figura 18 - NAVsuite Application: Process, Base station – Time Overlap.

4. Por último, procedeu-se à exportação do ficheiro resultante do processamento anteriormente realizado.

### Tratamento de dados no Softarwe QGIS

Tal como nos processos anteriores, relativos aos diferentes recetores GNSS, recorreu-se ao software QGIS para a visualização dos resultados, tanto dos dados brutos como dos dados obtidos após o pós-processamento realizado com a aplicação "NAVsuite Application".

A importação das camadas para o QGIS foi efetuada, correspondendo às correções provenientes da estação base de Espinho da rede SmartNet (Figura 19), da estação base de Gaia da rede Renep (Figura 20) e aos dados não corrigidos (Figura 21). Importa destacar que o procedimento de importação seguiu rigorosamente as mesmas etapas descritas no ponto 3.1.2.

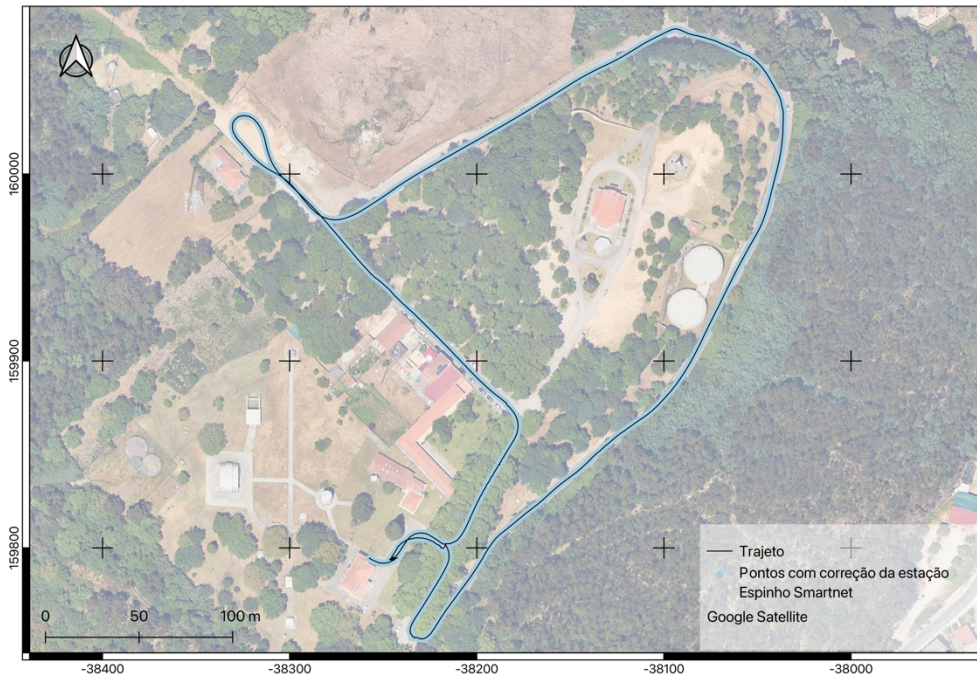


Figura 19 - Posição dos pontos coordenados com correções de base: Espinho (Smartnet).

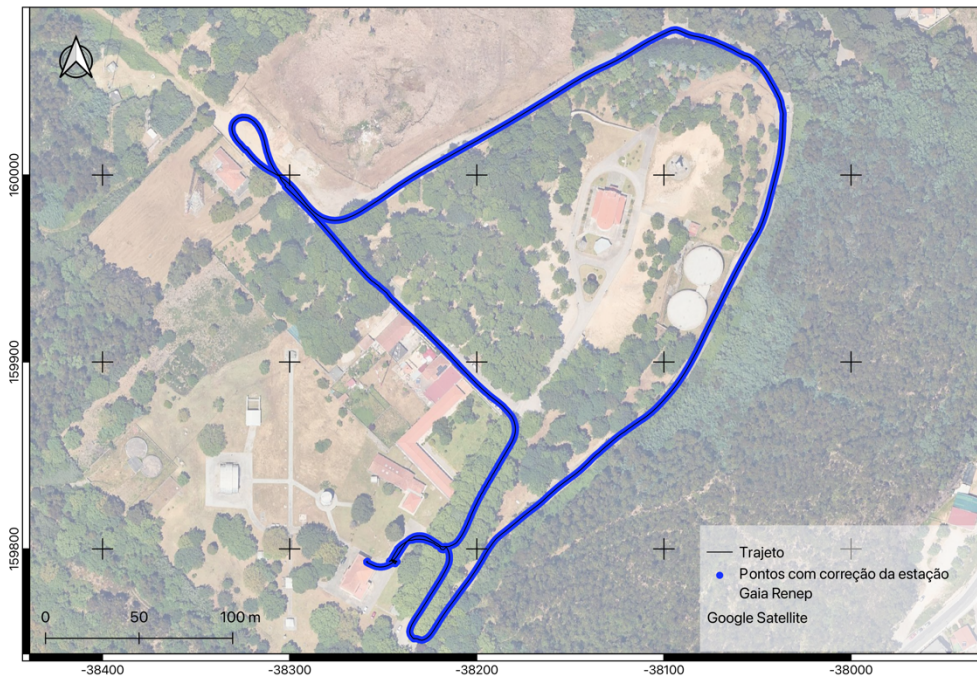


Figura 20 - Posição dos pontos coordenados com correções de base: Gaia (Renep).

