



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

HANNA BARRETO DE ARAÚJO FALCÃO MOREIRA

**POSICIONAMENTO GNSS NO MONITORAMENTO GEOTÉCNICO: Aplicações,
Vantagens, Limitações e Tendências**

Recife
2023

HANNA BARRETO DE ARAÚJO FALCÃO MOREIRA

**POSICIONAMENTO GNSS NO MONITORAMENTO GEOTÉCNICO: Aplicações,
Vantagens, Limitações e Tendências**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Quental Coutinho.

Recife

2023

Catálogo na fonte
Bibliotecário Gabriel Luz, CRB-4 / 2222

M383p Moreira, Hanna Barreto de Araújo Falcão.
 Posicionamento GNSS no monitoramento geotécnico: aplicações,
 vantagens, limitações e tendências / Hanna Barreto de Araújo Falcão
 Moreira. 2023.
 141 f: il.

 Orientador: Prof. Dr. Roberto Quental Coutinho.
 Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco.
 CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife, 2023.
 Inclui referências.

 1. Engenharia civil. 2. GNSS. 3. Monitoramento. 4. Geotecnia. 5.
 Taludes. 6. Subsistência. 7. Barragem. I. Coutinho, Roberto Quental
 (Orientador). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG / 2023 - 46

HANNA BARRETO DE ARAÚJO FALCÃO MOREIRA

**POSICIONAMENTO GNSS NO MONITORAMENTO GEOTÉCNICO: Aplicações,
Vantagens, Limitações e Tendências**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Geotecnia.

Aprovada em 24/02/2023.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Quental Coutinho – Universidade Federal de Pernambuco

BANCA EXAMINADORA

participação por videoconferência
Prof. Dr. Igor Fernandes Gomes (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência
Prof. Dr. Wendson de Oliveira Souza (Examinador Externo)
Universidade Federal do Piauí

participação por videoconferência
Prof. Dr. Saul Barbosa Guedes (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus pelo dom da vida e por sua infinita misericórdia durante estes anos, me dando força e sustento nos dias bons e ruins.

Aos meus pais, Jacileide e Edvaldo, e meu irmão, João Gabriel, por todo esforço e incentivo dedicados, para que eu pudesse concluir mais esta etapa de minha vida. Obrigada por estarem comigo e por serem compreensivos mesmo nos dias mais difíceis, e por vibrarem comigo em todas as minhas conquistas.

A meu esposo e companheiro, Alex, por todo seu carinho e apoio, especialmente nessa reta final, sempre me mostrando que eu sou capaz e acalmando minha inquietude nos dias ansiedade. Obrigada por estar sempre ao meu lado em todas as situações e ser sinônimo de felicidade em minha vida.

Aos amigos, em especial Jailson Alves, Júlia Pontes, Rosane Delfino e Wilson Ramos, por todo apoio, companheirismo e lealdade, provando o verdadeiro significado de amizade. Esta foi uma jornada de muitos aprendizados e amadurecimento, e a eles agradeço a alegria da convivência.

Aos colegas do GEGEP e da pós-graduação pela parceria durante os anos de mestrado, tornando a caminhada menos amarga e mais prazerosa.

Ao meu orientador, Professor Dr. Roberto Quental Coutinho, por toda orientação e apoio durante o curso, e por me proporcionar experiências multidisciplinares no GEGEP, sendo de grande valor pessoal e profissional para mim.

Aos professores Igor Fernandes, Wendson Souza e Saul Guedes, em aceitar participar da banca examinadora e pelas contribuições de melhoria ao trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, pela bolsa de mestrado.

A todos que integram o Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil da UFPE, em especial aos professores da área de Geotecnia pelos ensinamentos e à secretaria por toda atenção e suporte.

Por fim, a todos que contribuíram de forma direta ou indireta para a construção deste trabalho.

RESUMO

O posicionamento pelo Sistema Global de Navegação por Satélite, GNSS (*Global Navigation Satellite System*), possui recorrente uso na detecção de deslocamento superficial e estrutural. O objetivo do trabalho é analisar fundamentos e aplicações da tecnologia em áreas de monitoramento geotécnico, tais como: taludes, subsidência do solo e barragens. Para tal, a pesquisa foi desenvolvida por meio da verificação de publicações científicas recentes, entre 2018 e 2022, considerando um modelo híbrido com análise bibliométrica e análise sistemática. A primeira consistiu na análise quantitativa e qualitativa das publicações, que retratam a aplicação do GNSS para o monitoramento geotécnico, obtidas na base de dados da Scopus, no intervalo de 2018 a 2022. Esta etapa permitiu conhecer as instituições envolvidas, os países que têm apresentado participação na pesquisa, os periódicos com maior participação, entre outros fatores. A análise sistemática se baseou na discussão dessas aplicações, sendo possível destacar que o posicionamento GNSS permite determinar deslocamentos superficiais de forma autônoma, em tempo real e com elevada precisão. Além disso, esta tecnologia pode ser integrada a outras formas de instrumentação (pluviômetro, sismógrafo, estação total, InSAR etc.), podendo compor sistemas de controle e alerta de risco. A etapa de análise sistemática permitiu a discussão sobre alguns pontos referentes aos cuidados para o uso, vantagens, limitações e as tendências para melhoria da tecnologia GNSS. Sendo assim, o trabalho se mostrou como uma ferramenta elucidativa e complementar na construção do conhecimento acerca do GNSS, especialmente voltado para a engenharia geotecnia.

Palavras-chave: GNSS; monitoramento; geotecnia; taludes; subsidência; barragem.

ABSTRACT

The positioning by the Global Navigation Satellite System, GNSS, has recurrent use in detecting surface and structural displacement. The objective of this work is to analyze fundamentals and applications of technology in geotechnical monitoring areas, such as: slopes, soil subsidence and dams. To this end, the research was developed through the verification of scientific publications of the last five years, considering a hybrid model with bibliometric analysis and systematic analysis. The first consisted of the quantitative and qualitative analysis of the publications, which portray the application of GNSS for geotechnical monitoring, obtained from the Scopus database, from 2018 to 2022. This step allowed to know the institutions involved, the countries that have presented participation in the research, journals with greater participation, among other factors. The systematic analysis was based on the discussion of these applications, and it is possible to highlight that the GNSS positioning allows to determine surface displacements autonomously, in real time and with high precision. In addition, this technology can be integrated with other forms of instrumentation (rain gauge, seismograph, total station, InSAR etc.), being able to compose risk control and warning systems. The systematic analysis stage allowed the discussion of some points related to care for the use, advantages, limitations and trends for improvement of the GNSS technology. Thus, the work proved to be an elucidative and complementary tool in the construction of knowledge about GNSS, especially focused on geotechnical engineering.

Keywords: GNSS; monitoring; geotechnics; slopes; subsidence; dam.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição de satélites e planos orbitais do GPS	22
Figura 2 – Status da constelação GPS.....	24
Figura 3 – Posição das estações de controle do sistema GPS	25
Figura 4 – Constelação de satélites GLONASS	27
Figura 5 – Constelação do sistema Galileo	29
Figura 6 – Estações de controle Galileo.....	30
Figura 7 – Constelação do sistema BeiDou.	31
Figura 8 – Órbita IGSO da constelação QZSS.....	33
Figura 9 – Sistema de controle do QZSS	33
Figura 10 – Órbitas do IRNSS.....	34
Figura 11 – Determinação do tempo de viagem do sinal.	36
Figura 12 – Determinação do tempo de viagem do sinal.	37
Figura 13 – Ilustração da fase da onda portadora.....	37
Figura 14 - Simple diferença formada entre dois receptores.	39
Figura 15 - Dupla Diferença entre dois receptores.	40
Figura 16 – TEC em 26 de junho de 2000.	45
Figura 17 – Geometria do multicaminho, correspondente a interferência entre o sinal direto.....	46
Figura 18 – Componentes básicos do receptor GPS.	47
Figura 19 – (a) GPS de Navegação; (b) GPS topográfico; (c) GPS Geodésico.....	49
Figura 20 – Métodos clássicos de posicionamento GNSS.....	53
Figura 21 – Representação esquemática do posicionamento relativo.	54
Figura 22 – Representação do Princípio do Posicionamento DGNSS.....	56
Figura 23 – Fluxograma sistemático da pesquisa.	63
Figura 24 – Fluxograma sistemático da metodologia PRISMA empregada	64
Figura 25 – Evolução do número de publicações na base de dados Scopus no período de 2018 a 2022 sobre aplicação de GNSS em talude, conforme metodologia apresentada no Capítulo 4.....	74
Figura 26 – Análise das citações dos artigos sobre aplicação de GNSS em talude no período de 2018 a 2022 conforme metodologia apresentada no Capítulo 4: (a) 10 maiores quantidade de citações, 12 artigos; (b) 10 maiores médias de citações por tempo de publicação, 11 artigos.	76

Figura 27 – Nuvem de palavras formadas a partir: (a) dos títulos; (b) dos resumos; (c) das palavras-chave dos autores; (d) das palavras-chave da base de dados; sobre aplicação de GNSS em talude no período de 2018 a 2022, conforme metodologia apresentada no Capítulo 4.....	78
Figura 28 – (a) Deslocamento medido das estações GNSS de monitoramento contínuo; (b) Deslocamento medido nas estações GNSS com medições em campanha.	80
Figura 29 – (a) – Deslocamento medido das estações GNSS de monitoramento contínuo; (b) Deslocamento medido nas estações GNSS com medições em campanha.	81
Figura 30 – Relação entre a precipitação e o deslocamento horizontal medido com GNSS.	82
Figura 31 – Rede de monitoramento do talude em Xingyi, na China	84
Figura 32 – Comparação e análise de diferentes métodos de filtragem para dados obtidos de medidores de trincas e GNSS em Longjing: (a) dados completos; (b) porção ampliada; (c) diferença nos dados poucas horas antes da falha.....	85
Figura 33 – Deslocamento horizontal das estações GNSS e o nível da água do reservatório.	86
Figura 34 – Evolução do número de publicações na base de dados Scopus no período de 2018 a 2022 sobre aplicação de GNSS em subsidência, conforme metodologia apresentada no Capítulo 4.....	88
Figura 35 – Análise das citações dos artigos na base de dados Scopus no período de 2018 a 2022 sobre aplicação de GNSS em subsidência, conforme metodologia apresentada no Capítulo 4: (a) 10 maiores quantidade de citações, 16 artigos; (b) 10 maiores médias de citações por tempo de publicação, 12 artigos	89
Figura 36 – Nuvem de palavras formadas a partir: (a) dos títulos; (b) dos resumos; (c) das palavras-chave dos autores; (d) das palavras-chave da base de dados, das publicações verificadas na base de dados Scopus no período de 2018 a 2022 sobre aplicação de GNSS em subsidência, conforme metodologia apresentada no Capítulo 4.....	91
Figura 37 – Comparação dos resultados obtidos pelo método de nivelamento e GPS.....	92

Figura 38 – Evolução do deslocamento vertical em relação a frente de trabalho em um ponto da área de estudo.....	93
Figura 39 – Dados do deslocamento GNSS para as três direções em: (a) longo prazo; (b) curto prazo.	94
Figura 40 – Mapa de contorno mostrando a taxa média de subsidência (mm/ano) durante o período de 2006 a 2016.	96
Figura 41 – Vetores de velocidade horizontal e vertical entre 1995 e 2005 [(a) e (c)] e entre 2006 e 2016 [(b) e (d)] de estações GPS contínuas (>3 anos) na área metropolitana de Houston.	97
Figura 42 – (a) Rede de monitoramento GNSS; (b) Velocidades verticais obtidas nos levantamentos realizados em 2016, 2018 e 2020.	99
Figura 43 – Evolução do número de publicações na base de dados Scopus no período de 2018 a 2022 sobre aplicação de GNSS em barragem, conforme metodologia apresentada no Capítulo 4.....	101
Figura 44 – Análise das citações dos artigos na base de dados Scopus no período de 2018 a 2022 sobre aplicação de GNSS em barragem, conforme metodologia apresentada no Capítulo 4: (a) 10 maiores quantidade de citações, 10 artigos; (b) 10 maiores médias de citações por tempo de publicação, 10 artigos.....	102
Figura 45 – Nuvem de palavras formadas a partir: (a) dos títulos; (b) dos resumos; (c) das palavras-chave dos autores; (d) das palavras-chave da base de dados, das publicações verificadas na base de dados Scopus no período de 2018 a 2022 sobre aplicação de GNSS em barragem, conforme metodologia apresentada no Capítulo 4.....	103
Figura 46 – Deslocamentos horizontais medidos com GNSS.....	104
Figura 47 – Resultados do monitoramento do nível da água e dos deslocamentos medidos com GNSS em barragem de terra.	105
Figura 48 – (a) Posição dos pontos de verificação na barragem de arco na Turquia; (b) resultados dos deslocamentos horizontais na barragem. .	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – A evolução do GNSS.....	21
Tabela 2 – Comparativo do sistema GLONASS e GPS.....	28
Tabela 3 – Fontes e efeitos dos erros envolvidos no GNSS.	42
Tabela 4 – Elementos de um receptor GPS.....	48
Tabela 5 – Características do posicionamento relativo estático.....	55
Tabela 6 – Resumo de <i>softwares</i> científicos de processamento de dados GNSS....	59
Tabela 7 – Vantagens e desvantagens dos métodos de posicionamento GNSS.....	61
Tabela 8 – Lista de palavras-chave utilizadas na base de dados Scopus e as respectivas quantidades de artigos reportados na etapa de identificação.	66
Tabela 9 – Quantidades de artigos reportados nas etapas de identificação e seleção.....	67
Tabela 10 – Lista de palavras-chave utilizadas na base de dados Scopus e as respectivas quantidades de artigos reportados na etapa de busca.....	67
Tabela 11 – Aplicações do GNSS na engenharia.	72
Tabela 12 – Principais instituições com publicações sobre aplicação de GNSS em talude na base de dados Scopus no período de 2018 a 2022, conforme metodologia apresentada no Capítulo 4.....	75
Tabela 13 – Principais periódicos na base de dados Scopus, com aplicação de GNSS em talude no período de 2018 a 2022, conforme metodologia apresentada no Capítulo 4, com as respectivas métricas de impacto....	77
Tabela 14 – Principais instituições com na base de dados Scopus no período de 2018 a 2022 sobre aplicação GNSS em subsidência, conforme metodologia apresentada no Capítulo 4.....	89
Tabela 15 – Principais periódicos na base de dados Scopus, com aplicação de GNSS em talude no período de 2018 a 2022, conforme metodologia apresentada no Capítulo, com as respectivas métricas de impacto.....	90
Tabela 16 – Principais instituições com na base de dados Scopus no período de 2018 a 2022 sobre aplicação de GNSS em barragem, conforme metodologia apresentada no Capítulo 4.....	101
Tabela 17 – Principais periódicos na base de dados Scopus, com aplicação de GNSS em barragem no período de 2018 a 2022, conforme	

metodologia apresentada no Capítulo 4, com as respectivas métricas de impacto.....	102
Tabela 18 – Principais estudos do posicionamento GNSS aplicado a taludes, subsidência e barragem.	109
Tabela 19 – Vantagens, limitações e tendências do posicionamento GNSS	126

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AOC	<i>Auxiliary Output Chips</i>
AS	<i>Anti-Spoofing</i>
BDS	<i>BeiDou Navigation Satellite System</i>
C/A	<i>Código Course/Acquisiton</i>
CE	<i>Commission European</i>
DGNSS	<i>Diferencial GNSS</i>
DOP	<i>Dilution of Precision</i>
ESA	<i>European Space Agency</i>
GCC	<i>Galileo Control Centers</i>
GEO	<i>Geostationary Earth Orbit</i>
GLONASS	<i>Global Orbiting Navegation Satellite System</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System – GNSS</i>
GNSS–R	<i>GNSS Reflectometry</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
IBGE	<i>Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística</i>
IGR	<i>International GNSS Service – Rapid</i>
IGS	<i>International GNSS Service</i>
IGSO	<i>Inclined Geosynchronous Satellite Orbit</i>
INC	<i>ISRO Navigation Center</i>
IRIMS	<i>IRNSS Ranging and Integrity Monitoring</i>
IRNSS	<i>Indian Regional Navigation Satellite System</i>
ITRS	<i>International Terrestrial Reference System</i>
JAXA	<i>Japan Aerospace Exploration Agency</i>
MCS	<i>Master Control Station</i>
MEO	<i>Medium Earth Orbith</i>
MS	<i>Monitor Station</i>
NavIC	<i>Navigation with Indian Constellation</i>
NRTK	<i>Network RTK</i>
P	<i>Código Precise ou Protected</i>
PPP	<i>Posicionamento por Ponto Preciso</i>
PPS	<i>Precise Positioning Service</i>
PRISMA	<i>Principais Itens para Relatar Revisões Sistemáticas e Meta-Análises</i>
PRN	<i>Pseudo Random Noise</i>
QZSS	<i>Sistema de Satélites Japonês Quasi-Zenith</i>
RBMC	<i>Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS</i>
RF	<i>Seção de Radiofrequência</i>
RTCM	<i>Radio Technical Committee for Maritime Service</i>
RTK	<i>Real Time Kinematic</i>
SCF	<i>Spacecraft Control Facility</i>
SGR	<i>Sistema de Referência Geodésica</i>
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i>
SPS	<i>Standard Positioning Service</i>
TEC	<i>Total Electron Contents</i>

TMS	<i>Time Management Station</i>
TS/US	<i>Estações de Sincronização/Upload de Tempo BDS</i>
TT&C	<i>Telemetry, Tracking and Command</i>
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
ULS	<i>Uplink Station</i>
VHF	<i>Very High Frequency</i>
WGS84	<i>World Geodetic System</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVOS	18
1.1.1	Objetivo Geral	18
1.1.2	Objetivos Específicos	18
1.2	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	18
2	SISTEMA GLOBAL DE NAVEGAÇÃO POR SATÉLITE (GNSS): PRINCÍPIOS E CONCEITOS	20
2.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	20
2.2	SISTEMAS DE POSICIONAMENTO POR SATÉLITE	21
2.2.1	Sistema de Posicionamento Global (GPS)	21
2.2.2	Glonass	26
2.2.3	Galileo	28
2.2.4	BeiDou / COMPASS	30
2.2.5	Sistemas Regionais de Navegação por Satélite (RNSS)	32
2.3	CONSIDERAÇÕES SOBRE AS OBSERVÁVEIS GNSS	35
2.3.1	Pseudodistâncias	35
2.3.2	Fase da Onda Portadora	37
2.3.3	Combinações lineares das observáveis GNSS	38
2.4	ERROS SISTEMÁTICOS DO GNSS	41
2.4.1	Erros da Órbita	42
2.4.2	Erros nos Relógios	43
2.4.3	Erros Relacionados com a Propagação do Sinal	43
2.4.4	Multicaminhos	46
2.5	EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	47
2.6	SISTEMA GEODÉSICO DE REFERÊNCIA E SISTEMA DE COORDENADAS	49
3	MÉTODOS DE POSICIONAMENTO GNSS	52
3.1	POSICIONAMENTO ABSOLUTO OU POR PONTO	53
3.2	POSICIONAMENTO RELATIVO	54
3.3	POSICIONAMENTO DIFERENCIAL GNSS (DGNSS)	55
3.4	POSICIONAMENTO RTK	56
3.5	POSICIONAMENTO PÓS PROCESSADO	57

3.6	COMPARATIVO ENTRE OS MÉTODOS	59
4	METODOLOGIA.....	62
4.1	FASE 1: BUSCA DOS ARTIGOS NA BASE DE DADOS	64
4.1.1	Etapa de Identificação.....	65
4.1.2	Etapa de Seleção.....	66
4.1.3	Etapa de Elegibilidade	67
4.1.4	Etapa de Inclusão.....	68
4.2	FASE 2: ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA.....	68
4.3	FASE3: ANÁLISE SISTEMÁTICA.....	69
5	APLICAÇÕES DO GNSS NO MONITORAMENTO GEOTÉCNICO	71
5.1	APLICAÇÕES GERAIS DO GNSS	71
5.2	MONITORAMENTO DE TALUDES	73
5.2.1	Resultados e Análise Bibliométrica.....	73
5.2.2	Casos da Literatura sobre o Monitoramento de Taludes.....	78
5.3	MONITORAMENTO DE SUBSIDÊNCIA	87
5.3.1	Resultados e Análise Bibliométrica.....	87
5.3.2	Casos da Literatura sobre o Monitoramento de Subsidência	91
5.4	MONITORAMENTO DE BARRAGENS	99
5.4.1	Resultados e Análise Bibliométrica.....	100
5.4.2	Casos da Literatura sobre o Monitoramento de Barragem	103
5.5	SÍNTESE DAS APLICAÇÕES	107
6	CARACTERÍSTICAS DA APLICAÇÃO DO GNSS PARA O MONITORAMENTO	111
6.1	UTILIZAÇÃO E CUIDADOS	111
6.1.1	Obtenção das informações	111
6.1.2	Processamento.....	114
6.2	VANTAGENS	117
6.3	LIMITAÇÕES.....	120
6.4	TENDÊNCIAS	122
6.5	SÍNTESE	124
7	CONCLUSÕES	127
	REFERÊNCIAS.....	129

1 INTRODUÇÃO

Análises geotécnicas referentes a movimentação em taludes, aterros, áreas de subsidência e barragens demandam monitoramento rigoroso e preciso dos deslocamentos horizontais e verticais sofridos.