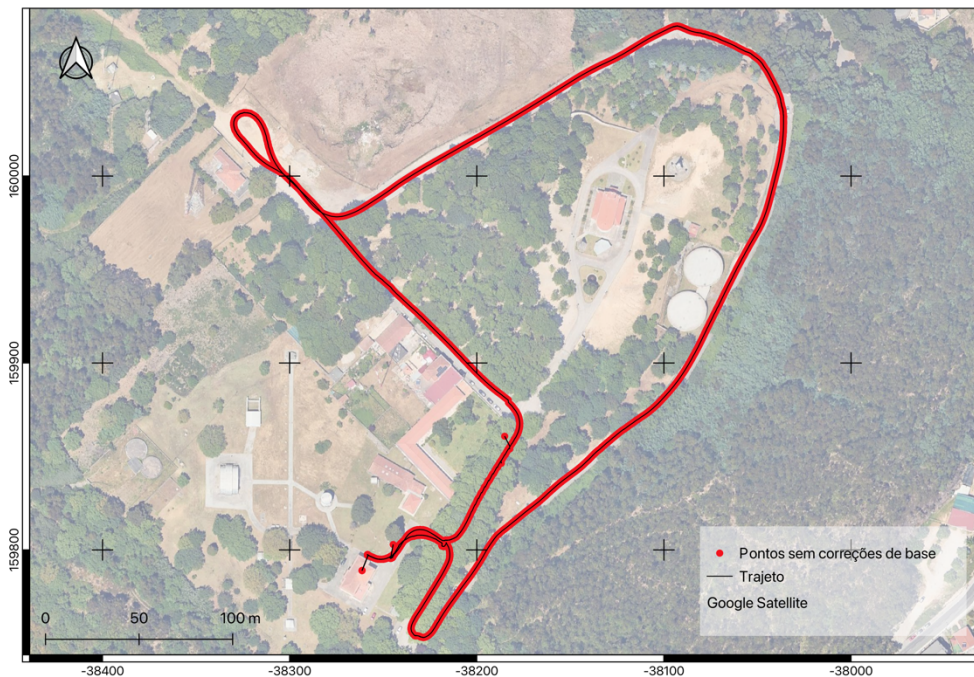


Figura 21 - Posição dos pontos coordenados sem correções de base.

## 4 Discussão

A presente investigação teve como principal objetivo compreender e avaliar a performance dos sistemas de posicionamento em ambientes urbanos, tanto GNSS como GNSS/INS, este objetivo foi integralmente cumprido. Os resultados obtidos estão de acordo com as expectativas iniciais, demonstrando que, em ambientes desfavoráveis, o sistema GNSS apresenta uma precisão de posicionamento inferior quando comparado ao sistema GNSS/INS sob as mesmas condições, conforme se poderá concluir na discussão que se segue.

### 4.1. Sistema GNSS

O sistema GNSS "Emlid Reach M2" destaca-se pela dimensão compacta e pela elevada precisão de posicionamento que oferece, sendo comparável, em termos de fiabilidade, a sistemas GNSS mais robustos e de maior custo.

A implementação inicial deste sistema teve como objetivo avaliar, com base nos resultados obtidos, os ambientes em que o sinal GNSS foi parcial ou totalmente perdido. Esta análise foi facilitada pelo uso do software QGIS, que possibilita uma interpretação mais clara e direta dos dados.

O percurso foi realizado na zona de Gaia, entre o Observatório Astronómico "Professor Manuel de Barros" e Avintes, com uma duração aproximada de 30 minutos. Como ilustrado na Figura 6, é possível observar que em determinadas secções do trajeto houve uma perda total do sinal, registando-se uma posição "single", ou seja, o sistema RTK operou com o sinal GNSS convencional disponível no momento, sem qualquer correção aplicada. Noutras áreas, verificou-se a presença de uma solução "float", indicando que o sistema RTK conseguiu determinar uma posição corrigida por pós-processamento ou por RTK, embora com uma precisão inferior à ideal, mas aceitável em situações onde os requisitos de rigor são menos exigentes.

Estes resultados derivam, por exemplo, da presença de vegetação densa, como é o caso inicial na zona do Observatório Astronómico "Professor Manuel de Barros", ou da existência de infraestruturas como pontes, que interferem com o sinal GNSS, conforme pode ser observado no percurso e ilustrado na Figura 22.

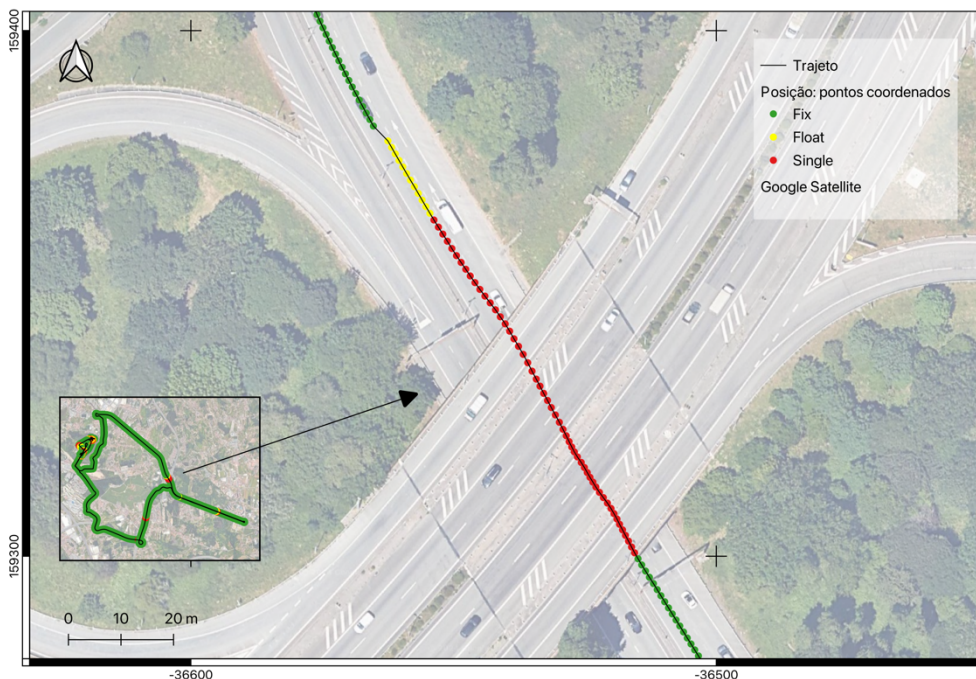


Figura 22 - Parte do percurso com posição single: GNSS.

Ao longo de todo o trajeto, após o pós-processamento dos dados, foi possível realizar uma análise estatística dos resultados, conforme ilustrado na Figura 23. Os resultados indicaram que, em grande parte do percurso, a visibilidade dos satélites foi boa, o que permitiu garantir que, em 83% do trajeto, a posição obtida foi rigorosa e precisa. No entanto, em 10% do percurso, a posição foi afetada por obstáculos, como vegetação ou infraestruturas, que reduziram a visibilidade dos satélites e, conseqüentemente, a qualidade do sinal. Por fim, em 7% do trajeto, ocorreu a perda total do sinal, o que comprometeu a precisão da posição, obtendo-se dados imprecisos. Na Tabela 3, estão enumerados a quantidade de pontos e a respetiva precisão da posição durante todo o trajeto.

Tabela 3 - Número de pontos e a respetiva precisão da posição obtida durante o trajeto executado com o sistema GNSS, com frequência de amostragem a 10 Hz, 30 minutos.

Posição	Nº de pontos
FIX	14631
FLOAT	1758
SINGLE	1146

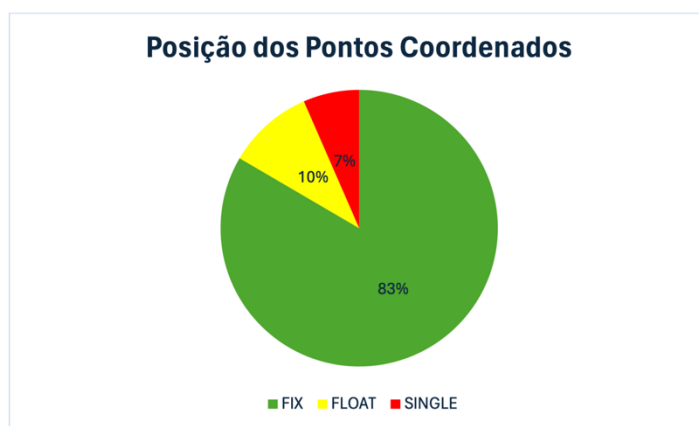


Figura 23 - Percentagem da posição dos pontos coordenados tendo em conta o número total de pontos obtidos.

## 4.2. Discussão do teste comparativo entre o sistema GNSS/INS e o sistema GNSS

Esta etapa revela-se fundamental para o entendimento e conclusão desta dissertação.

O sistema GNSS/INS foi implementado em simultâneo com o sistema GNSS independente, com o objetivo de proporcionar uma comparação mais rigorosa, resultando em conclusões mais realistas. Ao submeter ambos os sistemas às mesmas condições meteorológicas e ambientais, garante-se a veracidade dos resultados obtidos.

Importa destacar o cuidado e rigor com que os sistemas foram instalados no veículo, assegurando estabilidade e fiabilidade na recolha dos dados, o que contribui para a credibilidade dos resultados. Com estes cuidados, torna-se viável uma análise comparativa dos dados obtidos mais realista.

O percurso foi realizado na área do Observatório Astronómico "Professor Manuel de Barros" e nas proximidades, em Gaia, com uma duração aproximada de 35 minutos. O local de trajeto do sistema GNSS/INS é exatamente igual ao apresentado na Figura 10, dado que os dados foram adquiridos simultaneamente. Considerando a relevância deste trajeto para a conclusão da presente dissertação, este foi planeado de forma a garantir que, em grande parte do percurso, ocorresse obstrução do sinal, promovendo a perda intencional do mesmo, com o objetivo de analisar o comportamento do sistema de navegação por satélite e do sistema GNSS/INS em ambientes desfavoráveis.

Durante este percurso, o pós-processamento dos dados adquiridos com o sistema GNSS permitiu a visualização detalhada dos mesmos, identificando-se locais onde a perda de sinal foi evidente. Este processo possibilita a comparação direta com os dados obtidos através do sistema integrado GNSS/INS, verificando se estes são, de facto, mais precisos do que os apresentados pelo sistema GNSS individualmente. Para tal, no *software* QGIS, foram sobrepostas as camadas correspondentes a ambos os sistemas, GNSS e GNSS/INS, com as correções provenientes de diferentes estações base, permitindo uma análise rigorosa dos resultados. Ao comparar os resultados do sistema GNSS/INS utilizando correções de diferentes estações (Figura 24), obtêm-se resultados muito semelhantes, com diferenças de apenas alguns centímetros ao longo de todo o percurso. Esta disparidade mínima pode ser atribuída à proximidade do trajeto em relação à estação de Gaia, rede RENEP. Por sua vez, a Figura 25 ilustra o estado da

precisão da posição ao longo do percurso, evidenciando a variação da precisão conforme as condições do sinal e o tratamento dos dados.