É bastante comum a ocorrência de desastres naturais em áreas de taludes, pois uma série de fatores, em especial a chuva, favorecem o desencadeamento de movimentos de massa e processos erosivos, gerando inúmeras consequências, como perdas materiais e vidas humanas (SIMÕES; OLIVEIRA, 2014).

O conhecimento acerca da subsidência, relacionada a processos naturais e/ou antrópicos, torna-se necessário em decorrência da gravidade dos danos associados, como a formação de trincas em pavimentos e edificações, o que inviabiliza os seus usos (CABRAL; SANTOS; PONTES FILHO, 2006).

Este mesmo princípio norteia as estruturas de barragens, ressaltando o fato de que são considerados elementos sensíveis, cujo rompimento pode provocar danos ao meio ambiente, a economia e a sociedade (SCAIONI *et al.*, 2018).

Deste modo, pode-se afirmar que o acompanhamento dos movimentos desempenha um papel essencial na garantia da segurança de elementos geotécnicos, como barragens, taludes e áreas de subsidência (XI *et al.*, 2018).

Desde o início do século XX, o monitoramento geotécnico era baseado principalmente em redes de controle geodésico, aplicando técnicas clássicas como triangulação de precisão e nivelamento geométrico (DE LACY *et al.*, 2017). Com o passar do tempo, o Sistema Global de Navegação por Satélite (*Global Navigation Satellite System* – GNSS) se consolidou como uma das técnicas de monitoramento de deslocamento superficial essencial para grandes estruturas (JIANG *et al.*, 2022).

O GNSS pode ser descrito como um serviço baseado em sinais de satélite que permitem posicionamento e navegação de alta precisão (SANOU; LANDRY, 2013). Ao longo dos anos o GNSS teve seu funcionamento aprimorado, se tornando completamente operacional, com diferentes constelações de satélites disponíveis, capazes de realizar medições ao longo do dia, independente das condições ambientais com alta precisão, autônoma e contínua.

O seu processo de evolução favoreceu para que os equipamentos se tornassem mais confiáveis, mais leves, mais baratos e mais fáceis de serem utilizados (GILI; COROMINAS; RIUS, 2000). Assim também foram desenvolvidos procedimentos,

métodos e *softwares* para obtenção e pós-processamento das informações de campo.

Os receptores GNSS podem registrar o deslocamento na superfície de forma pontual com alta resolução e temporal, o que permite ao sistema de monitoramento rastrear movimentos da ordem de alguns milímetros por ano (SHARIFI *et al.*, 2022). A possibilidade de realização de monitoramento em tempo real, permite a coleta de informações a serem utilizadas em sistemas de controle e alerta para prevenção e desastres (GRAGLIA *et al.*, 2008).

Roberts, Tang e Brown (2015) afirmam que os dados GNSS podem ser aplicados de várias maneiras na Engenharia Civil, a exemplo do monitoramento de deslocamentos em estruturas naturais (encostas) ou artificiais (pontes, barragens, aterros), do controle de construção, de levantamentos cadastrais, entre outros. Além disso, o GNSS pode ser utilizado também em pontos de controle para imagens de Fotogrametria e de Sensoriamento Remoto (SILVA, COUTINHO e ROSA, 2021).

No entanto, sua aplicação em problemas geotécnicos requer uma avaliação cuidadosa da representatividade dos pontos de referência em relação à área de interesse (SANTOS *et al.*, 2007). Também devem ser escolhidos, de maneira adequada, alguns requisitos para a boa aplicação do GNSS, como o método de posicionamento, tipo de receptor, tipos de operação e parâmetros para controle de qualidade do posicionamento (GRAGLIA *et al.*, 2008).

Neste contexto, o trabalho retrata a aplicação recente do posicionamento GNSS no monitoramento geotécnico em taludes, áreas de subsidência e barragens. Para tal foram utilizadas publicações científicas dos últimos cinco anos (2018 a 2022) que retratam a aplicação do GNSS para o monitoramento geotécnico. A metodologia escolhida para pesquisa foi baseada em um modelo híbrido dividido em três fases: busca na base de dados, análise bibliométrica e análise sistemática.

A busca das publicações científicas foi baseada nas etapas do método PRISMA, considerando a base de dados Scopus. Em função dos resultados obtidos nesta etapa foi desenvolvida a análise bibliométrica, avaliando qualitativa e quantitativamente as publicações, destacando a quantidade de artigos publicados na temática, as instituições e os países envolvidos, os periódicos, entre outros, permitindo conhecer aspectos referentes ao estudo do GNSS na atualidade.

A análise sistemática permitiu a discussão dos estudos de caso obtidos na primeira fase da pesquisa, destacando a problemática, o método de posicionamento

empregado, as principais contribuições do trabalho, entre outros fatores. Desta forma, favorecendo a compreensão de como o GNSS tem sido aplicado para o monitoramento geotécnico, em especial nas áreas de talude, subsidência e barragem.

Para além das aplicações, a análise sistemática possibilitou a verificação dos cuidados, das vantagens e limitações pertinentes a tecnologia, e as perspectivas futuras de desenvolvimento do GNSS. Diante do exposto, tem-se que o presente trabalho se configura como uma ferramenta elucidativa do posicionamento GNSS, voltada para o monitoramento geotécnico.

1.1 OBJETIVOS

Esta pesquisa tem como objetivos:

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar as potencialidades e limitações do GNSS para o monitoramento geotécnico por meio da literatura técnica-científica dos últimos cinco anos.

1.1.2 Objetivos Específicos

Sendo assim, busca-se atender os seguintes objetivos específicos:

- a) analisar publicações do posicionamento GNSS utilizado no monitoramento de: talude, subsidência e barragem;
- b) discutir estudos de caso da aplicação GNSS na área de geotecnia; e
- c) evidenciar cuidados, potencialidades e tendências da técnica GNSS na engenharia geotécnica.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho está estruturado em sete capítulos, complementados pelas referências bibliográficas. O capítulo inicial apresenta o tema da pesquisa, destacando sua importância, além de definir os objetivos a serem alcançados.

O segundo capítulo faz uma abordagem, dentro do contexto de revisão bibliográfica, acerca do GNSS, apresentando conceitos, especificidades, erros associados, entre outros elementos que favorecem a compreensão dos sistemas.

O terceiro capítulo, também com base na revisão bibliográfica, examina os métodos de posicionamento disponíveis, definindo a forma de realização, características intrínsecas e suas possibilidades de aplicação para o monitoramento.

O capítulo quatro se destina a definição da metodologia a ser utilizada, apresentando os conceitos e etapas envolvidas na pesquisa e formação dos resultados a serem discutidos.

O quinto capítulo retrata casos de aplicação do GNSS no monitoramento geotécnico relacionado a taludes, áreas de subsidência e barragens, fazendo uma revisão bibliométrica das publicações e uma síntese dos resultados obtidos nos artigos.

O capítulo seis esclarece algumas características do monitoramento com GNSS, destacando a sua aplicabilidade, os cuidados necessários para utilização satisfatória. Além disso, são apresentadas as vantagens, limitações e perspectivas futuras de desenvolvimento da tecnologia.

No capítulo sete estão apresentadas as conclusões obtidas, bem como as recomendações para trabalhos futuros relativos à temática abordada.

2 SISTEMA GLOBAL DE NAVEGAÇÃO POR SATÉLITE (GNSS): PRINCÍPIOS E CONCEITOS

O capítulo apresenta aspectos relacionados ao Sistema Global de Navegação por Satélite (*Global Navigation Satellite System – GNSS*) relativos à forma de obtenção da posição de elementos sobre a superfície da Terra. Este sistema é utilizado por todo o mundo e ao longo da história se observa o seu desenvolvimento e melhorias. Tendo como vantagens a disponibilidade de dados em tempo real e alta precisão faz com que seja um dos principais métodos utilizados de monitoramento de deslocamentos, sendo esta a razão pela qual é analisado.

2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Determinar a posição de elementos sobre a superfície da Terra é um dos grandes objetivos da humanidade ao longo dos anos. Inicialmente, as descobertas do posicionamento se deram em função da necessidade de definir a localização para fins de comércio e navegação. Sendo assim, elementos naturais, como o Sol, os planetas, as constelações, foram utilizados para fornecer instruções acerca da posição (MONICO, 2008).

Com o avanço do desenvolvimento tecnológico, tem-se que alguns sistemas foram desenvolvidos, muitos destes baseados em ondas de rádio, para a determinação da posição. Contudo, estes sistemas apresentavam desvantagens no tocante a “impossibilidade de posicionamento global, além da limitação em termos de acurácia” (MONICO, 2008).

A partir de 1960 teve-se o desenvolvimento de sistemas de posicionamento globais por satélites objetivando a navegação (SEEBER, 2003). Logo após, houve a operacionalização do sistema de navegação por satélite nos Estados Unidos, NAVSTAR-GPS (*NAVigation Satellite with Time And Ranging - Global Positioning System*), desenvolvido para fins militares, que apresentava uma boa precisão no posicionamento, 24 horas por dia, em qualquer lugar do globo terrestre ou próximo a este (BURITY, 2016).

De acordo com Monico (2008), em paralelo o governo russo desenvolveu o GLONASS (*Global Orbiting Navegation Satellite System*), cujo funcionamento é semelhante ao GPS. Além destes dois sistemas, tem-se hoje disponível o sistema

BDS / COMPASS (*BeiDou System*), desenvolvido pela iniciativa chinesa, declarado operacional em julho de 2020, e o Galileo (europeu), em operação a partir de janeiro de 2023. Alguns elementos históricos da evolução dos sistemas globais de posicionamento estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1 – A evolução do GNSS

Ano	Descrição
1960	Força aérea e marinha dos Estados Unidos iniciam pesquisa.
1973	Departamento de defesa dos Estados Unidos revela o projeto GPS.
1978	Primeiro satélite GPS dos Estados Unidos é lançado.
1982	Primeiro satélite GLONASS da Rússia é lançado.
1983	Primeiro desastre aéreo, da Korean Air Lines 007.
1994	Cobertura mundial é alcançada pelo GPS.
2000	Precisão de uso civil é permitida nos Estados Unidos.
2000	Lançamento do primeiro satélite chinês BeiDou.
2005	Primeiro satélite europeu Union Galileo é lançado.
2011	Cobertura mundial é alcançada pelo sistema GLONASS russo.
2018	Satélite GPS III é lançado.
2020	Cobertura mundial é projetada pelas constelações BeiDou e a Union Galileo.

Fonte: Adaptado de Petropoulos e Srivastava (2021)

Estes diferentes sistemas recebem um termo abrangente, chamado GNSS, de modo que se distinguem por características pertinentes ao segmento espacial, de controle e de usuários (SEEBER, 2003).

2.2 SISTEMAS DE POSICIONAMENTO POR SATÉLITE

Neste item serão apresentadas as particularidades inerentes a cada constelação de satélites (GPS, GLONASS, BDS / COMPASS, Galileo), com suas características de funcionamento.

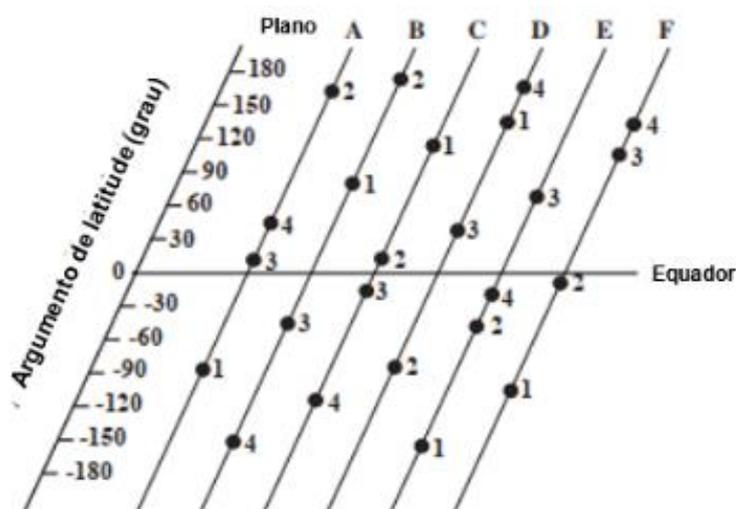
2.2.1 Sistema de Posicionamento Global (GPS)

O Sistema de Posicionamento Global (*Global Positioning System* – GPS) foi desenvolvido pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos a ser utilizado para fins militares. Em razão da elevada precisão e dos avanços tecnológicos que envolveram os recursos GPS, tem-se que uma grande parcela da comunidade civil passou a utilizar este serviço para as mais diversas finalidades, como por exemplo a agricultura, controle de frotas, navegação, entre outros (MONICO, 2008).

Concebido para fornecer informações de tempo e posição tridimensional em qualquer lugar da Terra, ou próximo à esta, continuamente, independente de condições atmosféricas, em um referencial global, homogêneo e com base em medidas de distâncias (MONICO, 2000).

O segmento espacial do sistema GPS foi previsto com uma constelação nominal de 24 satélites em órbita terrestre média (*Medium Earth Orbith – MEO*), transmitindo sinais de rádio para os usuários, com uma altitude aproximada de 20.200 km. Estes satélites estão dispostos em seis planos orbitais igualmente espaçados, com quatro satélites em cada plano (Figura 1). Além disso, os planos estão inclinados em 55° em relação à linha do Equador com o período aproximado de 12 horas siderais, ou seja, cada satélite orbita à Terra duas vezes ao dia, garantindo que no mínimo 4 satélites GPS sejam visíveis de qualquer ponto do planeta (SEEBER, 2003).

Figura 1 – Distribuição de satélites e planos orbitais do GPS



Fonte: Adaptado de Seeber (2003)

De acordo com Monico (2000), a concepção inicial do GPS contava com quatro tipos de satélites, denominados de Bloco I, II, IIA (2ª geração avançada) e IIR (Reabastecimento). Os satélites do Bloco I eram protótipos, sendo o último satélite que foi lançado para esse Bloco desativado no ano de 1995.

Os blocos II e IIA, referem-se à primeira e segunda geração, respectivamente, cuja diferença principal está no incremento da capacidade de armazenamento de dados e comunicação entre os satélites. O Bloco IIR corresponde a terceira geração de satélites, que tem por objetivo principal a substituição dos satélites dos blocos anteriores, à medida que for necessário, tendo como diferencial a possibilidade de

medir distâncias entre satélites e a possibilidade de calcular efemérides¹ no próprio satélite, além de transmitir essas informações entre os satélites e para o sistema de controle na Terra (SEEBER, 2003).

Um quarto bloco (IIF) previsto com 33 satélites, apresenta 12 operacionais atualmente, de modo que estes têm a função de substituir os elementos dos blocos anteriores, quando pertinente, introduzindo novas tecnologias para o satélite e no seu sistema de controle (Departamento de Defesa dos Estados Unidos, 2022). De acordo com Burity (2016), “a última geração planejada é o Bloco GPSIII, que tem por objetivo a melhoria de serviços de posicionamento, navegação e tempo, e avanços na segurança, acurácia e confiabilidade do sistema”.

O Departamento de Defesa dos Estados Unidos (2022) afirma que a constelação GPS é uma mistura de satélites antigos e novos, tendo atualmente 31 satélites operacionais dentre os diferentes blocos já lançados. Na Figura 2 estão apresentadas as informações a respeito da quantidade de satélites que estão em operação bem como outras informações, disponibilizadas pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos.

Todos os satélites da constelação GPS transmitem sinais de ondas portadoras (λ), a partir da frequência fundamental (f) de 10,23 MHz. Os satélites dos Blocos I, II e IIR, possuem duas portadoras, L1 e L2, cuja frequência é derivada da frequência fundamental, obtendo assim $L1 = 1575,42$ MHz e $L2 = 1227,60$ MHz. A partir destes valores pode-se determinar um comprimento de onda da ordem de 19cm e 24cm, respectivamente (SEEBER, 2003).

Na concepção original foram implementados dois tipos de códigos no GPS: o código C/A (*Course/Acquisition*) e o código P (*Precise ou Protected*). O código C/A é modulado sobre a portadora L1, e apresenta uma menor precisão, e o código P é modulado sobre as portadoras L1 e L2 (IBGE, 2008).

Os códigos e mensagens de navegação modulados sob estas frequências, chamados de *Pseudo Random Noise* (PRN), são considerados uma sequência binária

¹ Efemérides dos satélites são informações sobre a posição, velocidade e outros parâmetros dos satélites GNSS. Essas informações são transmitidas por cada satélite GNSS como parte de seu sinal de rastreamento e são recebidos por receptores GNSS em terra (SEEBER, 2003). Além disso, as efemérides podem ser ultrarrápidas, previstas, ultrarrápidas, combinadas; rápidas e finais.

gerada por um algoritmo, de modo a identificar o satélite, sendo basicamente os códigos C/A e P (MONICO, 2008).

Figura 2 – Status da constelação GPS

SATÉLITES LEGADOS		SATÉLITES MODERNIZADOS		
BLOCO IA	BLOCO IIR	BLOCO IIR-M	BLOQUEAR IIF	GPS III/III*
0	7	7	12	5
operacional	operacional	operacional	operacionais	operacional
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Código de aquisição grosseira (C/A) na frequência L1 para usuários civis. ▪ Código P(Y) preciso nas frequências L1 e L2 para usuários militares ▪ Vida útil do projeto de 7,5 anos ▪ Lançado em 1990-1997 ▪ A última desativada em 2019 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Código C/A em L1 ▪ Código P(Y) em L1 e L2 ▪ Monitoramento de relógio a bordo ▪ Vida útil do projeto de 7,5 anos ▪ Lançado em 1997-2004 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Todos os sinais legados ▪ 2º sinal civil em L2 (L2C) ▪ Novos sinais de código M militar para maior resistência a congestionamentos ▪ Níveis de potência flexíveis para sinais militares ▪ Vida útil do projeto de 7,5 anos ▪ Lançado em 2005-2009 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Todos os sinais do Bloco IIR-M ▪ 3º sinal civil na frequência L5 (L5) ▪ Relógios atômicos avançados ▪ Precisão, intensidade de sinal e qualidade aprimoradas ▪ 12 anos de vida útil do projeto ▪ Lançado em 2010-2016 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Todos os sinais do Bloco IIF ▪ 4º sinal civil em L1 (L1C) ▪ Confiabilidade, precisão e integridade de sinal aprimoradas ▪ Sem disponibilidade seletiva ▪ 15 anos de vida útil do projeto ▪ IIF: refletores de laser; carga de busca e salvamento ▪ Primeiro lançamento em 2018

Fonte: Adaptado de Departamento de Defesa dos Estados Unidos (2022)

De acordo com Seeber (2003), o código C/A tem comprimento de onda aproximado de 300 metros e uma frequência de 1,023 MHz. Isto permite que usuários civis possam obter a precisão exigida pelo Serviço de Posicionamento Padrão (SPS). O código P, por sua vez, é de uso exclusivo dos militares norte-americanos e usuários civis autorizados. Ele possui uma frequência de 10,23 MHz, o que o torna ainda mais preciso do que o código C/A. Quando operando no modo *Anti-Spoofing* (AS), o código P é criptografado tornando-se então conhecido como código Y – uma versão segura e não disponível para usuários civis.