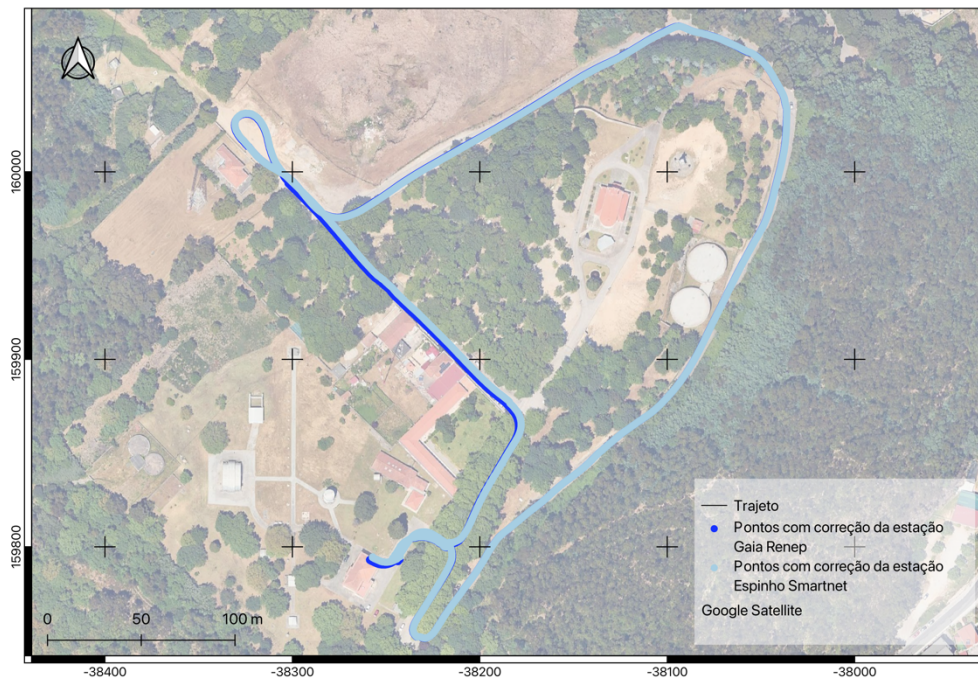


Figura 24 - Ilustração do trajeto com correções provenientes de estações diferentes, Sistema GNSS/INS.

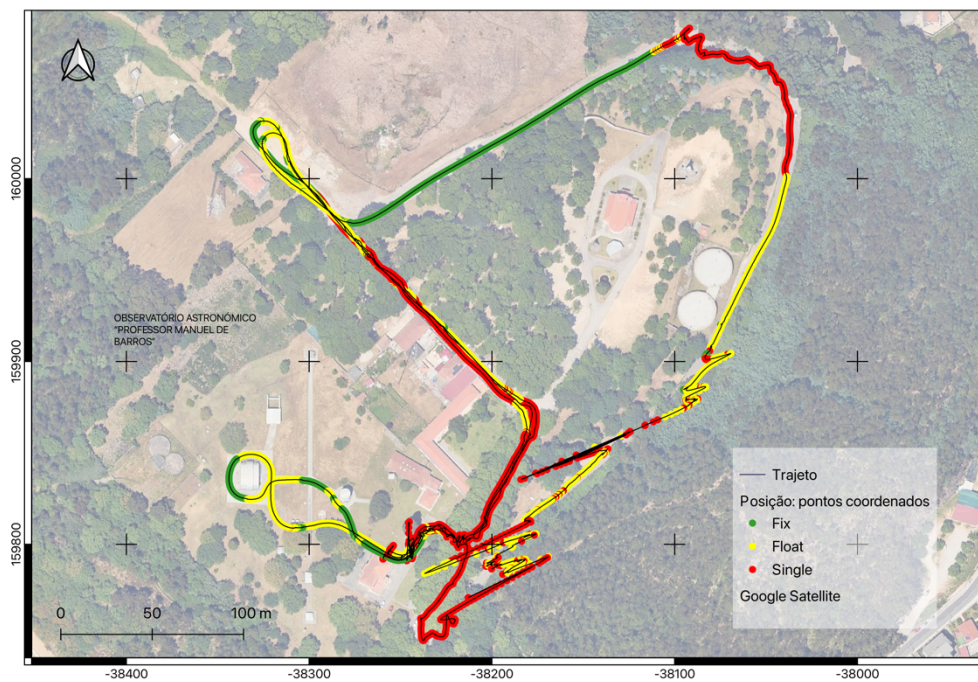


Figura 25 - Ilustração do trajeto: Sistema GNSS.

Na Figura 26, observa-se claramente a diferença no posicionamento. O sistema GNSS revela diversas irregularidades e descontinuidades ao longo de todo o trajeto, resultantes da perda parcial ou total do sinal, o que compromete significativamente a precisão do posicionamento. Em contraste, os resultados provenientes do sistema GNSS/INS apresentam menos falhas, mantendo um trajeto contínuo e uniformizado, evidenciando uma fiabilidade superior na aquisição dos dados.