O Bloco IIR (M) adicionou o código civil L2C na onda portadora L2, com a intenção de minimizar os problemas relacionados ao código Y. Além disso, o Bloco IIF57 incluiu a portadora L5, que possui um comprimento de onda de 25,5 cm e uma frequência de 1176,45 MHz.

Sendo assim, pode-se resumir que atualmente há três tipos de sinais envolvidos no GPS: as portadoras (L1, L2, L5), os códigos (C/A, L2C e P(Y)) e o dados (navegação, relógio etc.).

O Segmento de Controle GPS consiste em uma rede global de instalações terrestres que tem por função monitorar e controlar continuamente o sistema de satélites, determinar o sistema de tempo GPS, prever as efemérides dos satélites e o comportamento dos relógios dos satélites, atualizar periodicamente a mensagem de navegação para cada satélite em particular, e comandar pequenas manobras para manter a órbita, ou realocar ou substituir um satélite que não esteja funcionando adequadamente (MONICO, 2000; RUSSELL; SCHAIBLY, 1978).

O Departamento de Defesa dos Estados Unidos (2022) afirma que, atualmente, o Segmento de Controle do GPS inclui uma estação de controle mestre, uma estação de controle mestre alternativa, 11 antenas de comando e controle e 16 locais de monitoramento, os quais estão dispostos na Figura 3.

Figura 3 – Posição das estações de controle do sistema GPS



Fonte: Adaptado de Departamento de Defesa dos Estados Unidos (2022)

O segmento de usuário compreende todas as classes de receptores GPS e seus componentes, que em geral são classificados em receptores geodésicos e de navegação (HOFFMANN–WELLENHOF, 2001), podendo ainda estar classificadas de acordo com o uso, se civil ou militar (MONICO, 2008).

O GPS oferece dois tipos de serviço: o Serviço Padrão de Posicionamento – *Standard Positioning Service* (SPS) e o Serviço Preciso de Posicionamento – *Precise Positioning Service* (PPS). O SPS está disponível para todos, mas oferece resultados

menos precisos. O PPS, por sua vez, oferece resultados mais precisos, mas está restrito ao uso militar ou para usuários autorizados (SEEBER, 2003).

Mesmo o sistema estando totalmente operacional, a política de segurança dos Estados Unidos afetou diretamente os usuários, limitando a precisão acessível para aqueles que não possuem autorização. Isso foi alcançado através da implementação da Disponibilidade Seletiva – *Selective Availability* (SA) e do *Anti-Spoofing* (AS) sobre os satélites do Bloco II (KRUEGER, 1996).

A Disponibilidade Seletiva é um método que visa degradar o sinal dos satélites, fazendo uso das técnicas Épsilon (ϵ) e Dither (δ). A primeira consiste em manipular os dados das efemérides dos satélites, enquanto a segunda envolve a desestabilização sistemática do oscilador do satélite, afetando a frequência dos relógios dos satélites. Como resultado, as precisões obtidas nos levantamentos eram insuficientes para fins de posicionamento, apresentando uma acurácia horizontal e vertical de aproximadamente 100 e 156 metros, respectivamente. No entanto, em maio de 2000, a Disponibilidade Seletiva foi desativada, proporcionando uma melhora significativa no posicionamento, aproximadamente 10 vezes mais preciso (MONICO, 2008).

A técnica *Anti-Spoofing* (AS), em uso desde 31 de janeiro de 1994, codifica o código Preciso (P) nas duas fases da portadora L1 e L2 em um código secreto chamado código Y. Somente usuários autorizados que possuem um receptor equipado com *Auxiliary Output Chips* (AOC) podem determinar a pseudodistância do código P sobre as portadoras L1 e L2 (SUBIRANA; ZORNOZA; HERNÁNDEZ-PAJARES, 2013).

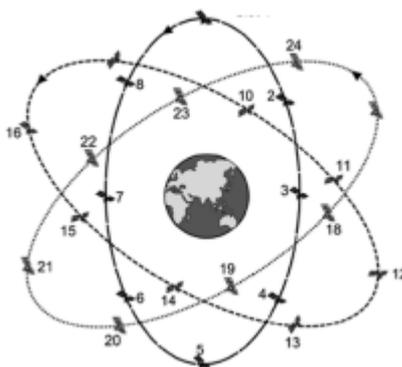
2.2.2 Glonass

De maneira similar ao GPS, o sistema GLONASS (*Global'Naya Navigatsionnaya Sputikowaya Sistema*) foi originado em 1970 pelo governo russo e se tornou operacional em 1993 (HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; WASLE, 2008) com intenções militares, porém ao longo dos anos este sistema foi disponibilizado para a comunidade civil (MONICO, 2008).

O segmento espacial do GLONASS se tornou completamente operacional em 1996 com a disponibilidade de 24 satélites (Figura 4), porém com o passar dos anos a quantidade de satélites foi reduzindo drasticamente, em decorrência da crise

econômica após a extinção da União Soviética, chegando em 2002 com apenas 7 em funcionamento (SEEBER, 2003). Os satélites estão distribuídos em três planos orbitais, separados de 120° , com cada plano contendo 8 satélites, igualmente espaçados. As órbitas são aproximadamente circulares, com uma inclinação de $64,8^\circ$ e altitude em relação à Terra de 19.100 km. Esta constelação assegura que pelo menos cinco satélites sejam visíveis simultaneamente em 99% dos locais da Terra (HOFMANN–WELLENHOF; LICHTENEGGER; WASLE, 2008).

Figura 4 – Constelação de satélites GLONASS



Fonte: Adaptado de Kaplan e Hegarty (2017)

Os satélites do sistema GLONASS iniciou a operação em 1982, com o primeiro bloco identificado por GLONASS. Contudo, no ano 2003, foi lançado o primeiro satélite da série GLONASS–M, sendo considerado o início da segunda geração de satélites, contando com a modernização, especialmente, com precisão de posicionamento melhorada e tempo de vida operacional aumentado em sete anos (BURITY, 2016).

A terceira geração de satélites teve o lançamento iniciado em 2011, sendo intitulada por GLONASS–K, com maior tempo de vida (10 anos) e menor peso (em torno de 935kg). A geração seguinte de satélites GLONASS–K2 se encontra em fase de desenvolvimento (ROSCOSMO, [s.d.]).

O segmento de controle baseado em terra é responsável pela previsão de efemérides de satélite, correção das informações contidas em cada satélite, sincronização dos relógios dos satélites com o tempo do sistema, estimativa entre a diferença de tempo verificada entre o sistema GLONASS e o padrão contido no sistema universal e o controle dos satélites (KAPLAN; HEGARTY, 2017).

De acordo com Seeber (2003), o centro de controle está localizado próximo a Moscou e as estações de controle estão espalhadas uniformemente no território

russo, de modo que os parâmetros de controle e navegação são atualizados duas vezes ao dia para cada satélite.

Em relação ao segmento de usuário, o GLONASS, assim como GPS, apresenta a utilização do código C/A para o SPS e do código P para as aplicações militares que fazem uso do PPS (KRÜGER; SPRINGER; LECHNER, 1994). Na Tabela 2 apresentado por Seeber (2003) apresenta o comparativo entre as características para o GLONASS e GPS.

Tabela 2 – Comparativo do sistema GLONASS e GPS.

Parâmetro	GLONASS	GPS
Número de satélites	24	31
Número de planos orbitais	3	6
Inclinação	64.8°	55°
Altitude orbital	19 100 Km	20 180 Km
Sistema de Referência	PZ-90	WGS84
Base de tempo	Hora do sistema GLONASS	Hora do sistema GPS
Banda de frequência L1	1.602–1.615 MHz	1.575,42 MHz
Banda de frequência L2	1.246–1.256 MHz	1.227,60 MHz
Código	Mesmo para todos os satélites código C/A em L1; código P em L1, L2	Diferente para todos os satélites código C/A em L1; código P em L1, L2
Tipo de código	Sequência PRN	Código dourado
Frequência de código C/A	0.511 MHz	1.023 MHz
Frequência de código P	5.11 MHz	10.23 MHz

Fonte: Adaptado de Monico (2008)

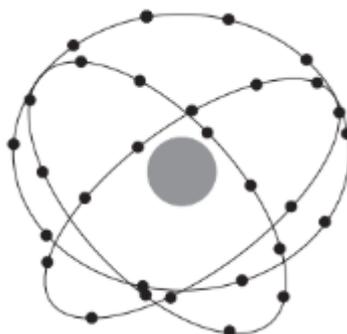
Os sinais e códigos produzidos por esse sistema são semelhantes aos do GPS, com duas portadoras (L1 e L2) e dois códigos (C/A e P). A frequência do código C/A é de 0,511 MHz e a do código P é de 5,11 MHz, sendo aproximadamente metade dos valores do GPS. Segundo Monico (2008), esta diferença resulta em uma precisão menor nas medições realizadas pelo GLONASS em comparação com o GPS, contudo os sinais do GLONASS não foram propositalmente degradados.

2.2.3 Galileo

Galileo é o sistema de navegação global europeu, idealizado e desenvolvido pela parceria entre a Comunidade Europeia (CE – *Commission European*) e a Agência Espacial Europeia (ESA – *European Space Agency*). Este sistema foi desenvolvido com o intuito de garantir autonomia no posicionamento por satélite para a comunidade civil europeia, proporcionando alta acurácia e interoperacionalidade com o GPS e GLONASS (EUSPA, 2022).

De acordo com a EUSPA (2022), o sistema Galileo será composto por 30 satélites em órbita média da Terra, aproximadamente 23.222Km, sendo 24 operacionais e 6 reservas, distribuídos em órbitas circulares, em três planos orbitais Figura 5. Na maioria dos locais, seis a oito satélites estarão sempre visíveis, permitindo que as posições e o tempo sejam determinados com muita precisão em poucos centímetros.

Figura 5 – Constelação do sistema Galileo



Fonte: Seeber (2003)

O segmento espacial do sistema Galileo é dividido em partes: fase de validação de órbita e fase de capacidade operacional total. Durante a primeira fase foram lançados quatro satélites até 2012, com o intuito de garantir as frequências sob as quais o sistema iria operar, bem como para verificar as tecnologias a serem utilizadas no sistema (MONICO, 2008).

O primeiro par de satélites da fase de operação do Galileo, foi lançado em agosto de 2014. De acordo com EUSPA (2023), atualmente existem 28 satélites disponíveis em órbita.

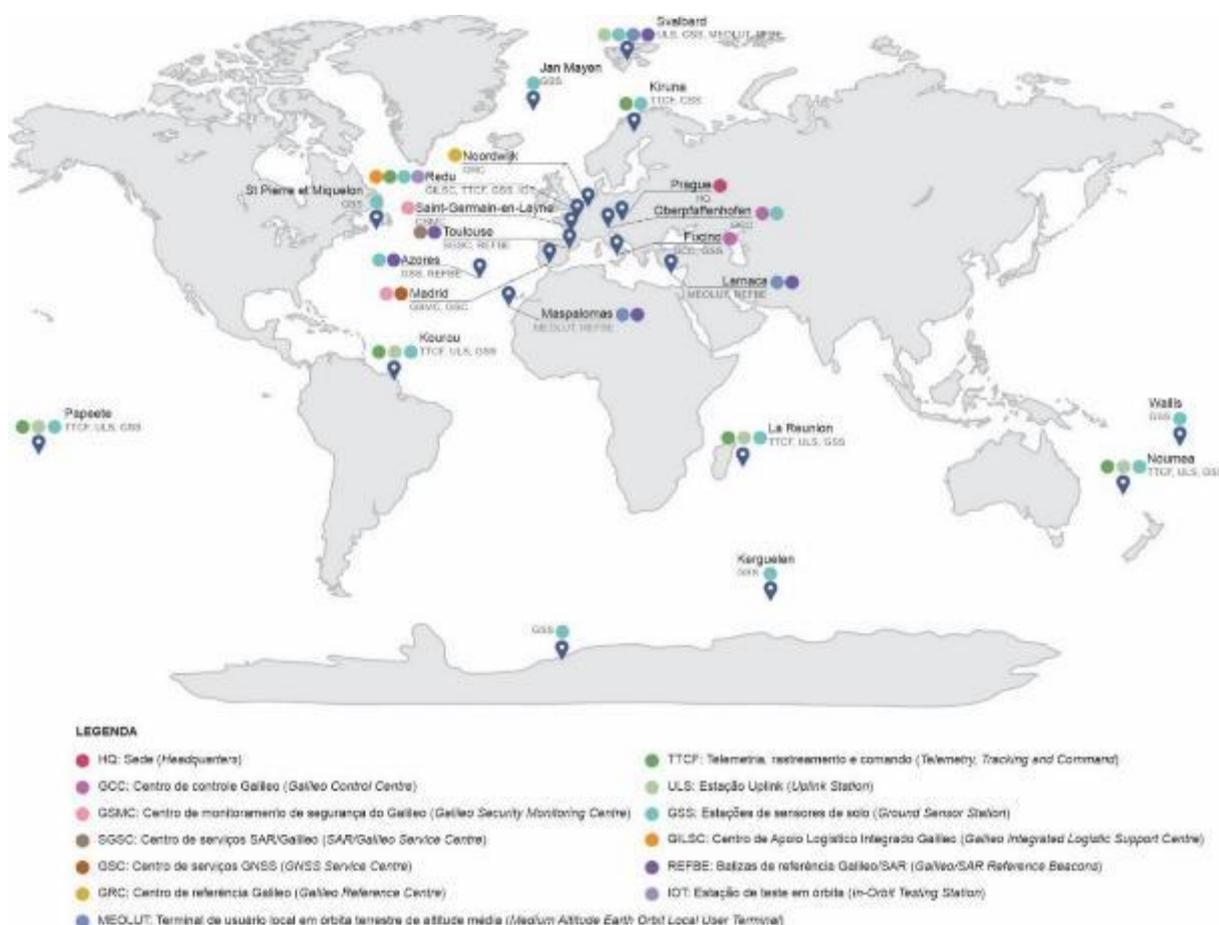
Kaplan e Hegarty (2017) afirmam que o sistema Galileo, uma vez totalmente operacional, oferecerá quatro serviços de alto desempenho em todo o mundo: Serviço Aberto (*Open Service – OS*) para garantir serviços de posicionamento, navegação e tempo, sem custos ao público em geral; Acesso comercial (*High Accuracy Service – HAS*) para usuários que precisam de maior disponibilidade e acurácia; Serviço Regulado Público (PRS) dedicado a serviços de segurança nacional; e Serviço de Busca e Salvamento (SAR) um sistema internacional de detecção de alerta de socorro baseado em satélite de busca e salvamento.

Os satélites utilizam frequências situadas entre 1,1 e 1,6 GHz. Cada satélite transmite à mesma frequência, especificamente, o sinal Galileo L1 é transmitido em 1575,42 MHz por todos os satélites. Para que os receptores possam identificar de qual

satélite provém o sinal e para determinar o tempo que o sinal levou para chegar ao receptor, é adicionado um código diferente a cada satélite. Além disso, há outros sinais, como a portadora E5a, que opera em 1176,45 MHz, a E5b em 1207,140 MHz, e a E6 em 1278,75 MHz (BURITY 2016).

Em relação ao sistema de controle (Figura 6), tem-se que há dois Centros de Controle Galileo (*Galileo Control Centers – GCC*), sendo um responsável pela geração das informações de navegação e tempo, e outro dedicado ao controle de integridade do sistema (SEEBER, 2003). Além disso, o sistema conta com 30 estações espalhadas pelo mundo que fornecem dados para os GCCs.

Figura 6 – Estações de controle Galileo



Fonte: Adaptado de EUSPA (2022)

2.2.4 BeiDou / COMPASS

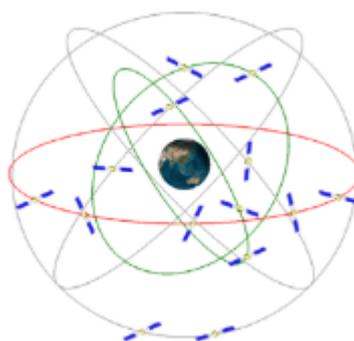
BeiDou Navigation Satellite System (BDS) é o Sistema de navegação desenvolvido pela China, o qual foi constituído em três fases: em 2000, a fase BDS-1 corresponde ao fornecimento de serviços a China; em 2012, a fase BDS-2 fornece

serviços à região da Ásia–Pacífico, esta fase também ficou conhecida como COMPASS; e a fase BDS–3 se refere ao fornecimento de serviços de posicionamento em todo o mundo (CSNO, 2019)

A fase de operação global, que consiste em 18 satélites em órbita terrestre média, foi concluída em 27 de dezembro de 2018 e começou a fornecer serviços iniciais para usuários globais, entrando em operação em julho de 2020 (LIU *et al.*, 2022).

A constelação de operação inclui três satélites GEO (*Geostationary Earth Orbit* – órbita geoestacionária), três satélites IGSO (*Inclined Geosynchronous Satellite Orbit* – órbita geossíncrona inclinada) e 24 satélites MEO (Figura 7). Os satélites GEO estão posicionados em órbitas a uma altitude de 35.786 km nas localizações de 80°E, 110,5°E e 140°E. Já os satélites IGSO operam em órbitas com uma altitude de 35.786 km e com inclinação de 55° em relação ao plano equatorial. Os satélites MEO operam em órbitas a uma altitude de 21.528 km, com inclinação de 55° em relação ao plano equatorial e estão organizados em uma constelação chamada 24/3/1 Walker. Os satélites de reserva serão lançados conforme necessário (CSNO, 2021).

Figura 7 – Constelação do sistema BeiDou.



Fonte: CSNO (2019)

A associação dos satélites em diferentes órbitas proporciona melhor ângulo de elevação, proporcionando melhor desempenho em área de maior altitude e regiões que apresentam grande cobertura de árvores (CSNO, 2015).

O setor de controle é responsável por gerenciar e controlar o sistema de navegação por satélite BeiDou. Ele é composto principalmente por três componentes: a Estação de Controle Mestre (MCS), Estações de Sincronização/Upload de Tempo (TS/US) e Estações de Monitoramento (MS). A MCS é o centro de operação do BDS, encarregada de coletar dados, processá-los, planejar a missão, acompanhar o relógio dos satélites, monitorar o sistema e muito mais. Já as estações TS/US medem o

desvio dos relógios dos satélites e carregam as mensagens de navegação. As estações MS, por sua vez, monitoram constantemente os sinais de navegação e fornecem informações em tempo real ao MCS.

Quanto aos sinais do sistema, eles são formados por uma frequência de portadora (B1 com 1561,098 MHz e B2 com 1207,140 MHz), variação de código e mensagem de navegação (CSNO, 2021).

2.2.5 Sistemas Regionais de Navegação por Satélite (RNSS)

Atualmente existem alguns sistemas regionais de navegação, os quais são destinados ao fornecimento de informações de posição e tempo mais precisas e independentes, para áreas específicas do planeta, como é o caso do Japão e da Índia. Na sequência serão apresentadas informações acerca dos sistemas de posicionamento destes dois países.

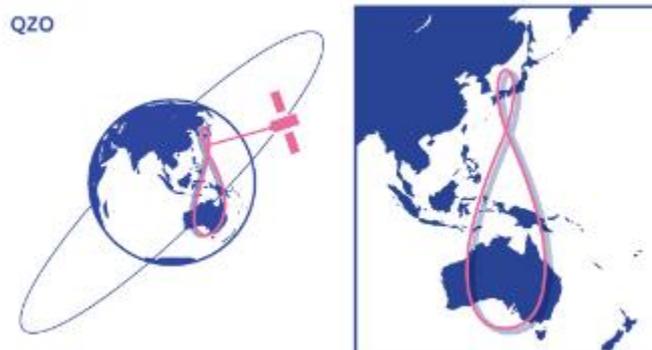
2.2.5.1 Sistema de Satélites Japonês Quasi-Zenith (QZSS)

O Sistema de Satélites Japonês Quasi-Zenith (QZSS) é um sistema regional operado pela agência *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA) em parceria com o governo japonês. Este sistema promove cobertura de alta acurácia para complementar, aumentar e ser interoperável com o GPS dos EUA (e potencialmente outras constelações GNSS) sobre o Japão, haja vista que os satélites GPS de baixa altitude são bloqueados por grandes montanhas (KAPLAN; HEGARTY, 2017).

Os serviços do QZSS foram iniciados oficialmente em 1º de novembro de 2018, havendo sido lançados 4 satélites, sendo composto por 3 satélites em IGSO e um satélite GEO (XIE *et al.*, 2019). A órbita IGSO se configura como uma órbita norte-sul em forma de oito, a qual pode ser visualizada na Figura 8.

De acordo com Montenbruck *et al.* (2017), os sinais transmitidos pelos satélites QZSS incluem um conjunto básico de quatro sinais herdados do GPS, mas usando códigos PRN distintos e dados de navegação ligeiramente adaptados. Esses sinais compatíveis com GPS compreendem o sinal L1 C/A, L2C e L5, bem como o sinal L1C, que já é usado pelo QZSS, mas só será transmitido pelos satélites GPS da próxima geração (GPSIII).

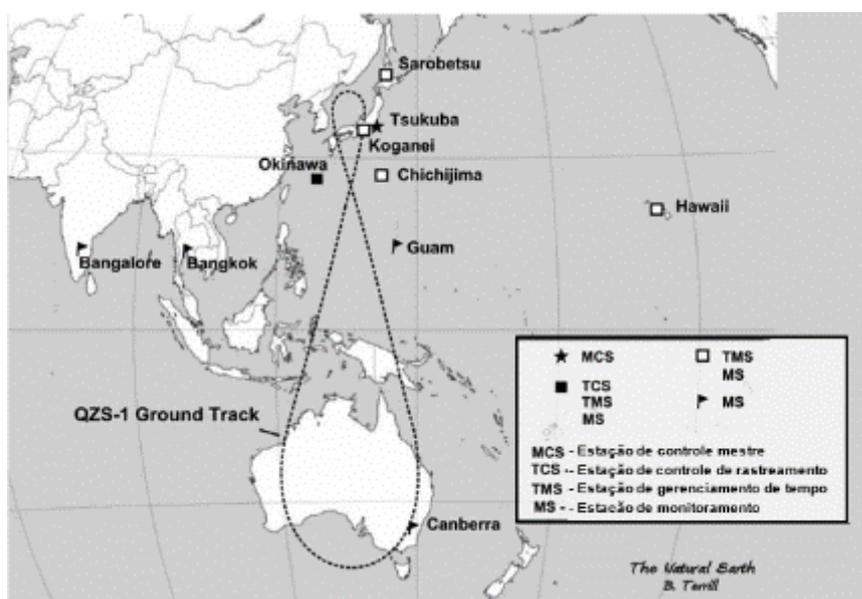
Figura 8 – Órbita IGSO da constelação QZSS



Fonte: Cabinet Office (2022)

O segmento de controle do QZSS é composto por cinco subsistemas: a *Master Control Station* (MCS), uma rede de *Telemetry, Tracking and Command* (TT&C), *Uplink Station* (ULS), e uma rede de nove *Monitor Station* (MS) e *Time Management Station* (TMS). A distribuição dessas redes pode ser observada na Figura 9.

Figura 9 – Sistema de controle do QZSS



Fonte: Adaptado de Kaplan e Hegarty (2017)

As MS, que são as estações de monitoramento, se encontram distribuídas no território japonês, e tem como função a análise dos sinais QZSS e GNSS, passando os seus produtos do monitoramento para a MCS, que estima e prevê as órbitas e os erros do relógio dos satélites, gerando as mensagens de navegação. As *Tracking Control Stations*, onde estão as TT&C e as ULS, transmitem essas mensagens de navegação e monitoram o estado dos satélites, sendo o TMS responsável por comunicar o tempo deste sistema.

O segmento de usuário conta com a oferta de sinais que são compatíveis com outras constelações GNSS, em especial o GPS, sendo também considerada um sistema de aumento para esta constelação. Sendo assim, é garantida a interoperacionalidade entre os sistemas GNSS disponíveis e o QZSS (CABINET OFFICE, 2022).

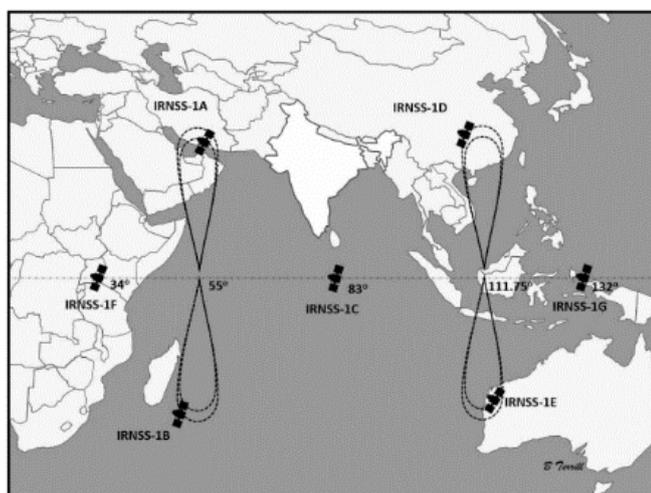
2.2.5.2 Indian Regional Navigation Satellite System (IRNSS)

Indian Regional Navigation Satellite System (IRNSS), é um sistema regional militar e civil operado pelo governo indiano com o intuito de promover informações de posicionamento mais precisas e adequadas a Índia e a região que se estende até 1.500 km de seu limite (Figura 10) (ISRO, 2022)

Em 2016, o sistema foi renomeado para NavIC (*Navigation with Indian Constellation*). O sistema consiste, atualmente, em sete satélites, sendo três satélites em órbita geostacionária, a 32,5°E, 83°E e 129,5°E respectivamente, e quatro satélites em órbita geossíncrona inclinada com cruzamento equatorial de 55°E e 111,75°E respectivamente, com inclinação de 29°, de modo a obter dois satélites em cada plano (PAN *et al.*, 2022; RETHIKA *et al.*, 2015).

Os lançamentos dos satélites iniciaram em 2013, se estendendo até 2016, completando os satélites (SANTRA *et al.*, 2019). De acordo com Kaplan e Hegarty (2017), o governo indiano tem a intenção futura de atualizar a constelação de 7 para 11 satélites ou iniciar o desenvolvimento do satélite de próxima geração, que possivelmente adicionará os sinais de navegação da banda L1.

Figura 10 – Órbitas do IRNSS



Fonte: Adaptado de Kaplan e Hegarty (2017).

O segmento terrestre consiste nas estações IRNSS *Ranging and Integrity Monitoring* (IRIMS) e ISRO *Navigation Center* (INC) (KAPLAN; HEGARTY, 2017). As estações IRIM recebem os dados dos satélites e transmitem ao INC. O INC controla o sistema IRNSS e também mantém a referência de tempo precisa com o centro de temporização da rede IRNSS. Os centros de *uplink* de navegação que fazem parte do *Spacecraft Control Facility* (SCF) atualizam a navegação dados usando Telemetria, Rastreamento e Comando (TTandC) (MUKESH *et al.*, 2019).

O IRNSS fornecerá dois tipos de serviços, o Serviço de Posicionamento Padrão (SPS) que é fornecido a todos os usuários e o Serviço Restrito (RS), que é um serviço criptografado fornecido apenas aos usuários autorizados (PAN *et al.*, 2022). Espera-se que o Sistema IRNSS forneça uma precisão de posição superior a 20 m na área de serviço primária (ISRO, 2022; KAPLAN; HEGARTY, 2017). Esses dois serviços são fornecidos tanto na banda L5 (1176,45 MHz) quanto na banda S (2498,028 MHz).

2.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE AS OBSERVÁVEIS GNSS

A partir dos dados GNSS podem ser obtidos algumas grandezas observáveis, sendo essas: pseudodistância, fase da onda portadora, SNR (*Signal to Noise Ratio* – Razão Sinal Ruído) e *Doppler*. Contudo, as observáveis pseudodistância e fase da onda portadora são os dois tipos mais usados e dos quais derivam diversos algoritmos de posicionamento (GEMAEL; ANDRADE, 2003).

2.3.1 Pseudodistâncias

As observáveis pseudodistâncias são mensuradas em unidade de tempo, representando o tempo de viagem (ΔT) da onda eletromagnética se propagar do centro de fase da antena de satélite (no momento da emissão) para o centro de fase do receptor (no momento da recepção). O tempo de viagem multiplicado pela velocidade da luz no vácuo (c) resulta na distância aparente entre o satélite e o receptor GNSS (D), conforme Equação 1.

$$D = c * \Delta T \quad (1)$$

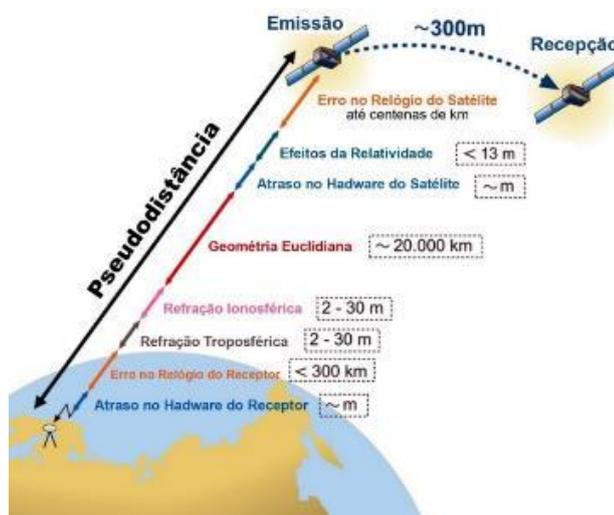
Entretanto, existe a incidência de efeitos no sinal que implicam em erros, sendo necessário a realização das devidas compensações e correções (Figura 11). Assim,

a medição da pseudodistância (PS_r^s) (Equação (2)) é composta de parcelas, referentes (MONICO, 2008):

- à distância geométrica entre os centros de fase da antena de satélite e da antena receptora no tempo de emissão e recepção (ρ_r^s);
- aos erros de refração, pois o sinal não viaja no vácuo;
- aos erros de sincronismo entre os relógios do receptor (dt_r) e do satélite (dt^s), fazendo com que os sinais nos satélites, bem como as suas réplicas nos receptores, sejam gerados fora da escala temporal de referência GNSS (T);
- aos atrasos de propagação do sinal através da atmosfera (Ionosfera – I_r^s ; e Troposfera – T_r^s);
- ao ruído multicaminho (dm_r^s),
- ao erro da medida da pseudodistância devido a atrasos instrumentais do receptor e do satélite ($\varepsilon_{PD_r^s}$).

$$PS_r^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + I_r^s + T_r^s + dm_r^s + \varepsilon_{PD_r^s} \quad (2)$$

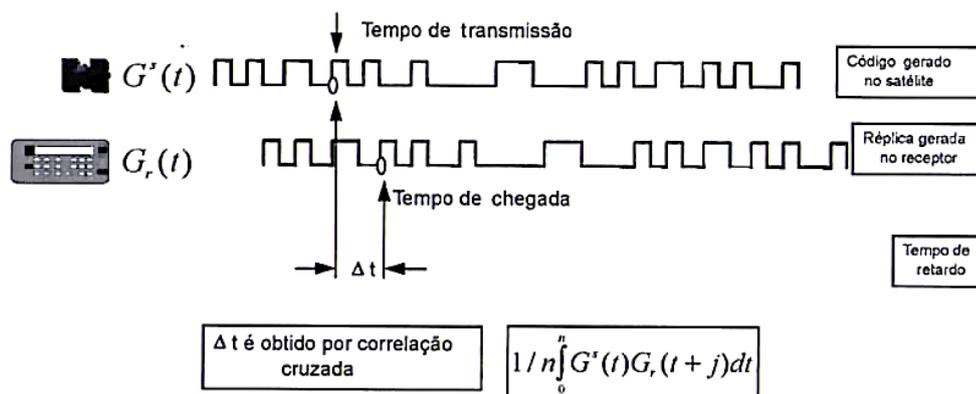
Figura 11 – Determinação do tempo de viagem do sinal.



Fonte: Adaptado de Subirana; Zornoza; Hernández–Pajares (2013).

A Figura 12 representa o código recebido do satélite (G^s) com uma réplica do mesmo gerado no receptor (G_r). O código recebido fica desalinhado em relação ao código do receptor, pois gasta um tempo para viajar entre as antenas do satélite e do receptor (MONICO, 2008). Ao atrasar em tempo o código do receptor até que se alinhe com o código recebido, tem-se a medida do tempo de viagem do sinal, obtendo a correlação máxima.

Figura 12 – Determinação do tempo de viagem do sinal.

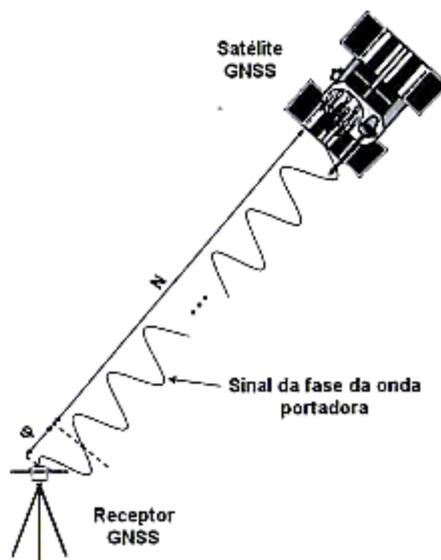


Fonte: Monico (2008).

2.3.2 Fase da Onda Portadora

A distância entre o satélite e o receptor pode ser obtida diretamente a partir do próprio sinal da onda portadora (L_1 , L_2 e L_5), sendo expressa em unidades de ciclos da onda. A grandeza mensurável pela fase da onda portadora é a diferença de fase entre o sinal do receptor e o sinal recebido (Figura 13). Para isso, o receptor gera um sinal de frequência igual a de uma das portadoras dos sinais dos satélites.

Figura 13 – Ilustração da fase da onda portadora.



Fonte: Monico (2008).

A fase da onda portadora (ϕ_r^s) é composta de parcelas, podendo ser representada pela Equação (3) (MONICO, 2008):

$$\phi_r^s(t) = f \left(\frac{\rho_r^s - I_r^s + T_r^s + dm_r^s}{c} \right) + f[dt_r(t) - dt^s] + [\phi_r^s(t_0) - \phi_r(t_0)] + N_r^s + \varepsilon_{\phi_r^s} \quad (3)$$

Sendo:

- a) f – Frequência;
- b) ρ_r^s – Distância geométrica entre os centros de fase da antena de satélite e da antena receptora no tempo de emissão e recepção;
- c) I_r^s – Atrasos de propagação do sinal através Ionosfera
- d) T_r^s – Atrasos de propagação do sinal através Troposfera;
- e) dm_r^s – Ruído multicaminho;
- f) c – Velocidade da luz no vácuo;
- g) dt_r – Erro de sincronismo do relógio do receptor;
- h) dt^s – Erro de sincronismo do relógio do satélite;
- i) ϕ_r^s – Fase da onda gerado no satélite;
- j) t_0 – Instante de recepção do sinal;
- k) ϕ_r – Fase gerada no receptor;
- l) N_r^s – Ambiguidade da fase;
- m) $\varepsilon_{\phi_r^s}$ – Erro da medida da fase de onda.

O emprego da fase da onda portadora permite o posicionamento de alta precisão (da ordem de milímetros), mas podem apresentar ambiguidade – que representa o número de ciclos (inteiros), do instante da primeira observação, entre as antenas do satélite e do receptor – cada vez que o receptor perde o sinal, produzindo saltos ou descontinuidades de alcance.

2.3.3 Combinações lineares das observáveis GNSS

Existem diferentes erros que incidem sobre as observáveis GNSS, os quais podem ser causados pela instabilidade do satélite em sua órbita, pela refração atmosférica e pelas instabilidades dos osciladores dos satélites e receptores. No entanto, ao se utilizar duas ou mais estações que rastreiam simultaneamente os mesmos sinais emitidos pelos mesmos satélites, esses erros podem ser correlacionados e parcialmente eliminados.

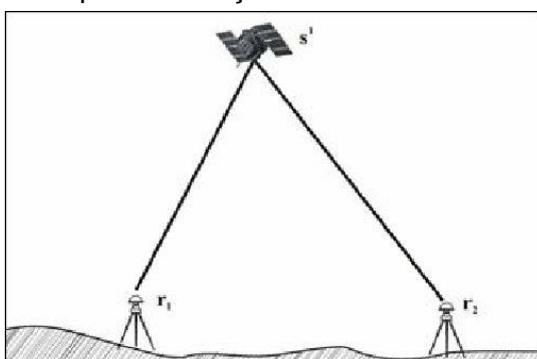
Diferentes combinações de observações GNSS são possíveis, tais como simples diferenças entre receptores, duplas diferenças entre receptores e satélites, e triplas

diferenças entre receptores, satélites e épocas diferentes de medição. Neste trabalho, as combinações mencionadas serão a simples e dupla diferença.

2.3.3.1 Simples diferença

A Simples Diferença (SD) pode ser formada entre dois receptores, dois satélites e duas épocas. Em relação a diferença entre dois receptores, a suposição fundamental é que os receptores rastreiam simultaneamente o mesmo satélite (Figura 14).

Figura 14 - Simples diferença formada entre dois receptores.



Fonte: Polezel, Souza e Monico (2008)

A simples diferença obtida para a pseudodistância entre duas estações é dada na Equação (4) (MONICO, 2008):

$$\Delta PS_{1,2}^1 + v_{PDSD} = \Delta \rho_{1,2}^1 + c(dt_1 - dt_2) \quad (4)$$

Onde:

$$\Delta \rho_{1,2}^1 = \rho_1^1 - \rho_2^1 \quad (5)$$

Em que v_{PDSD} corresponde aos resíduos de observação referentes aos efeitos dos sinais refletidos e de outros erros. Nesta observação, o erro do relógio dt^s presente na Equação (2) foi eliminado. Além disso, erros devidos à posição do satélite e a refração atmosférica são minimizados, em especial em bases curtas, onde os efeitos da ionosfera e troposfera são similares em cada estação.

Em relação a fase de onda portadora pode-se apresentar a Equação (6) (MONICO, 2008):

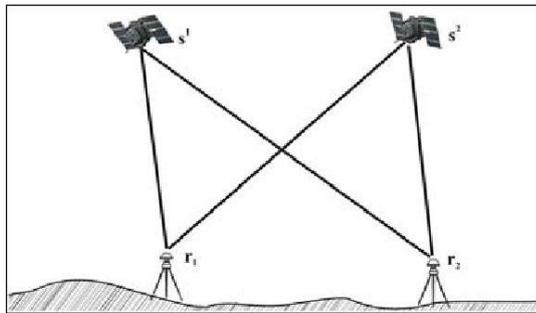
$$\Delta\phi_{1,2}^1 + v_{SD\phi} = \frac{f^{S1}}{c} \Delta\rho_{1,2}^1 + f^{S1}[dt_1 - dt_2] + [\phi_1(t_0) - \phi_2(t_0)] + (N_1^1 - N_2^1) \quad (6)$$

Pode-se observar que o erro do relógio dt^S e a fase inicial do satélite, correspondente a época de referência t_0 ($\phi_t^1(t_0)$), ambos presentes na Equação (3) foram eliminados.