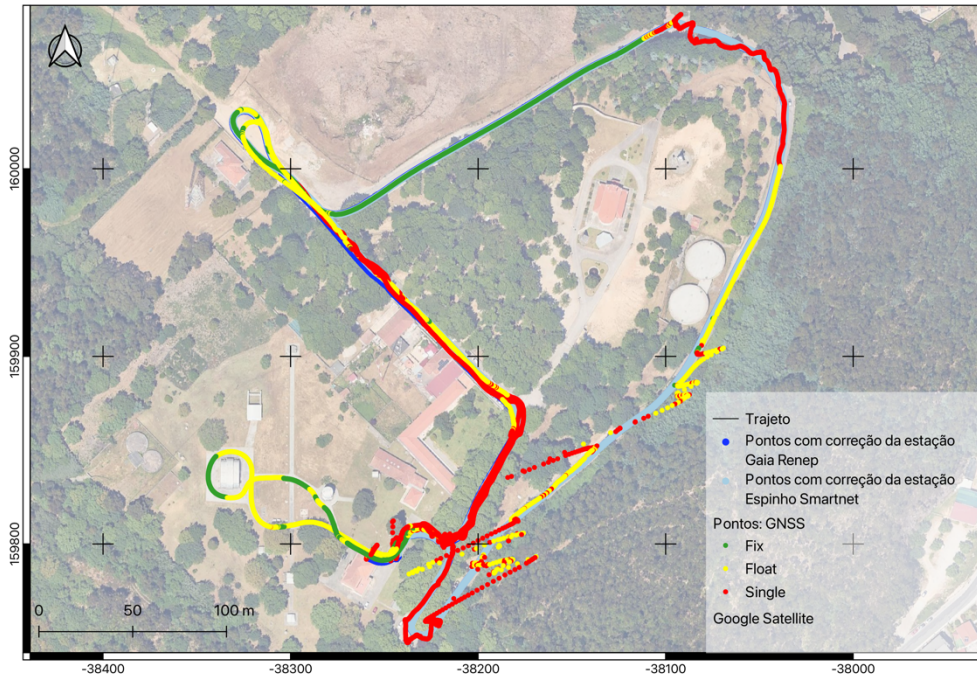


Figura 26 - Representação de resultados de ambos os sistemas.

Os resultados obtidos com o recetor GNSS SEPTENTRIO MOSAIC X5 (Figura 27), demonstraram que, ao contrário do percurso inicial realizado com o recetor Emlid Reach M2, em 58% do trajeto a visibilidade dos satélites foi afetada por vegetação ou infraestruturas, o que comprometeu a qualidade do sinal e, conseqüentemente, a precisão da posição. Apenas em 32% do percurso, a visibilidade dos satélites foi satisfatória, permitindo uma determinação da posição com precisão rigorosa e confiável. Em 10% do trajeto, não foi possível obter precisão na posição devido à perda total do sinal. A Tabela 4 apresenta, a quantidade de pontos recolhidos e a respetiva precisão da posição ao longo de todo o percurso, permitindo uma avaliação mais aprofundada da performance do sistema.

Tabela 4 - Número de pontos e a respetiva precisão da posição obtida durante o trajeto executado com o sistema SEPTENTRIO MOSAIC X5.

Posição	Nº de pontos
FIX	12197
FLOAT	22658
SINGLE	3939

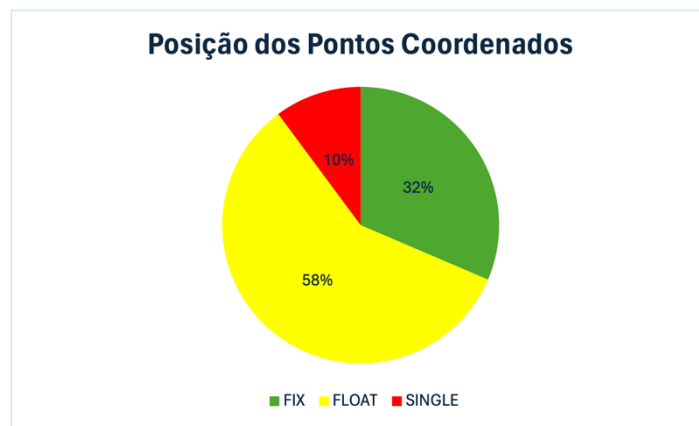


Figura 27 - Percentagem da posição dos pontos coordenados tendo em conta o número total de pontos obtidos.

Comparando os resultados obtidos por ambos os sistemas, verifica-se que, como era expectável, o sistema GNSS/INS apresenta uma maior precisão e exatidão em condições adversas. Em ambientes favoráveis, onde a visibilidade não se encontra obstruída, ambos os sistemas calculam uma posição com elevada precisão.

Os dados provenientes do sistema GNSS/INS, após o pós-processamento, mas sem a aplicação de qualquer correção de base, apresentam, como era previsível, descontinuidades ao longo do trajeto.

Para a interpretação dos resultados, foram analisadas partes específicas do percurso, onde se verificaram diferentes comportamentos de precisão no posicionamento. Estas situações incluíram zonas com falta de precisão (single), áreas onde o sinal foi apenas parcialmente perdido (float) e partes onde o sinal estava em conformidade com os requisitos para um posicionamento preciso (fix). Esta análise permitiu comparar os sistemas e avaliar a precisão do posicionamento, confirmando a esperada superioridade do sistema GNSS/INS em termos de precisão em ambientes desfavoráveis.

Na Figura 28, os pontos coordenados foram extraídos a partir do ficheiro NMEA, o qual contém exclusivamente códigos. Através destes dados, é possível observar o percurso

da trajetória, que se inicia na parte B e termina na parte F. De seguida, nas Figuras 29, 30, 31, 32 e 33 são apresentados vários exemplos de partes específicas do percurso em que o sistema GNSS/INS demonstra uma precisão de posicionamento superior em comparação com o sistema GNSS isolado.