2.3.3.2 Dupla diferença

A Dupla Diferença (DD) corresponde a diferença entre duas SDs, envolvendo, portanto, dois receptores e dois satélites (Figura 15).

Figura 15 - Dupla Diferença entre dois receptores.



Fonte: Polezel, Souza e Monico (2008)

Sendo assim a Equação (7) apresenta a DD para pseudodistância (MONICO, 2008):

$$\Delta PS_{1,2}^{1,2} + v_{PRDD} = \Delta\rho_{1,2}^1 - \Delta\rho_{1,2}^2 \quad (7)$$

De forma similar, a equação correspondente para a fase de onda portadora é (Equação (8) (MONICO, 2008):

$$\Delta\phi_{1,2}^{1,2} = \frac{f}{c} (\Delta\rho_{1,2}^1 - \Delta\rho_{1,2}^2) + N_{1,2}^{1,2} + v_{\phi DD} \quad (8)$$

Onde:

$$N_{1,2}^{1,2} = N_{1,2}^1 - N_{1,2}^2 = N_1^1 - N_2^1 - N_1^2 + N_2^2 \quad (9)$$

A característica mais importante das DD é que nas combinações entre duas SD os termos que representam as combinações da fase inicial dos receptores e os erros dos relógios dos receptores (dt_1 e dt_2) são eliminados.

Na maioria das vezes a DD é preterida no processamento dos dados envolvendo a fase da onda portadora, pois tende a proporcionar melhor relação entre o ruído resultante da combinação e a eliminação dos erros sistemáticos envolvidos nas observáveis originais.

2.4 ERROS SISTEMÁTICOS DO GNSS

Os erros sistemáticos² devem ser uma preocupação em qualquer tipo de aferição, pois é necessário alcançar uma acurácia coerente para finalidade estudada. Do ponto de vista da tecnologia GNSS, as origens dos erros sistemáticos que afetam o posicionamento estão localizadas nos satélites, no receptor e no meio em que as ondas se propagam.

Segundo Gemael e Andrade (2003), o tratamento dos erros sistemáticos pode ser realizado de três maneiras:

- a) pré-correção das observações através de fórmulas ou de tabelas definidas por modelos matemáticos, sendo possível identificar e ajustar as observações;
- b) parametrização do modelo matemático por meio da inclusão do erro sistemático, e os coeficientes desconhecidos são tratados como parâmetros incógnitos na solução do problema; e
- c) uso de métodos de observação que eliminem os erros sistemáticos.

A Tabela 3 apresenta os diversos erros agrupados pelas fontes: satélite, propagação do sinal, receptor/antena e estação.

² Erros sistemáticos são os erros decorrentes de causas conhecidas e sistemáticas, podendo ser atribuídos a influências ambientais, a vício de equipamento ou mesmo do operador e tendem a se acumular

Tabela 3 – Fontes e efeitos dos erros envolvidos no GNSS.

Fontes	Erros
Satélite	Erro da órbita Erro do relógio Relatividade Atraso entre as duas portadoras no hardware do satélite Centro de fase da antena do satélite Fase <i>wind-up</i>
Propagação do Sinal	Refração troposférica Refração ionosférica Perdas de ciclos Multicaminhos ou sinais refletidos Rotação da Terra
Receptor/Antena	Erro do relógio Erro entre os canais Centro de fase da antena do receptor Atraso entre as duas portadoras no hardware do receptor Fase <i>wind-up</i>
Estação – alguns erros são, na realidade, efeitos geodinâmicos que devem ser corrigidos	Erro nas coordenadas Multicaminho ou sinais refletidos Marés terrestres Movimento do polo Carga oceânica Pressão da atmosfera

Fonte: Monico (2008).

2.4.1 Erros da Órbita

O erro da órbita é calculado através da diferença entre a órbita previamente determinada para garantir o uso imediato (efemérides preditas) e a efetivamente realizada pelo satélite (efemérides precisas) (GEMAEL; ANDRADE, 2003).

A partir de 2000, as efemérides preditas pelo IGS passaram a ser denominadas de IGU (ultrarrápida), proporcionando precisão da ordem de 5 a 10 cm, e sendo disponibilizadas quatro vezes ao dia. Quanto à acurácia, as efemérides preditas podem alcançar de 1 a 3 m. Já as efemérides precisas IGS (*International GNSS Service*) e IGR (*International GNSS Service – Rapid*), resultantes de pós-processamento, possuem acurácia estimada de 2 a 5 cm, e ficam disponíveis em uma semana e 17 horas, concomitantemente (MONICO, 2008).

2.4.2 Erros nos Relógios

O erro do relógio corresponde as diferenças entre o tempo dos relógios e o tempo do GNSS, podendo ter causas naturais ou propositais. Os relógios atômicos presentes nos satélites, embora altamente precisos, não acompanham o sistema de tempo a eles associados. A diferença pode chegar, no GPS, a 1 milissegundo (tempo que a luz percorre 300 km).

A eliminação dos erros dos relógios dos satélites pode ser realizada através do uso do método de posicionamento relativo, pois, por meio do processamento dos dados, os erros dos relógios dos satélites e dos receptores são cancelados. Esse princípio é utilizado de maneira similar pelas constelações GLONASS e Galileo. Já no posicionamento por ponto, os erros dos relógios dos receptores devem ser estimados em cada época (MONICO, 2008).

2.4.3 Erros Relacionados com a Propagação do Sinal

O caminho de sinal do satélite até o receptor atravessa a atmosfera terrestre que é composta por diversas camadas, provocando variações na direção e na velocidade de propagação, além de alterar a polarização e a potência do sinal (SEEBER, 2003). As principais camadas onde ocorrem principalmente os efeitos da refração no posicionamento GNSS são a troposfera e a ionosfera, que possuem propriedades bastante distintas.

2.4.3.1 Refração Troposférica

A troposfera é a camada atmosférica localizada desde a superfície da Terra até uma altitude de cerca de 60 km. A principal característica da troposfera é ser um meio não dispersivo em relação às ondas eletromagnéticas até 15 GHz; ou seja, os efeitos da refração troposférica não são dependentes da frequência dos sinais GNSS. Assim, as medições da fase de onda portadora e do código são afetadas pelo mesmo atraso (SUBIRANA, ZORNOZA, HERNÁNDEZ-PAJARES, 2013).

Contudo, o atraso devido a refração troposférica não pode ser removida por combinações de medições de dupla frequência (como é feito com a refração ionosférica). A única forma de mitigar o efeito troposférico é utilizar modelos e/ou

estimá-lo a partir de dados de observação. No entanto, a maior parte da refração troposférica (cerca de 90%) provém da componente hidrostática previsível (LEICK, 1994).

O efeito da troposfera sobre os sinais GNSS provoca um atraso na medição do sinal e depende da temperatura, da pressão e da umidade, bem como da localização do transmissor e da antena receptora. Esses efeitos têm relação com a massa gasosa que se concentra nas camadas mais baixas da atmosfera terrestre, podendo ser dividida em duas componentes (SUBIRANA, ZORNOZA, HERNÁNDEZ-PAJARES, 2013):

- a) hidrostática – causado pelos gases secos presentes na troposfera (78% N₂, 21% O₂, 0,9% Ar etc.). O efeito varia com a temperatura local e a pressão atmosférica de uma forma bastante previsível, embora a variação seja inferior a 1% ao longo de algumas horas. Os erros dessa componente no zênite podem alcançar 2,3 m;
- b) úmida – causado pelo vapor de água e água condensada sob a forma de nuvens e, portanto, depende das condições meteorológicas. O atraso em excesso é pequeno neste caso, apenas algumas dezenas de centímetros, mas este componente varia mais rapidamente do que a componente hidrostática e de forma bastante aleatória, sendo, assim, muito difícil de ser modelado. Os erros dessa componente no zênite podem alcançar 0,35 m.

2.4.3.2 Refração Ionosférica

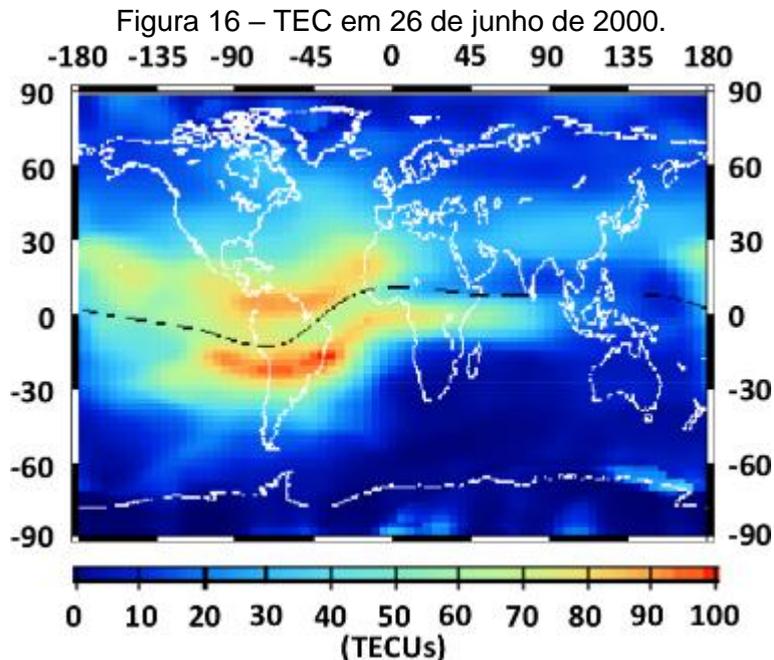
A ionosfera, como o nome sugere, é um meio parcialmente ionizado, como resultado dos raios-X solares, da radiação solar ultravioleta extrema e da incidência de partículas carregadas, sendo a parte da atmosfera terrestre que se estende a altitude, aproximadamente, de 60 km até 2000 km (CALDEIRA, 2016).

A velocidade de propagação dos sinais eletromagnéticos do GNSS na ionosfera depende da densidade de elétrons presentes ao longo do caminho percorrido pelo sinal entre o satélite e o receptor. Assim, o efeito ionosférico é proporcional ao Conteúdo Total de Elétrons (TEC – *Total Electron Contents*), tipicamente impulsionado por dois processos principais (MONICO, 2008; SUBIRANA, ZORNOZA, HERNÁNDEZ-PAJARES, 2013):

- a) durante o dia – a radiação do sol ioniza átomos neutros para produzir elétrons e íons livres;
- b) durante a noite – prevalece o processo de recombinação, onde os elétrons livres são recombinados com íons para produzir partículas neutras, o que leva a uma redução da densidade de elétrons.

A TEC e, conseqüentemente, a refração ionosférica, depende da localização geográfica do receptor, da hora do dia e da intensidade da atividade solar, da variação sazonal (estações do ano – equinócio e solstício), da anomalia equatorial, de bolhas de plasma, erupções solares e cintilação ionosférica (MONICO, 2008; SUBIRANA, ZORNOZA, HERNÁNDEZ-PAJARES, 2013).

A Figura 16 mostra um mapa da distribuição geográfica do TEC, onde mostra que a alta atividade ionosférica são claramente representadas em torno do equador geomagnético, e nota-se que a região brasileira é um dos locais que apresentam os maiores valores e variações espaciais do TEC. Este fator retrata a dificuldade de modelar os efeitos da refração ionosférica para corrigir as informações de posicionamento no Brasil.



Fonte: Subirana; Zornoza; Hernández-Pajares (2013).

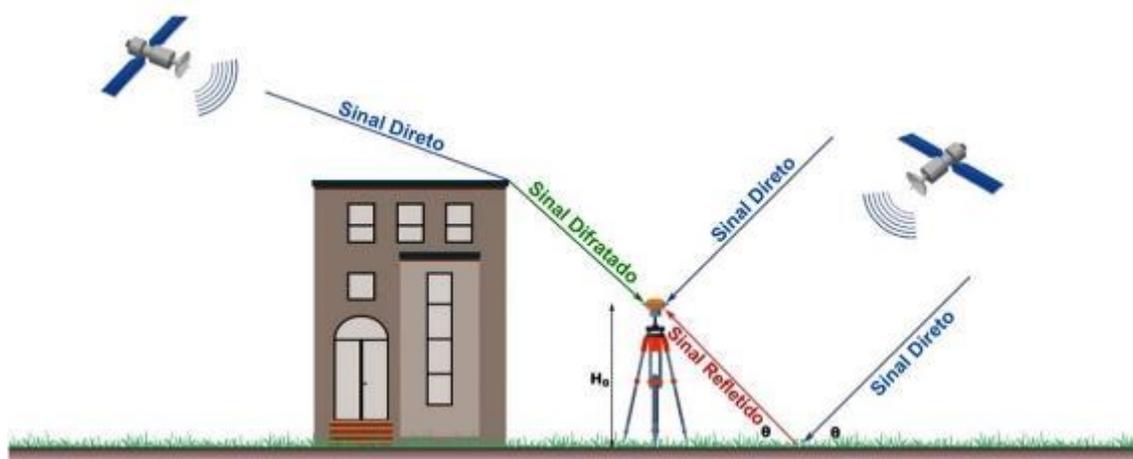
2.4.4 Multicaminhos

Multicaminho é gerado quando sinais refletidos em diferentes superfícies chegam até a antena (Figura 17). A principal causa é a proximidade da antena em relação às estruturas refletoras, tais como: construções, carros, árvores, corpo d'água, cercas etc. Existem alguns fatores que implicam na ocorrência do multicaminho, como: o ângulo de elevação do satélite; a refratividade do meio onde se posiciona a antena; as características da antena; técnicas utilizadas nos receptores para reduzir os sinais refletidos; o local (HUNEGNAW; TEFERLE, 2022).

As reflexões podem ocorrer de três formas:

- difração – vinda de reflexões nas bordas e nos cantos dos objetos refletoras;
- reflexão especular – vinda da reflexão em uma superfície lisa;
- reflexão difusa – vinda da reflexão em superfícies rugosas, semelhante a reflexões especulares.

Figura 17 – Geometria do multicaminho, correspondente a interferência entre o sinal direto e o refletido, mostrado na superfície horizontal idealizada, onde H_0 é a altura da antena GNSS.



Fonte: Adaptado de Hunegnaw; Teferle (2022).

Muitos estudos têm sido dedicados a compreender os efeitos de multicaminhamento nas estimativas de posição do local (ELÓSEGUI *et al.*, 1995; JALDEHAG *et al.*, 1996; LARSON; BILICH; AXELRAD, 2007; DILSSNER *et al.*, 2008). Estes estudos apontam que o ambiente de dispersão na região próxima a antena pode introduzir erros na coordenada vertical estimada da ordem de centímetros ou mais, mas não têm efeitos significativos nas coordenadas horizontais. Para um receptor de

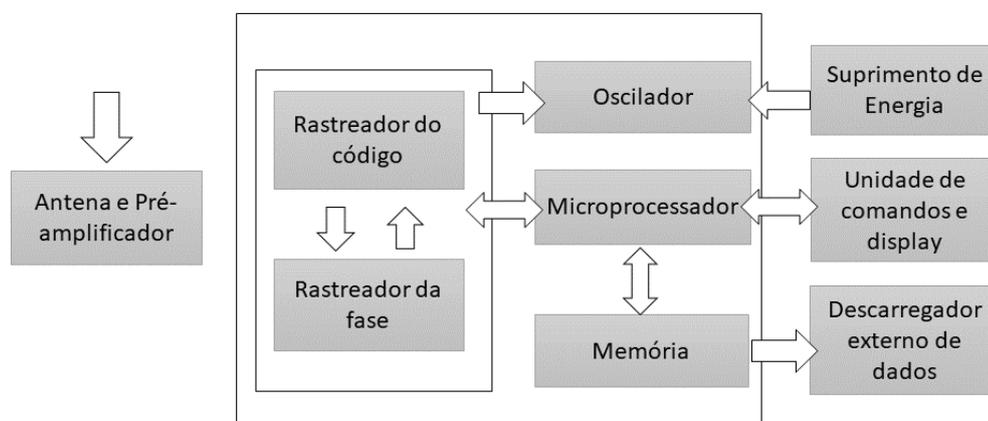
baixo custo, que se baseia em observações de código, o erro de multicaminho é muito significativo e pode atingir dezenas de metros (WELLS *et al.*, 1987; BRAASCH, 1996).

2.5 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Muitos objetos do cotidiano possuem receptores GNSS embutidos, como smartphones, câmeras e automóveis. Os primeiros receptores utilizados eram dispositivos analógicos com aplicações militares, grandes e pesados. O receptor é responsável pela interação entre o usuário e o sistema, recebem os sinais oriundos dos satélites, sintonizam os satélites visíveis, decodificam o sinal e fazem os cálculos requeridos (SOUZA, 2005; KAPLAN, 2017).

Os componentes básicos de um receptor genérico são (Figura 18): antena, seção de radiofrequência (RF), microprocessador, oscilador, interface com o usuário, provedor de energia e memória para armazenamento (MONICO, 2008).

Figura 18 – Componentes básicos do receptor GPS.



Fonte: Monico (2008)

Os elementos básicos podem variar em seu formato, estilo, quantidade e funcionamento de acordo com o seu receptor. Devido a essa grande variedade, na Tabela 4 estão resumidas as principais funções de cada elemento, conforme informações consolidadas nos trabalhos de Seeber (2003) e de Monico (2008).

Tabela 4 – Elementos de um receptor GPS.

Elemento	Função
Antena	Detecta as ondas eletromagnéticas emitidas pelos satélites, converte a energia da onda em corrente elétrica, amplifica o sinal e envia para o receptor.
Seção de RF	Os sinais que entram no receptor são convertidos na divisão de RF para uma frequência mais baixa, ou frequência intermediária (FI), para facilitar as operações.
Canais (rastreador de sinais)	Onde o sinal FI é trabalhado. Rastreiam os satélites visíveis. Os receptores podem ser divididos entre multicanais, sequenciais e multiplexados.
Oscilador	Gera uma réplica do código recebido para cálculo do atraso do sinal.
Microprocessador	Necessário para o controle das operações de obtenção e processamento do sinal, decodificação da mensagem de navegação, controle dos dados de entrada e saída, entre outros.
Interface com o usuário	Display e teclado para permitir a interação do usuário com o receptor.
Energia	A energia é mantida através de bateria interna recarregável, podendo ter a adição de uma bateria externa.
Memória	Todos os dados devem ser salvos em dispositivos de memória internos ou externos para o seu pós-processamento. Os dados podem ser gravados na memória interna, externa, em microcomputadores conectados ao receptor, ou transmitidos para a estação base por meio de um link de dados apropriados.

Fonte: Adaptado de Seeber (2003), Monico (2008).

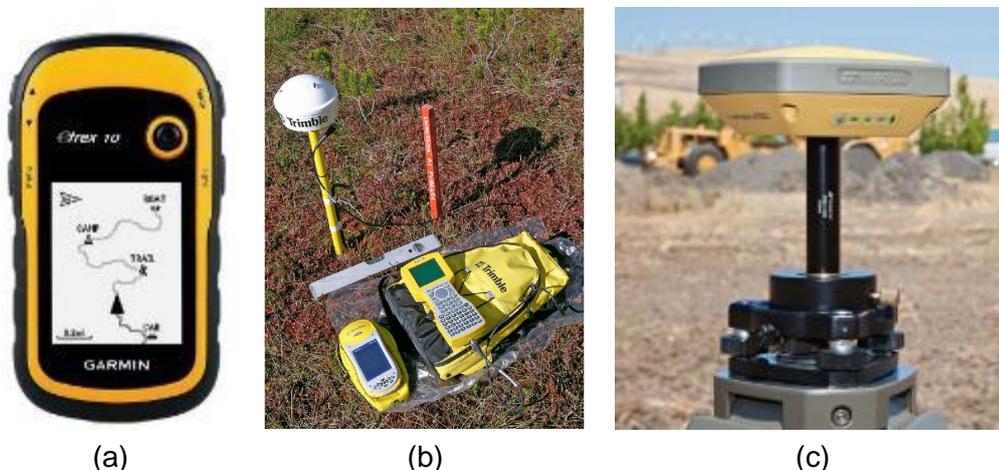
Os receptores podem ser classificados segundo diversos critérios. De acordo com o usuário, pode ser classificado como receptor de uso civil ou militar. Dependendo da sua aplicação, pode ser um receptor de navegação, geodésico ou topográfico. E também existe a classificação de acordo com o tipo de dados e suas combinações disponíveis: Código C/A, Código P, Portadora L1 ou Portadora L2 (SOUZA, 2005).