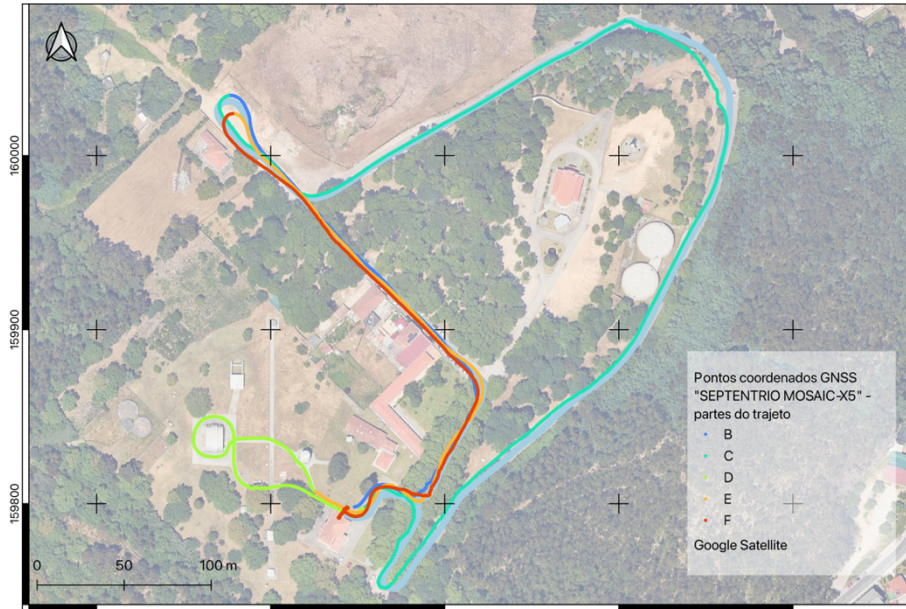


Figura 28 - Percurso realizado, descrito pelo ficheiro NMEA.

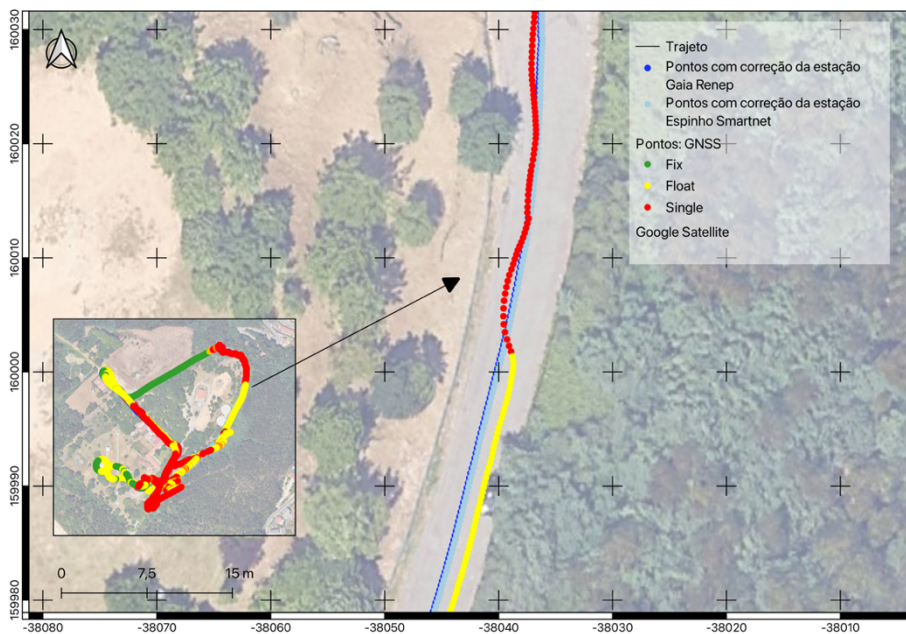


Figura 29 - Comparação entre os resultados de posicionamento do sistema GNSS e do sistema GNSS/INS: exemplo 1.

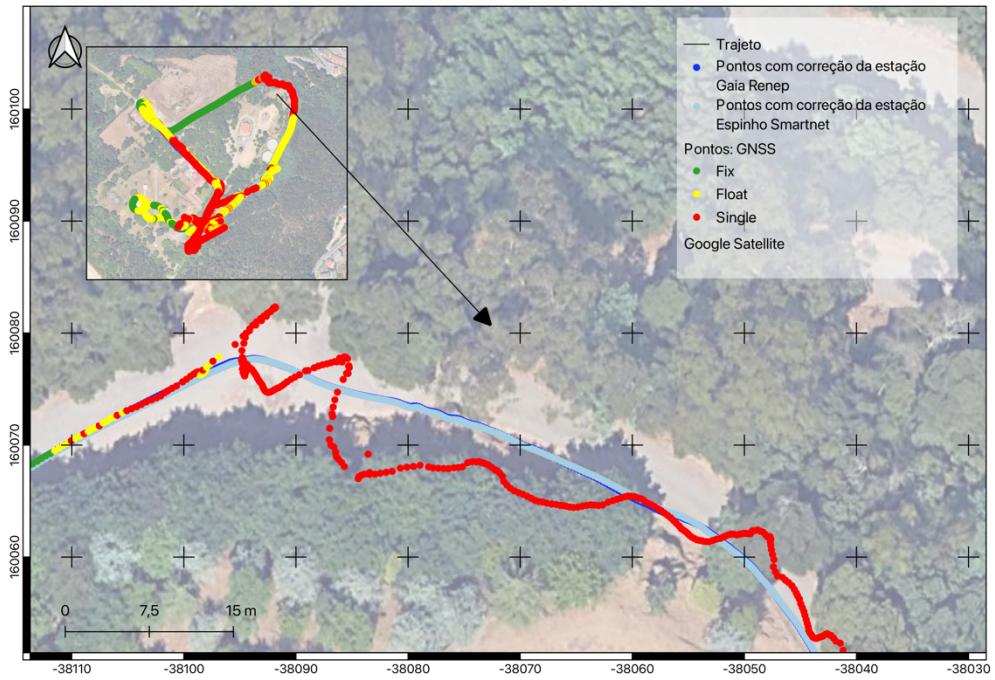


Figura 30 - Comparação entre os resultados de posicionamento do sistema GNSS e do sistema GNSS/INS: exemplo 2.

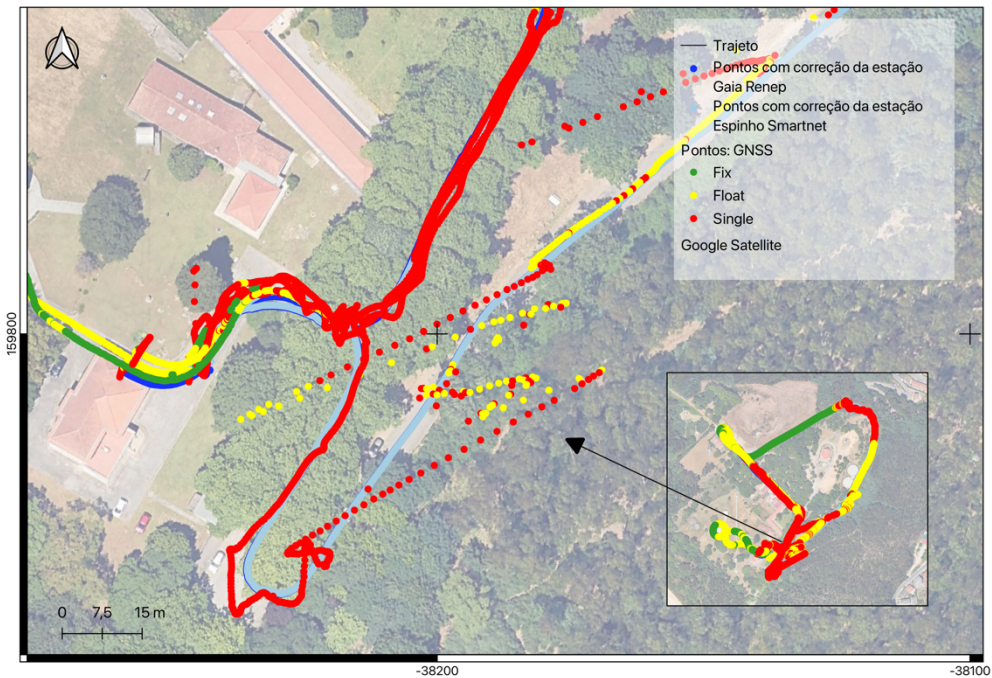


Figura 31 - Comparação entre os resultados de posicionamento do sistema GNSS e do sistema GNSS/INS: exemplo 3.

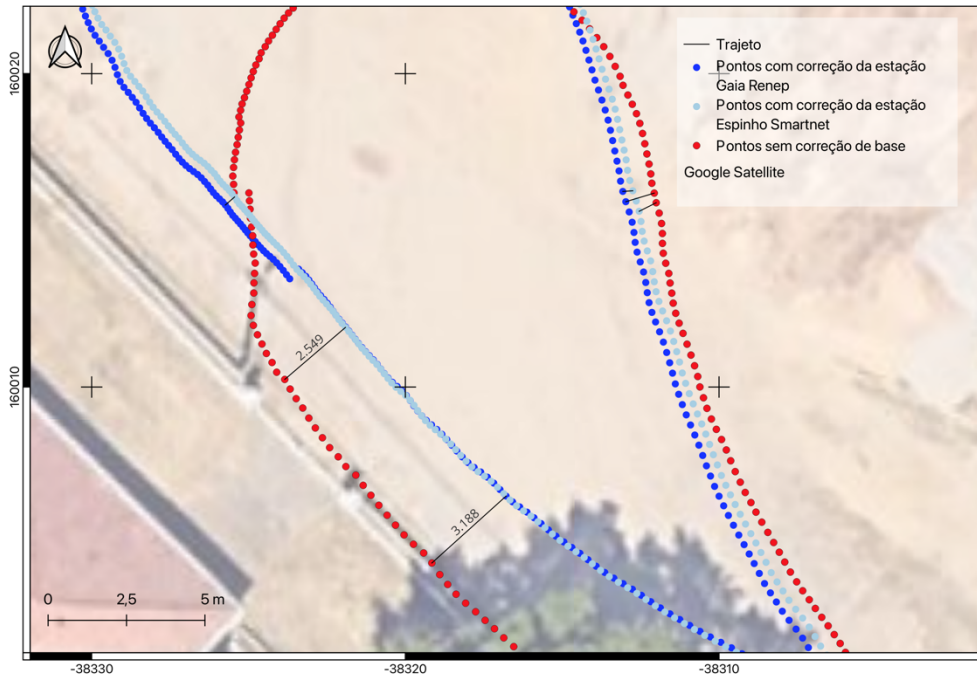


Figura 32 - Comparação entre os resultados de posicionamento do sistema GNSS e do sistema GNSS/INS: exemplo 4.