Os receptores de navegação (Figura 19a) apresentam pelo menos uma frequência (L1) com o código C/A e produzem uma solução, em tempo real, indicada pelo visor ao usuário do sistema. Apresentam pouca precisão em relação aos demais e são aplicados para levantamentos de pequena escala e de menor precisão exigida (ANTUNES, 1995; KRUEGER, 1996, TRAGUETA 2008).

Os receptores geodésicos (Figura 19c), diferente dos de navegação, podem receber a fase dos códigos e das portadoras. É possível obter precisão de poucos decímetros, para medidas do código C/A, e para a medida da fase das portadoras, atingindo o nível de milímetro quando verificada a solução das ambiguidades.

Atividades indicadas para esse tipo de receptor são as geodésicas de alta precisão (ANTUNES, 1995; KRUEGER, 1996, TRAGUETA 2008).

Figura 19 – (a) GPS de Navegação; (b) GPS topográfico; (c) GPS Geodésico.



(a)

(b)

(c)

Fonte: Garmin (s.d.); Tomaselli (2018); Topcon (s.d.).

O mercado dos receptores se atualiza com grande velocidade. Para escolher o melhor modelo é importante entender o objetivo do uso e os parâmetros a serem monitorado, a fim de encontrar o mais apropriado. Kaplan (2017) apresenta uma amostra de questionamentos que podem ser considerados para a seleção dos instrumentos como por exemplo: O levantamento exige uma boa portabilidade para deslocamento em campo? O consumo de energia é suficiente? O tamanho físico é adequado? É necessário a conversão do sistema de coordenadas? O receptor contém as transformações? Como é o espaço físico do levantamento? Existe muita interferência do sinal?

No âmbito acadêmico é recorrente a realização de pesquisas que tentam medir e comparar a acurácia e a qualidade dos dados usando diferentes receptores para diversas aplicações (SILVA; SILVA; FREITAS, 2000; TRAGUETA, 2008; ARAÚJO, 2019; DIAS, 2019). Esses trabalhos podem ser fonte de maior entendimento sobre a diferença entre os receptores GNSS.

2.6 SISTEMA GEODÉSICO DE REFERÊNCIA E SISTEMA DE COORDENADAS

Anteriormente ao surgimento dos satélites artificiais, a Geodésia era limitada ao campo “bidimensional”, as coordenadas geodésicas de um ponto eram tradicionalmente duplas (latitude e longitude). Na época as coordenadas se referiam a projeção de Helmert do ponto sobre a superfície do modelo. Não era possível

considerar a altitude ortométrica obtida do nivelamento como uma terceira coordenada coerente, pois concerne ao geoide (GEMAEL; ANDRADE, 2003).

Os avanços nas técnicas geodésicas espaciais levaram ao desenvolvimento de modelos representativos da Terra. Com isso, atualmente, essa dicotomia foi sanada. A Geodésia Celeste disponibiliza as coordenadas cartesianas de um ponto da superfície física da Terra referidas a um terno ortogonal geocêntrico, sendo, então, transformadas em geodésicas esféricas – latitude, longitude e altitude geométrica (GEMAEL; ANDRADE, 2003).

Existem diversos sistemas de referência geodésico para localizar qualquer detalhe na superfície da Terra. Esses sistemas de referência são representações geométricas da superfície da Terra que permitem que cada ponto da superfície tenha um conjunto específico de coordenadas, como (X, Y, Z).

O Sistema de Referência Geodésica (SGR) é muito importante e pode ser delineado por cinco parâmetros, sendo dois parâmetros definidores do elipsoide de referência e três parâmetros definidores da orientação desse modelo em relação ao corpo terrestre – podendo ser as componentes principais do desvio da vertical e a ondulação do geoide.

O sistema geodésico moderno utiliza como base um elipsoide de rotação, cuja origem coincide com o centro de gravidade da Terra e o eixo de rotação, que coincide com o eixo de rotação da Terra. Este sistema pode ser criado a partir de uma rede de estações geodésicas com coordenadas tridimensionais. Essas coordenadas são criadas usando técnicas de posicionamento espacial altamente precisas (MONICO, 2008).

Existem redes geodésicas verticais e horizontais. As verticais são compostas de pontos implantados na superfície física da Terra. Cada um desses pontos é chamado de Referência de Nível e sua altura ortométrica (H) é determinada por nivelamento geométrico de precisão, relacionado a Rede Altimétrica de Alta Precisão (RAAP), cujo órgão responsável é o IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística).

Pode-se afirmar que a materialização do Sistema de Referência Geodésico se dá por meio de um conjunto de pontos implantados na superfície terrestre em coordenadas conhecidas. A realização do SGR é disponibilizada a partir da publicação deste conjunto de coordenadas. Existem vários sistemas de referência. No Brasil, o IBGE recomenda que as medições planimétricas estejam referenciadas no SGB (Sistema Geodésico Brasileiro) conhecido como SIRGAS2000 (IBGE, 2005).

Define-se por SGB o conjunto de pontos geodésicos implantados na porção da superfície terrestre delimitada pelas fronteiras do país. Em outras palavras é o sistema no qual estão referenciadas todas as informações espaciais no Brasil, Resolução PR número 22 de 21 de julho de 1983 (IBGE, 1983).

O SIRGAS2000 oferece suporte ao WGS84 (*World Geodetic System* – Sistema Geodésico Mundial), o padrão de mapa de origem geocêntrica usado pelo GPS. Ressalta-se que o referencial altimétrico do SIRGAS2000 se refere as observações maregráficas tomadas no porto de Imbituba no litoral de Santa Catarina.

Ainda, existem sistemas de coordenadas geodésicas curvilíneas que fornecem valores para pontos na superfície da Terra. Como as coordenadas geodésicas são curvilíneas, seus valores são dados em graus, minutos e segundos (representando latitude e longitude) (RAHAL; BENABADJI; BELBACHIR, 2012).

3 MÉTODOS DE POSICIONAMENTO GNSS

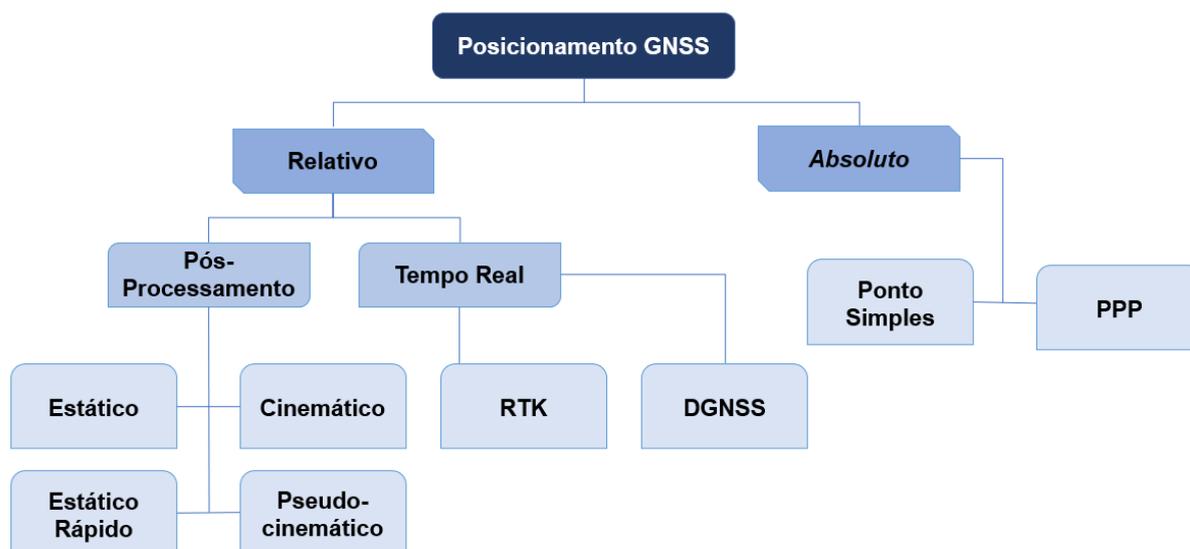
Conforme IBGE (2008), a determinação da posição de um objeto ou feição, relativa a um referencial, por meio dos GNSS, pode ser realizado por diversos métodos e observáveis, que definem a precisão do resultado. Para um posicionamento que se almeje melhor precisão das coordenadas, é indispensável a utilização da fase da medida da portadora. A utilização da pseudodistância é geralmente aplicada à posicionamentos com precisão de ordem métrica.

A determinação da posição pode ser classificada de acordo com o referencial adotado, sendo absoluto quando se refere ao geoide, ou relativo se é considerado um ponto materializado sobre a superfície terrestre (MONICO, 2008). Esta classificação pode ser complementada de acordo com o movimento do objeto, sendo estático quando em repouso e cinemático quando em movimento.

Além disso, tratando-se de métodos de posicionamento, tem-se que são comumente utilizadas informações do tipo tempo real ou pós-processada, as quais se referem ao modo de obtenção das coordenadas do ponto a ser medido. O posicionamento em tempo real corresponde a obtenção das coordenadas praticamente no mesmo instante de tempo em que as observações são realizadas, sendo conhecidos como RTK (*Real Time Kinematic*). O termo pós-processado faz referência a determinação das coordenadas após o processamento das observações, através de técnicas mais rigorosas.

A Figura 20 representa a visão mais clássica dos métodos de posicionamento GNSS. A seguir estão descritos os principais métodos de posicionamento.

Figura 20 – Métodos clássicos de posicionamento GNSS.



Fonte: Autora (2022).

3.1 POSICIONAMENTO ABSOLUTO OU POR PONTO

Monico (2008) afirma que o método de posicionamento absoluto também pode receber a terminologia de posicionamento por ponto. Este método se diferencia em função do tipo de efeméride utilizada, para obter as coordenadas, e das observáveis envolvidas, de modo que o referencial é determinado em relação as informações utilizadas (IBGE, 2008).

O posicionamento por ponto caracteriza-se pela adoção de um único receptor que faz uso das efemérides transmitidas dos satélites, de modo que as coordenadas determinadas estão vinculadas ao sistema de referência do receptor, como por exemplo o WGS84 para o GPS (IBGE, 2008; NAKAO; KRUEGER, 2017).

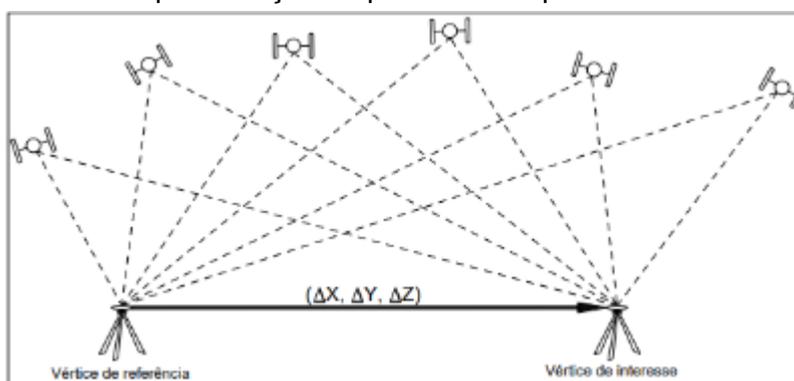
O método absoluto pode ser realizado com as técnicas estática ou cinemática, medidas em tempo real, fazendo uso a pseudodistância, derivada do código C/A presente na portadora L1, e a mensagem de navegação (NAKAO; KRUEGER, 2017).

No caso do Posicionamento por Ponto Preciso (PPP), as observáveis obtidas (códigos e fase de onda portadora) são processadas utilizando as correções dos relógios dos satélites e das efemérides precisas. Essas informações são produzidas e fornecidas pela IGS e/ou outros centros associados, de modo que o sistema de referência utilizado neste tipo de posicionamento é o ITRF 2008 (BURITY, 2016; NAKAO; KRUEGER, 2017).

3.2 POSICIONAMENTO RELATIVO

O posicionamento relativo se dá em função de uma ou mais estações de referência, cujas coordenadas são conhecidas e estão referenciadas ao SGR. O princípio básico desta técnica de posicionamento é minimizar as fontes de erro através da diferença entre observações recebidas simultaneamente por receptores que ocupam duas estações (Figura 21) (IBGE, 2008). Essas diferenças são obtidas por meio de combinações lineares entre as observáveis, conforme apresentado na Seção 2.3.3.

Figura 21 – Representação esquemática do posicionamento relativo.



Fonte: INCRA (2022)

Existem diferentes métodos de posicionamento relativo, os quais surgiram com o objetivo de aproveitar a capacidade do sistema em fornecer coordenadas mais precisas, mesmo após um breve período de coleta de dados. Sendo assim, a classificação apresentada será a adotada por Monico (2008), na qual considera o posicionamento relativo estático, estático rápido, semicinemático (pseudocinemático) e cinemático.

Em relação ao posicionamento relativo estático, os receptores (base e aqueles com coordenadas a serem determinadas) se encontram estacionários durante todo o levantamento e para que a posição seja obtida com alta precisão é necessário um longo tempo de observação, algo na ordem de meia hora a algumas horas, em caso de linhas de base longas (IBGE, 2008; SETTI JÚNIOR *et al.*, 2020). O INCRA (2022) estabelece algumas sugestões para a duração da sessão de obtenção de coordenadas, as quais podem ser observadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Características do posicionamento relativo estático.

Linha de base (km)	Tempo Mínimo (minutos)	Observáveis
0–10	20	L1 ou L1/L2
10–20	30	L1/L2
10–20	60	L1
20–100	120	L1/L2
100–500	240	L1/L2
500–1000	480	L1/L2

Fonte: INCRA (2022).

O posicionamento relativo estático rápido tem funcionamento semelhante ao estático, divergindo apenas no período de observação, em que para este caso o intervalo de rastreamento não excede 20 minutos (SEEBER, 2003). Este tipo de posicionamento é adequado quando se deseja alta produtividade, e se dá como alternativa ao método semicinemático em locais onde há muitas obstruções, pois o receptor móvel é desligado entre as sessões de coleta (IBGE, 2008; MONICO, 2000).

O método de posicionamento relativo semicinemático se configura de forma intermediária entre os métodos estático e cinemático. Esta técnica é considerada similar ao estático rápido, divergindo apenas no tempo de observação para cada estação e no fato de que o receptor precisa permanecer ligado e sincronizado com os mesmos satélites durante o percurso entre uma estação e outra, mas não sendo necessário estabelecer as coordenadas do trajeto (BURITY, 2016).

De acordo com IBGE (2008), o método de posicionamento relativo cinemático consiste na determinação de coordenadas a cada época de observação no deslocamento do receptor sobre uma feição de interesse. Portanto, neste método, embora a antena esteja em movimento, a trajetória é descrita por uma série de pontos. Isso tem como consequência a necessidade da disposição de no mínimo 5 satélites, para que haja redundância e assim seja possível obter as coordenadas dos pontos (NAKAO; KRUEGER, 2017).

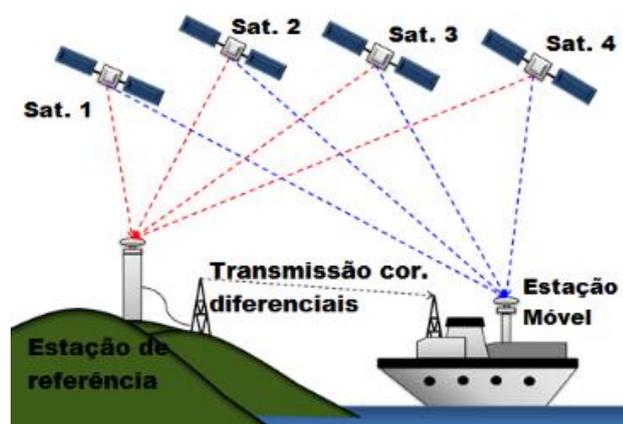
3.3 POSICIONAMENTO DIFERENCIAL GNSS (DGNSS)

O posicionamento diferencial GNSS, da sigla DGNSS, se refere a uma forma de posicionamento relativo, que faz uso de duas estações: a estação de referência, cujas coordenadas são conhecidas, e a estação de interesse (Figura 22). Estando as

estações próximas, tem-se que é possível estabelecer correlações entre os erros envolvidos nas observações coletadas em ambas (SEEBER, 2003).

As observações normalmente empregadas são a pseudodistância e a pseudodistância filtrada pelo código (KRUEGER *et al.*, 2020; MONICO, 2008). Em função das coordenadas conhecidas da estação de referência, pode-se determinar correções a serem aplicadas ao posicionamento da estação de interesse. Essas correções são enviadas em tempo real através de um sistema de comunicação (rádio de transmissão, linha telefônica, ou satélites de comunicação) dentro de um formato apropriado, definido pela *Radio Technical Committee for Maritime Service* (RTCM) (KRUEGER, 1996).

Figura 22 – Representação do Princípio do Posicionamento DGNSS.



Fonte: Krueger *et al.* (2020).

De acordo com Setti Júnior *et al.* (2020), o posicionamento DGNSS possibilita a minimização dos erros dos relógios, das órbitas dos satélites, e da propagação do sinal na atmosfera para linhas de base curtas. Contudo, há outros fatores que interferem na precisão obtida com o posicionamento, podendo-se citar a distância entre as estações (base e móvel) e a qualidade do sistema de comunicação (KRUEGER, 1996).

3.4 POSICIONAMENTO RTK

O método de posicionamento diferencial preciso, mais conhecido com *Real Time Kinematic* (RTK), faz uso dos mesmos conceitos presentes no sistema de posicionamento DGNSS, contudo, o que difere estes dois métodos se refere ao tipo de observável utilizada. No caso do RTK, faz-se uso das correções aplicadas sobre

a fase da onda portadora e por este motivo agrega maior precisão ao levantamento (SETTI JÚNIOR *et al.*, 2020).

Resumidamente, um sistema RTK é composto por dois receptores e as suas respectivas antenas, um link de comunicação (para transmitir e receber correções e/ou observações da estação de referência) e um *software* apropriado para realizar o processamento e validação dos dados.

O volume de dados enviados pelo receptor de referência aumenta em razão da densidade da taxa de atualização de dados, sendo necessária a utilização de sistemas de comunicação capazes de suportar essa transferência, como é o caso das bandas VHF (*Very High Frequency*) ou UHF (*Ultra High Frequency*) no espectro de rádio (MEKIK; ARSLANOGLU, 2009). De acordo com Burity (2016), as informações podem ser transmitidas por meio de protocolos de internet, com o intuito de resolver a limitação de alcance estabelecido pelo *link* de rádio.

Para obter resultados precisos através deste método, pelo menos cinco satélites devem ser rastreados simultaneamente. Contudo, a combinação entre GPS e GLONASS favoreceu a mitigação dessa necessidade, especialmente em áreas densamente arborizadas ou com prédios altos (STEWART; TSAKIRI, 1997)

De acordo com Mekik e Arslanoglu (2009), o método de posicionamento RTK apresenta algumas vantagens frente aos demais, a citar a não necessidade de pós-processamento das informações, elevada precisão e alta produtividade.

Outra forma de utilização do método de posicionamento RTK se dá por meio do levantamento em rede (*Network RTK – NRTK*), estabelecido com o intuito de reduzir os efeitos negativos (redução da acurácia) do aumento do comprimento da linha de base entre as estações (SEEBER, 2003). Sendo assim, é utilizada uma rede de estações de referência que estimam os erros atmosféricos e parâmetros orbitais em tempo real e transmite-os a um usuário dentro da área de cobertura da rede (SETTI JÚNIOR *et al.*, 2020).