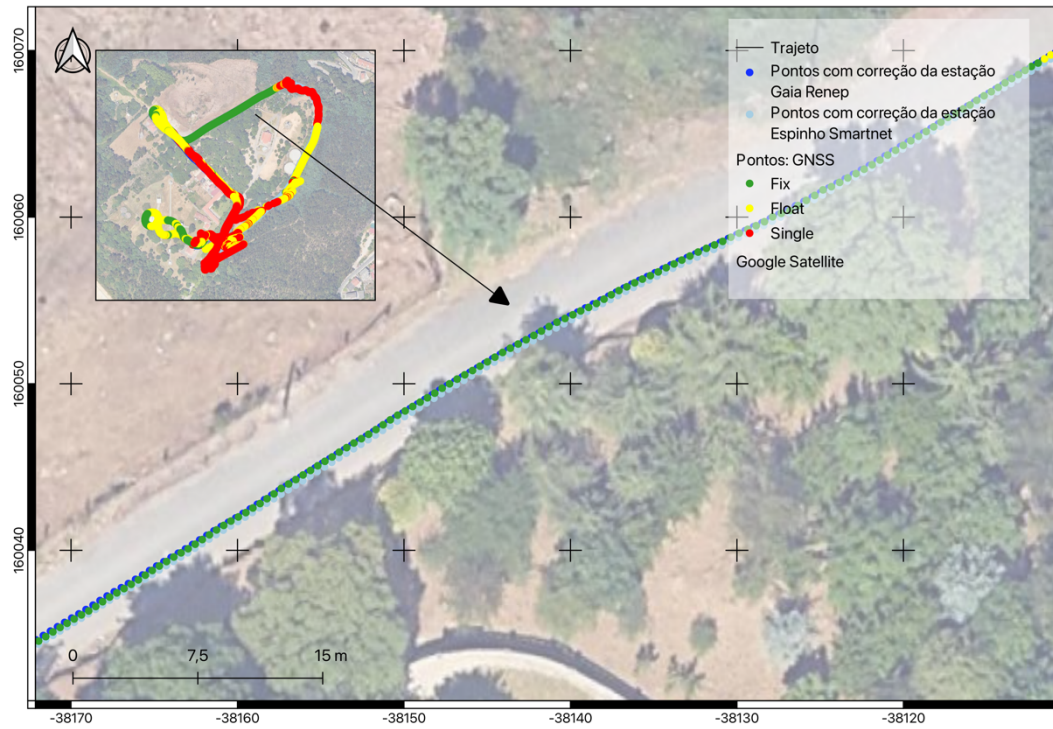


Figura 33 - Comparação entre os resultados de posicionamento do sistema GNSS e do sistema GNSS/INS: exemplo 5.

## 5. Conclusão e Estudos Futuros

A presente investigação permitiu aprofundar significativamente o conhecimento sobre os sistemas de posicionamento, nomeadamente sobre o sistema de navegação por satélite e o sistema inercial. Além disso, foi possível compreender de forma mais detalhada o funcionamento de ambos os sistemas quando expostos a condições adversas, como a presença de vegetação densa ou infraestruturas urbanas. A perda temporária e parcial do sinal observada nos percursos realizados possibilitou a avaliação do comportamento da precisão dos pontos nestas circunstâncias. Tal como previsto, o sistema GNSS/INS demonstrou uma precisão consideravelmente superior nas condições mencionadas. No entanto, em condições favoráveis, com boa visibilidade de satélites, ambos os sistemas apresentaram valores de precisão equivalentes.

A utilização de sistemas GNSS mais compactos revelou-se igualmente eficaz, não comprometendo a precisão do posicionamento e apresentando uma performance adequada. Esta conclusão provém da comparação dos resultados entre os sistemas GNSS/INS e GNSS, onde o primeiro revelou posições precisas e o segundo apresentou resultados semelhantes, mostrando a fiabilidade de ambos os sistemas quando há horizonte livre. No entanto, é desaconselhado o 2º sistema quando são necessárias precisões elevadas no posicionamento em zonas sem horizonte livre.

Embora o desempenho geral do sistema GNSS/INS tenha sido satisfatório, alguns aspetos críticos não permitiram explorar todo o seu potencial. A principal limitação foi a impossibilidade de realizar a recolha de dados em tempo real (RTK), o que obrigou à utilização de pós-processamento dos dados. Embora os resultados tenham sido satisfatórios, acredita-se que a utilização do sistema no seu modo pleno de operação (RTK) teria permitido alcançar uma precisão ainda mais elevada e contínua ao longo de todo o trajeto.

Por fim, pode-se concluir que a integração de sistemas GNSS/INS é uma solução promissora para melhorar a precisão e fiabilidade dos sistemas de navegação. No entanto, como foi evidenciado pelos resultados obtidos, existem factos a melhorar para futuras investigações entre os demais, explorar ainda melhor o potencial destes sistemas através da utilização de dados em tempo real e da otimização do pós-processamento, de forma a maximizar a sua aplicabilidade em diferentes contextos.



## Referências Bibliográficas

Bernardes, A., Medeiro, A., Ribeiro, H., & Vasconcelos, M. (2018) Infraestrutura Geodésica Nacional. Atas da IX Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia. Disponível on-line: [https://www.cncg.ordemengenheiros.pt/fotos/editor2/cncg\\_2019\\_1\\_2\\_1.pdf](https://www.cncg.ordemengenheiros.pt/fotos/editor2/cncg_2019_1_2_1.pdf)

Pintér, K., & Nagy, Z. (2022). Building a UAV Based System to Acquire High Spatial Resolution Thermal Imagery for Energy Balance Modelling. *Sensors*, 22(9), 3251.

Famiglietti, N. A., Cecere, G., Grasso, C., Memmolo, A., & Vicari, A. (2021). A test on the potential of a low cost unmanned aerial vehicle RTK/PPK solution for precision positioning. *Sensors*, 21(11), 3882.

Fernández Álvarez, H., Álvarez-Narciandi, G., García-Fernández, M., Laviada, J., Álvarez López, Y., & Las-Heras Andrés, F. (2021). A portable electromagnetic system based on mm-wave radars and GNSS-RTK solutions for 3d scanning of large material piles. *Sensors*, 21(3), 757.

Chiang, K., Trung Duong, T., & Liao, J. (2013). The Performance Analysis of a Real-Time Integrated INS/GPS Vehicle Navigation System with Abnormal GPS Measurement Elimination. *Sensors*, 13(8), 10599.

Lázaro, C. (2021). Notas da disciplina de Posicionamento por Satélite – Licenciatura em Eng. Geoespacial (FCUP).

Viera, T. (2023). Notas da disciplina de Sistemas Globais de Localização e Navegação por Satélite – Mestrado em Engenharia Geográfica (FCUP).

Septentrio. \*Mosaic-X5 GNSS receiver modules\*. Disponível on-line <https://www.septentrio.com/en/products/gnss-receivers/gnss-receiver-modules/mosaic-x5>

Manual OXTS – Manual NAVsolve.

Altamimi, Z., Collilieux, X., & Métivier, L. (2011). ITRF2008: an improved solution of the international terrestrial reference frame. *Journal of Geodesy*, 85(8), 457–473.