3.5 POSICIONAMENTO PÓS PROCESSADO

Dentre as aplicações dos dados GNSS pode não haver a necessidade de acompanhamento em tempo real dos dados, ou seja, as medições brutas são coletadas e armazenadas para pós-processamento. Além disso, pode-se ter o interesse no pós-processamento de informações coletadas em tempo real, de modo

a obter alta precisão das informações, buscando confirmar o que foi observado no posicionamento RTK e/ou entender o fenômeno estudado de maneira mais consolidada.

Assim, o posicionamento pós-processado permite corrigir erros associados ao levantamento. O procedimento ocorre posteriormente a aquisição dos dados coletados, não necessitando da transmissão em tempo real de dados, simplificando bastante a necessidade de configuração do *hardware* mais robusta e, geralmente, resulta em uma solução mais precisa e abrangente em comparação com o posicionamento em tempo real (HOFMANN–WELLENHOF; LICHTENEGGER; COLLINS, 1997).

Além disso, durante o pós-processamento podem ser empregadas mais uma estação de referência, o que ajuda a preservar e/ou aumentar a precisão em grandes áreas de estudo (DABOVE; MANZINO; TAGLIORETTI, 2014).

Nesse sentido, a utilização de dados de redes GNSS em operação contínua, a exemplo da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC), onde os dados podem ser baixados livremente; dependendo da proximidade da rede de receptores GNSS instalados na área de estudo, contribui para eliminar a necessidade de estabelecer a(s) própria(s) estação(ões) base. No pós-processamento é importante o uso da estação RBMC com ao menos dois vértices levantados, na formação de uma rede geodésica. Isso permite a utilização do Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) no ajustamento das observações.

O pós-processamento dos dados é realizado através de softwares especializados para esta tarefa podendo estes serem classificados como comerciais ou científicos. O primeiro grupo faz referência aos programas desenvolvidos para processar os dados de um receptor específico. De maneira geral, este tipo de *software* é adequado para atividades rotineiras de posicionamento, sendo considerado como de fácil utilização (SEEBER, 2003). Além disso, apenas o código executável está disponível para o usuário e os modelos matemáticos básicos geralmente não são documentados em detalhes.

Em relação ao *software* científico, esses tipos de programa oferecem muitas alternativas específicas para o processamento científico. Alguns pacotes incluem opções para determinação de órbita ou estimativa de modelos atmosféricos. O processamento científico requer muita experiência e uma compreensão profunda dos

sinais de GPS e do comportamento de erro. Em alguns casos, o usuário tem acesso ao código-fonte e pode incluir modificações ou novas partes.

Os principais *softwares* científicos utilizados são o Bernese, desenvolvido pela Universidade de Berna, na Suíça, o GAMIT/GLOBK disponibilizado pelo MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) nos Estados Unidos e o GIPSY concebido pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) nos Estados Unidos. As informações estão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Resumo de *softwares* científicos de processamento de dados GNSS.

Bernese	GAMIT/GLOBK	GIPSY
Processamento rápido de pequenos levantamentos GPS, com portadoras L1/L2.	Suporte para diferentes tipos de observáveis GNSS, incluindo código, fase e Doppler.	Resolução de ambiguidade de receptor único usando os produtos de órbita e relógio do JPL para GPS.
Processamento automático de redes de monitoramento contínuo.	Opções para processar dados em tempo real ou pós-processamento.	O processamento contínuo de dados de memória ou arquivos compartilhados suporta operações em tempo real e pós-processamento.
Obtenção de soluções livres no ajustamento de redes (<i>free network solutions</i>).	Possibilidade de modelar e corrigir vários efeitos GNSS, como efeitos atmosféricos, de antena e orbitais.	Suporte completo para a maioria das distribuições Linux e Mac OS X; instalação personalizada em hardware de voo integrado.
Modelagem da troposfera e da ionosfera.	Processamento dados de vários sistemas GNSS, incluindo GPS, GLONASS, Galileo e BeiDou.	Modelagem da troposfera e da ionosfera.
Processamento combinado de observáveis GPS e GLONASS.	Possibilidade de modelar os movimentos de placas tectônicas e ajustar as séries temporais de observáveis GNSS.	Modelagem completa de satélite e sinal GNSS, incluindo GPS, GLONASS, BeiDou, Galileo e QZSS.

Fonte: Bertiger et al. (2020); Dach et al. (2015); GAMIT [s.d.]

3.6 COMPARATIVO ENTRE OS MÉTODOS

Atualmente existem diferentes métodos de posicionamento disponíveis, devendo ser levado em consideração a disponibilidade de tempo, acurácia desejada, disponibilidade de estações, presença de obstáculos, entre outros fatores para a escolha do método mais apropriado para a atividade.

Sendo assim, tem-se o resumo dos métodos de posicionamento (Tabela 7), ressaltando as suas vantagens e desvantagens, o que pode facilitar na tomada de decisão.

Tabela 7 – Vantagens e desvantagens dos métodos de posicionamento GNSS.

Técnica de posicionamento	Vantagens	Desvantagens
Posicionamento por ponto simples	Receptores baratos, usados em smartphones. Não há necessidade de um receptor GNSS de base	Não utilizado para levantamento, precisão e exatidão não suficiente para a maioria das aplicações.
PPP	Alta precisão: pode oferecer precisões de centímetro a decímetro, dependendo das condições do tempo e do equipamento utilizado. Simplicidade: não há necessidade de estações de referência locais. Tempo real: o processamento pode ser feito em tempo real, oferecendo resultados imediatos.	Dependência de internet: o PPP depende de uma conexão confiável e de alta velocidade com a internet para baixar as informações de correção em tempo real. Requer no mínimo 20 minutos para convergência do sinal.
Relativo Estático	Forma muito precisa de levantamento. Os erros de multicaminho são reduzidos através da média ao longo dos 20 minutos de dados coletados. Usado principalmente para estabelecer pontos de controle para mais levantamentos.	Requer pelo menos 20 min de dados sincronizados de dois receptores GNSS estáticos. Baixa produtividade. Como dependem da distância, os erros então se tornam correlacionados. Isso pode ser melhorado através do aumento do tempo de rastreamento e com uso de programas científicos.
Relativo cinemático	Pode oferecer alta precisão (a nível centimétrico), dependendo das condições do tempo e do equipamento utilizado. Não depende de uma conexão de internet para funcionar, tornando-o uma opção mais confiável em áreas remotas ou sem cobertura de internet.	Requer uma estação de referência local. O processamento pode levar mais tempo do que o PPP, já que é necessário calcular as diferenças de tempo e posição entre as duas estações de referência.
DGNSS	Relativamente barato em comparação com o equipamento com fase de onda portadora. A distância do receptor de referência pode ser de até 200 km.	Receptor de referência necessário, ou rede de receptores de referência.
NRTK	Não há necessidade de um receptor GNSS de referência, para que a rede forneça os dados. Normalmente, os receptores de referência estão em locais permanentes, portanto em boas localizações. Taxas de saída de dados em até 100 Hz. As distâncias entre as estações de referência são tipicamente 50 – 70 km de distância – o receptor <i>rover</i> GNSS está posicionado em relação a estes, pois os erros dependentes da distância são modelados e calculados em vez de solução em tempo real.	Grande infraestrutura de receptores de referência necessária. Tipicamente uma abordagem de levantamento nacional.

Fonte: Autora (2023)

4 METODOLOGIA

De acordo com Gil (2002), pesquisas a partir do levantamento bibliográfico visam identificar o conhecimento disponível sobre determinada temática, auxiliar na compreensão do problema e subsidiar a construção de possíveis hipóteses.

Já para Boccato (2006), a pesquisa bibliográfica almeja o levantamento e análise crítica dos documentos publicados sobre uma determinada temática, com intuito de atualizar e desenvolver o conhecimento e colaborar com a realização da pesquisa.

Na visão de Marconi e Lakatos (2010), o estudo de revisão bibliográfica “é um apanhado geral sobre os principais trabalhos já realizados, revestidos de importância, por serem capazes de fornecer dados atuais e relevantes relacionados ao tema.” Ainda, para Amaral (2007), trata-se de uma etapa fundamental em um trabalho científico, pois permite o embasamento teórico para pesquisas futuras.

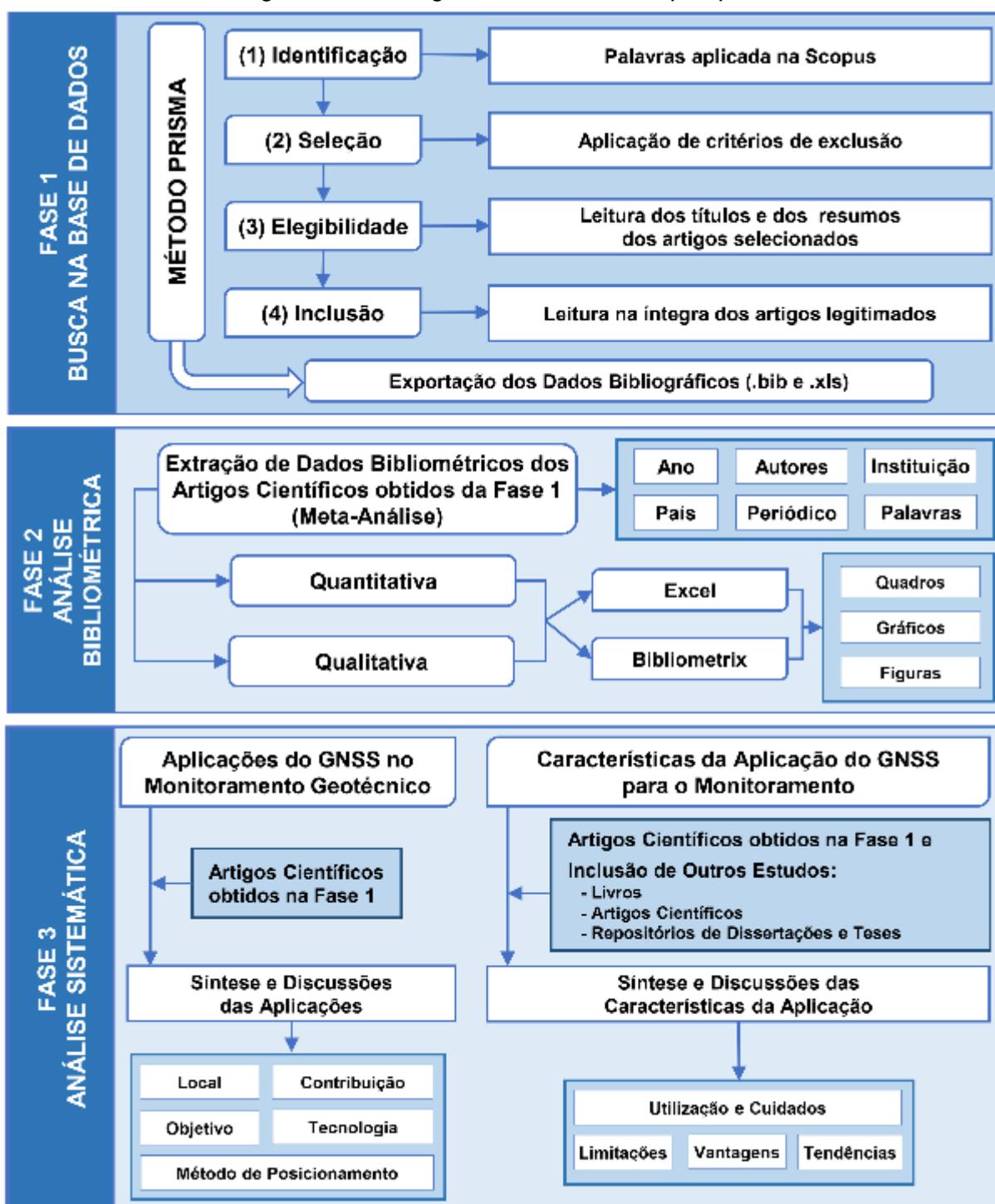
Assim, nota-se a importância de revisões sistemáticas de bibliográficas, pois têm a finalidade de aprimorar e atualizar o conhecimento, a partir de uma investigação científica de obras publicadas.

Diante desse contexto, neste estudo foi aplicado um modelo híbrido, por meio da sistematização de um conjunto de fases e de etapas, que combina técnicas quantitativas e qualitativas para a revisão da literatura e para a análise bibliométrica, adotando as diretrizes de Page *et al.* (2021), buscando investigar as aplicações, os cuidados, as limitações, as vantagens e as tendências sobre a aplicação do GNSS no monitoramento geotécnico.

O trabalho foi dividido em três fases (Figura 23):

- a) (1) Busca na Base de Dados;
- b) (2) Análise Bibliométrica; e
- c) (3) Análise Sistemática.

Figura 23 – Fluxograma sistemático da pesquisa.



Fonte: Autora (2022)

A seguir estão detalhados os procedimentos metodológicos empregados em cada fase desse estudo.

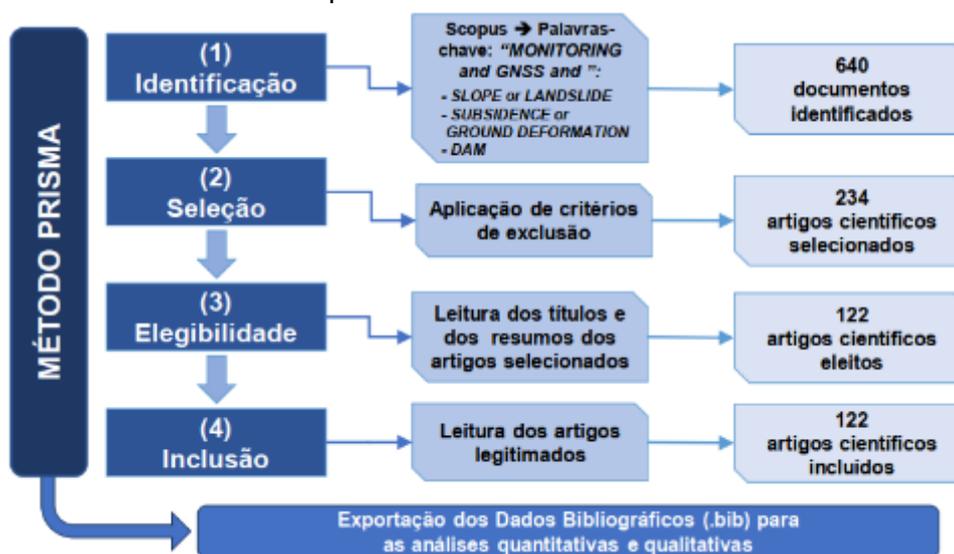
4.1 FASE 1: BUSCA DOS ARTIGOS NA BASE DE DADOS

Para este estudo, utilizou-se a base de dados Scopus, plataforma de ampla abrangência científica, por meio do portal da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), com o intuito de encontrar estudos publicados sobre aplicação do GNSS no monitoramento geotécnico.

Para definição dos artigos científicos, que se enquadravam no contexto desta pesquisa, foi aplicada a metodologia conhecida como Principais Itens para Relatar Revisões Sistemáticas e Meta-Análises (PRISMA), que é dividida em quatro etapas (MOHER *et al.*, 2010) (Figura 24):

- a) (1) Identificação;
- b) (2) Seleção;
- c) (3) Elegibilidade; e
- d) (4) Inclusão.

Figura 24 – Fluxograma sistemático da metodologia PRISMA empregada na etapa de busca na base de dados.



Fonte: Autora (2022).

De acordo com Galvão e Pansani (2015), a utilização do método PRISMA auxilia os autores a melhorarem as revisões sistemáticas e meta-análises. Pacheco *et al.* (2018) afirma que a metodologia PRISMA é amplamente utilizada para analisar estudos publicados em diferentes segmentos das ciências.

Cada uma dessas etapas tem suas características individuais, de modo que o detalhamento está descrito nas próximas seções (Identificação – 4.1.1; Seleção – 4.1.2; Elegibilidade – 4.1.3; e Inclusão – 4.1.4).

4.1.1 Etapa de Identificação

A primeira etapa, Identificação, consistiu na busca dos artigos pertinentes, por meio da aplicação de palavras-chave na base de dados Scopus, para verificação do posicionamento GNSS nas áreas escolhidas (taludes, ocorrências de subsidência e barragens).

A base de dados Scopus é considerada uma das maiores bases de dados de publicações da literatura científica com revisão por pares, oferecendo ferramentas para acompanhar, analisar e visualizar a investigação das mais diversas áreas do conhecimento, permitindo um panorama das produções técnicas e científicas no mundo (PAULA *et al.*, 2017). A plataforma Scopus cobre atualmente o maior número de registros bibliográficos, totalizando mais de 55 milhões de registros datados desde 1823, representando uma fonte consistente a nível global de informações científicas (MONGEON; PAUL-HUS, 2015).

Um conjunto de palavras em inglês foram aplicadas na Scopus, separadas por um operador booleano “*and*” ou “*or*”, a fim de restringir a pesquisa a publicações que abordassem o tema. É importante destacar que a utilização do operador “*and*” restringe mais a pesquisa, pois os termos empregados precisam aparecer simultaneamente, resultando em uma amostra menor de trabalhos identificados. Já o operador “*or*” reporta uma quantidade maior de documentos, porque os termos empregados podem aparecer simultaneamente ou individualmente.

A pesquisa por artigos que utilizam a tecnologia GNSS no monitoramento geotécnico foi realizada na base de dados Scopus com informações até dezembro de 2022, utilizando as palavras-chave que deveriam constar no título ou no resumo ou nas palavras-chave de cada escrita científica (Tabela 8).

Foram utilizadas as palavras-chave, em inglês, “*monitoring*” (monitoramento) e “GNSS”, associados com termos referentes as aplicações investigadas – “*slope*” (talude), “*subsidence*” (subsidência) e “*dam*” (barragem). Tendo em vista expressões sinônimas ou correlatas a alguns termos, foram inseridas as palavras “*landslide*”

(deslizamento) e “*ground deformation*” (deformação do solo), de modo a englobar os diferentes casos relacionados.

A Tabela 8 apresenta as quantidades de artigos reportados na etapa de identificação, após as buscas das expressões no título ou no resumo ou nas palavras-chave dos documentos indexados na Scopus. Um total de 640 artigos foram identificados nessa etapa, para as três áreas (talude – 354 artigos identificados, subsidência – 196 artigos identificados, e barragem – 90 artigos identificados).

Tabela 8 – Lista de palavras-chave utilizadas na base de dados Scopus e as respectivas quantidades de artigos reportados na etapa de identificação.

Temática	Palavras em Inglês	Quantidades de Artigos Reportados
Taludes	MONITORING and GNSS and (SLOPE or LANDSLIDE)	354
Subsidência	MONITORING and GNSS and (SUBSIDENCE or GROUND DEFORMATION)	196
Barragem	MONITORING and GNSS and DAM	90
Total de Artigos		640

Fonte: Autora (2022)

4.1.2 Etapa de Seleção

Na segunda etapa, Seleção, foram aplicados critérios de exclusão na amostra, com o intuito de torná-la mais compatível com o objetivo do estudo. Para tal, foram empregadas algumas restrições para as três temáticas analisadas, aplicando-se os seguintes filtros:

- a) tempo de publicação – 2018 a 2022;
- b) tipo do documento – artigo científicos;
- c) estágio da publicação – versão final;
- d) tipo de fonte – revista (*journal*);
- e) idioma – inglês.

Após a aplicação dos critérios de exclusão, foram identificados e excluídos os artigos que não se encontravam alinhados com o objetivo da pesquisa. Como resultado, obtém-se o quantitativo apresentado na Tabela 9. Observa-se um total de

234 artigos selecionados após a aplicação dos filtros, sendo excluídos 406 documentos. Nota-se que o quantitativo maior para a aplicação do GNSS em taludes.

Tabela 9 – Quantidades de artigos reportados nas etapas de identificação e seleção.

Temática	Quantidades de Artigos nas Etapas		
	Identificação	Seleção	
		Excluídos	Selecionados
Taludes	354	235	119
Subsistência	196	110	86
Barragem	90	61	29
Total de Artigos	640	406	234

Fonte: Autora (2022)

4.1.3 Etapa de Elegibilidade

Na terceira etapa, Elegibilidade, foi realizada a leitura dos resumos, dos títulos e das palavras-chave, com o intuito de eleger os trabalhos que faziam parte do eixo temático central analisado, com vista a tornar a amostra mais precisa, excluindo, assim, aqueles que apresentaram inconformidades.

Na Tabela 10 é possível observar o quantitativo de artigos durante as etapas da aplicação do método PRISMA. Foram identificados 640 artigos relacionados à busca inicial, após a aplicação dos filtros de seleção, o número de artigos foi reduzido para 234. E nessa etapa, depois da leitura dos resumos, dos títulos e das palavras-chave, 122 artigos foram eleitos para compor a análise crítica.

Tabela 10 – Lista de palavras-chave utilizadas na base de dados Scopus e as respectivas quantidades de artigos reportados na etapa de busca.

Temática	Quantidades de Artigos nas Etapas				
	Identificação	Seleção		Elegibilidade	
		Excluídos	Selecionados	Excluídos	Elegidos
Taludes	354	235	119	66	53
Subsistência	196	110	86	39	47
Barragem	90	61	29	7	22
Total de Artigos	640	406	234	112	122

Fonte: Autora (2022).

Ressalta-se que foram elegidos apenas os artigos que apresentavam o GNSS como ferramenta de monitoramento para uma dada área de estudo. Sendo assim, não foram considerados aqueles que retratavam, puramente, aplicações de ferramentas matemáticas e/ou estatísticas de verificação dos dados GNSS, ou aqueles que faziam uso da tecnologia apenas para validação dos resultados de outros instrumentos.

4.1.4 Etapa de Inclusão

Na quarta etapa, Inclusão, os artigos eleitos foram lidos, a fim de identificar a existência de possíveis incompatibilidades com o tema de estudo. Após a leitura, foi constatado que os artigos se encontram compatíveis com o objetivo da pesquisa.

As informações dos artigos foram exportadas da Scopus nos formatos .bib e .csv, para que pudessem ser lidas pelos seguintes softwares de bibliometria R Studio (pacote Bibliometrix) e Excel. A partir desses dados originou-se as análises bibliométricas, quantitativas e qualitativas.

4.2 FASE 2: ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

O conceito análise bibliométrica, segundo Lacerda *et al.* (2012), encontra-se relacionado a uma avaliação quantitativa de determinados parâmetros para um conjunto definido de artigos, conhecidos como portfólio bibliográfico. Os autores defendem que a análise bibliométrica pode resultar na gestão da informação e compreensão do conhecimento científico sobre uma determinada temática.

Para Vanti (2002), a bibliometria consiste em um conjunto de métodos de pesquisa utilizados com o objetivo de mapear a estrutura do conhecimento em um campo científico, por meio de uma abordagem quantitativa e estatística de diversos dados bibliográficos.

Assim, foram realizadas as análises das informações bibliométricas dos grupos de artigos obtidos na Fase 1 – Busca na Base de Dados, sendo apresentados no Capítulo 5, nas seções 5.2 – Taludes, 5.3 – Subsidência e 5.4 – Barragem. A partir dos arquivos exportadas da Scopus, foi empregada a meta-análise com auxílio dos programas R *Studio* (pacote Bibliometrix) e *Microsoft Office Excel* (Figura 23).

Chueke e Amatucci (2022) enfatizam que a meta-análise sintetiza evidências empíricas em busca de analisar efeito, variância e relações entre variáveis utilizadas em estudos diversos.

Através de estatística descritiva foram elaborados elementos gráficos (tabelas, gráficos e figuras) para subsidiar as análises quantitativas e qualitativas. Os dados bibliométricos das publicações examinados na Fase 2 – Análise Bibliométrica, compreenderam os seguintes itens (Figura 23):

- a) ano de publicação do estudo;
- b) autores;
- c) instituição dos autores;
- d) país de origem dos autores;
- e) quantidade de citações e média de citações por ano;
- f) periódico de publicação; e
- g) palavras presentes no título, no resumo e nas palavras-chave indicadas pelos autores e pela revista.

4.3 FASE3: ANÁLISE SISTEMÁTICA

A análise sistemática busca identificar o que foi produzido de conhecimento pela comunidade científica sobre o tema estudado e, ao mesmo tempo, avaliar as principais tendências da pesquisa sobre ele. Parte-se do princípio de que, ao iniciar uma nova pesquisa acadêmica, tudo o que está sendo discutido, publicado e gerado de conhecimento nessa linha de pesquisa deve ser mapeado para a construção do conhecimento a ela relacionado (TREINTA, 2014).

A análise sistemática empregada nesse trabalho, buscou compreender a aplicação da tecnologia GNSS no monitoramento geotécnico. Para isso, foi dividida em duas etapas (Figura 23):

- a) (1) Aplicações do GNSS no Monitoramento Geotécnico (Capítulo 5);
- b) (2) Características da Aplicação do GNSS para o Monitoramento (Capítulo 6).

Na primeira etapa foram utilizados os artigos científicos obtidos na Fase 1, realizando a síntese e as discussões das aplicações do GNSS em casos de monitoramento geotécnico. As principais informações extraídas dos estudos de caso, foram:

- a) local de investigação;
- b) objetivo da pesquisa;
- c) tecnologias aplicadas;
- d) principais contribuições ao estado da arte; e
- e) método de posicionamento empregado.

Na segunda etapa foram utilizados os artigos científicos obtidos na Fase 1 e realizada a inclusão de outros estudos, a exemplo de livros, outros artigos científicos, dissertações e teses; a fim de reunir as principais características da aplicação do GNSS para o monitoramento. Os tópicos que nortearam a busca pelas informações, contemplam:

- a) utilização e cuidados (Seção 6.1);
- b) vantagens (Seção 6.2);
- c) limitações (Seção 6.3); e
- d) tendências (Seção 6.4).

5 APLICAÇÕES DO GNSS NO MONITORAMENTO GEOTÉCNICO

Este capítulo apresenta inicialmente as aplicações gerais do posicionamento GNSS em diferentes áreas, em especial na geotecnia. Na sequência, tem-se os resultados das pesquisas realizadas, apresentando as análises bibliométricas, que favorecem o entendimento acerca das publicações científicas realizadas de 2018 a 2022.

Além disso, são discutidos alguns casos da literatura que fazem uso do GNSS para o monitoramento geotécnico em taludes, subsidência e barragens, destacando algumas particularidades da técnica.

5.1 APLICAÇÕES GERAIS DO GNSS

A evolução de uma tecnologia é caracterizada em função da sua maturidade e visibilidade. França (2016) enfatiza que, considerando a aquisição de dados espaciais com ênfase nos levantamentos geodésicos e topográficos, a tecnologia GNSS na atualidade já passou por todos os estágios de testes e atualmente se encontra na fase em que é largamente utilizada.

O desenvolvimento das tecnologias de posicionamento espacial, no que tange os receptores GNSS, causaram uma grande revolução na área de levantamentos. Através destes pode-se diminuir os custos operacionais e aumentar a precisão relativa, sem necessariamente reduzir o papel do profissional no processo de entendimento e aplicação dessa tecnologia. Os diferentes métodos de posicionamento GNSS permitem alcançar precisão até o nível do milímetro (HOFMANN–WELLENHOF; LICHTENEGGER; WASLE, 2008).

Enumerar as atividades que fazem uso do GNSS é difícil, em razão da quantidade extensa de possibilidades para sua utilização. Este sistema pode ser aplicado em tarefas que envolvem a navegação (marítima, terrestre e aérea), a agricultura de precisão, monitoramento de superfícies, as aplicações militares, os sistemas de controle atmosféricos, entre outros (MONICO, 2008).

Devido a acurácia obtida por meio do GNSS, tem-se que este tipo de tecnologia é adequado para atividades de levantamento e de mapeamento, em particular de levantamento cadastral, de redes de controle geodésico e de monitoramento de deslocamentos em âmbito local e global.

As aplicações do GNSS no campo geotécnico estão relacionadas ao monitoramento dos deslocamentos decorrentes de movimentos locais da superfície, como por exemplo deslizamentos de terra, subsidência (por mineração, exploração de águas subterrâneas, sobrecarga em solo mole), construção e operação de barragens, recalque em edificações.

O posicionamento GNSS pode ser aplicado também no monitoramento de projetos e obras de engenharia como a construção de túneis, pontes, rodovias, canais e linhas de tubulação enterrada. Além disso, Seeber (2003) afirma que o GNSS pode ser empregado para acompanhar áreas durante e após a escavação em minas a céu aberto e/ou subterrânea.

Neste sentido, a Tabela 11 apresenta algumas possíveis aplicações do GNSS, especialmente voltadas para área de engenharia e monitoramento, conforme informações apresentadas por Seeber (2003).

Tabela 11 – Aplicações do GNSS na engenharia.

Área de aplicação	Aplicações
	Sistemas de Informação Geográfica (SIG)
Determinação de pontos de controle geodésicos	Cartografia Fotogrametria Levantamentos geofísicos Cartografia arqueológica Expedições de todos os tipos
Monitoramento de movimentos de objetos por medições repetidas ou contínuas	Subsidência do solo (mineração, retirada de águas subterrâneas) Deslizamentos de terra Construção de barragens Subsidência de estruturas offshore Regularização de edifícios
Estabelecimento de redes locais para o controle de projetos de engenharia	Construção de túneis Construção de pontes Construção de estradas Dutos e hidrovias
Orientação e controle de veículos em tempo real	Veículos de construção Grandes escavadeiras em mineração a céu aberto Empilhadeiras em áreas de armazenamento abertas (por exemplo, pátios de contêineres)

Fonte: Adaptado de Seeber (2003)

Sendo assim, serão apresentados casos que demonstram a aplicabilidade dos sistemas GNSS para o monitoramento de superfície em taludes (Seção 5.2), de áreas que apresentam o fenômeno da subsidência (Seção 5.3) e de barragens (Seção 5.4).

5.2 MONITORAMENTO DE TALUDES

Os taludes são caracterizados por uma superfície inclinada de um maciço de solo ou de rocha, podendo ser natural, recebendo o nome de encostas, ou artificial, para as situações de corte e aterro (GERSCOVICH, 2016). Em razão da topografia, geologia e outros fatores geomorfológicos é comum a ocorrência de desastres, como movimentos de massa, nestas superfícies.

Sabe-se que movimentos de massa podem ser definidos “como o movimento do material constituinte de uma encosta por efeitos da força gravitacional” (TIGA, 2013). Este fenômeno está associado a um agente deflagrador, como por exemplo, um sismo ou uma precipitação intensa. Tem-se também a ocorrência de diversos casos de movimentos induzidos pela ação antrópica, através de lançamento de efluentes nos taludes, cortes e aterros realizados nas encostas, retirada e plantação de árvores impróprias e a construção de moradias que causam a sobrecarga nestas superfícies.

O acompanhamento do deslocamento de um talude, podendo ser uma encosta, talude de barragem, rodovia, minas a céu aberto, ou até mesmo em área ocupada, geralmente é realizada por meio de instrumentação e monitoramento. Os dados de deslocamentos coletados por vários instrumentos são informações importantes para acompanhar o talude, podendo ser utilizadas nas análises de previsões de ruptura (LIU *et al.*, 2014).

5.2.1 Resultados e Análise Bibliométrica

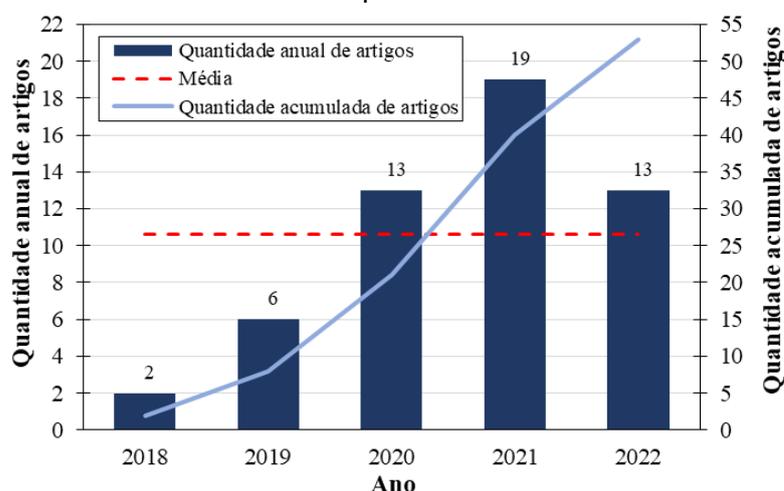
Os sistemas GNSS vêm sendo utilizados ao longo do tempo no monitoramento de taludes ao redor do mundo. Contudo, nos últimos cinco anos percebe-se um incremento nas pesquisas realizadas aplicando esta tecnologia (Figura 25), atingindo 53 artigos publicados na base de dados Scopus durante o intervalo de 2018 a 2022, seguindo a metodologia apresentada no Capítulo 4.

O ano de 2018 apresentou a menor quantidade de pesquisas publicadas no escopo de análise, com apenas dois artigos científicos publicados. Para o ano

seguinte, tem-se um aumento de 300% no número de publicações, porém com valores abaixo da média anual calculada para o período (10,6 artigos/ano). Em 2021 houve o maior número de produções verificadas, atingindo a marca de 19 artigos científicos registrados no ano.

O ano de 2022 apresentou quantidade de artigos inferiores a 2021, contudo, ressalta-se que este quantitativo não representa a sua totalidade, visto que a pesquisa foi realizada antes da sua conclusão, o que pode ter favorecido a redução do número de publicações. Apesar disto, tem-se que o último ano já apresenta quantidade de produção científica acima da média calculada para o intervalo de tempo.

Figura 25 – Evolução do número de publicações na base de dados Scopus no período de 2018 a 2022 sobre aplicação de GNSS em talude, conforme metodologia apresentada no Capítulo 4.



Fonte: Autora (2022)

As publicações verificadas são fruto de diferentes instituições, estando as 16 principais apresentadas na Tabela 12, sendo consideradas aquelas que detêm mais de dois artigos publicados. Pode-se observar que a instituição com maior número de publicações é a *Chang'an University*, situada na China, com 4 artigos publicados no intervalo de tempo analisado. Na sequência tem-se a *Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia*, na Itália, e um total de 3 artigos.

As instituições estão situadas principalmente na Europa, detentora de metade das afiliações, 44% correspondem a instituições do continente asiático e minoritariamente com 6%, da América provêm afiliações.

Tabela 12 – Principais instituições com publicações sobre aplicação de GNSS em talude na base de dados Scopus no período de 2018 a 2022, conforme metodologia apresentada no Capítulo 4.

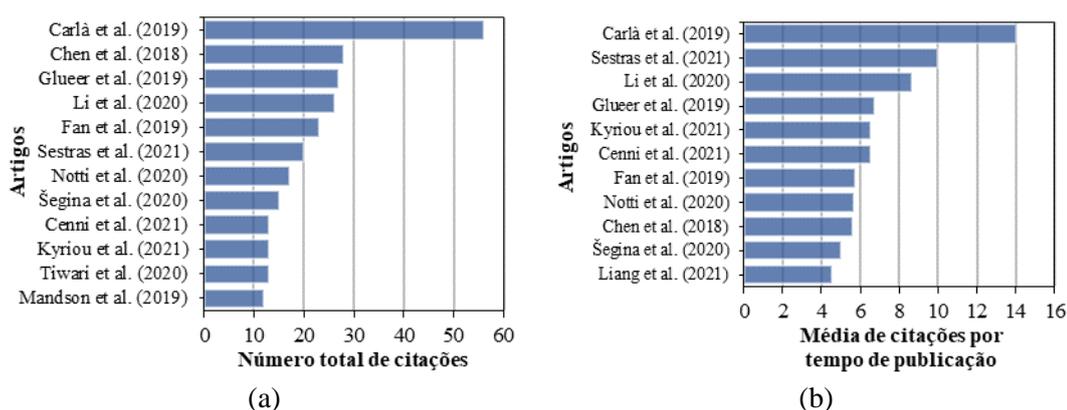
Instituições	País	Quantidade de Artigos	Referências
<i>Chang'an University</i>	China	4	Zhou et al. (2022); Wang et al. (2022); Huang et al. (2022); Du et al. (2020)
<i>Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia</i>	Itália	3	Calvari et al. (2022); Bruno et al. (2022); Oestreicher et al. (2021)
<i>Sichuan University</i>	China	3	Chen et al. (2021); Wang et al. (2020); Chen et al. (2018)
<i>China University of Geosciences</i>	China	3	Wu et al. (2021); Liang et al. (2021); Chen et al. (2021)
<i>Všb–Technical University of Ostrava</i>	República Tcheca	3	Li et al. (2022); Li et al. (2021); Weiguo et al. (2021)
<i>Department of Earth Sciences</i>	Suíça	3	Oestreicher et al. (2021); Glueer et al. (2021); Glueer et al. (2019)
<i>University of Modena and Reggio Emilia</i>	Itália	3	Mantovani et al. (2022); Mulas et al. (2020); Mulas et al. (2020)
<i>Comenius University</i>	Eslováquia	2	Sestras et al. (2021); Buša et al. (2020)
<i>Chinese Academy of Sciences</i>	China	2	Ma et al. (2022); Luo et al. (2019)
<i>Cumhuriyet University</i>	Turquia	2	Gül et al. (2020); Hastaoglu et al. (2018)
<i>Hebei Geo University</i>	China	2	Li et al. (2021); Weiguo et al. (2021)
<i>University of Alberta</i>	Canadá	2	Sharifi et al. (2022); Rodriguez et al. (2021)
<i>University of Ljubljana</i>	Eslovênia	2	Peternel et al. (2022); Šegina et al. (2020)
<i>University of Patras</i>	Grécia	2	Kyriou et al. (2022); Kyriou et al. (2021)
<i>China University of Mining and Technology</i>	China	2	Li et al. (2021); Zhou et al. (2021)
<i>Research Institute for Geo-Hydrological Protection</i>	Itália	2	Mantovani et al. (2022); Notti et al. (2020)

Fonte: Autora (2022)

De acordo com as informações bibliométricas obtidas na base de dados da Scopus, os artigos que apresentaram maior número de citações foram 12 (Figura 26a), dentro do universo de 53 artigos selecionados, o que aponta para uma provável relevância desses artigos para a comunidade técnica-científica.

Ao analisar os 11 artigos com as maiores médias de citações por tempo de publicação do estudo (Figura 26b), verifica-se que quase todos constam nas duas análises, com exceção de Liang *et al.* (2021), comprovando a pertinência desses artigos e dos seus correspondentes autores para o tema abordado nesse estudo.

Figura 26 – Análise das citações dos artigos sobre aplicação de GNSS em talude no período de 2018 a 2022 conforme metodologia apresentada no Capítulo 4: (a) 10 maiores quantidade de citações, 12 artigos; (b) 10 maiores médias de citações por tempo de publicação, 11 artigos.



Fonte: Autora (2022)

Como maior destaque tem-se Carlà *et al.* (2019) com o total de 56 citações, e uma média de 14 citações por ano. O artigo de Chen *et al.* (2018) aparece na segunda posição no número total de citações, com 28 citações, porém se posiciona em 5º lugar na média de citações por ano, o que pode ser explicado pela influência inicial do artigo, sendo utilizado em diferentes publicações, mas com redução do impacto ao longo do tempo.

Outro aspecto que pode ser analisado nas publicações estudadas, diz respeito aos periódicos de origem dos trabalhos. Partindo de um horizonte com 31 revistas, as dez principais detêm 64% das publicações, e estão dispostas na Tabela 13. Verifica-se que o periódico *Remote Sensing* apresenta o maior volume de artigos publicados no período de análise, correspondendo 20% de todos os artigos. Ressalta-se que as revistas em destaque apresentam bons índices, com grandes quantidades de citação e boas métricas de impacto, o que é indicativo da relevância dos trabalhos científicos publicados nestes periódicos.

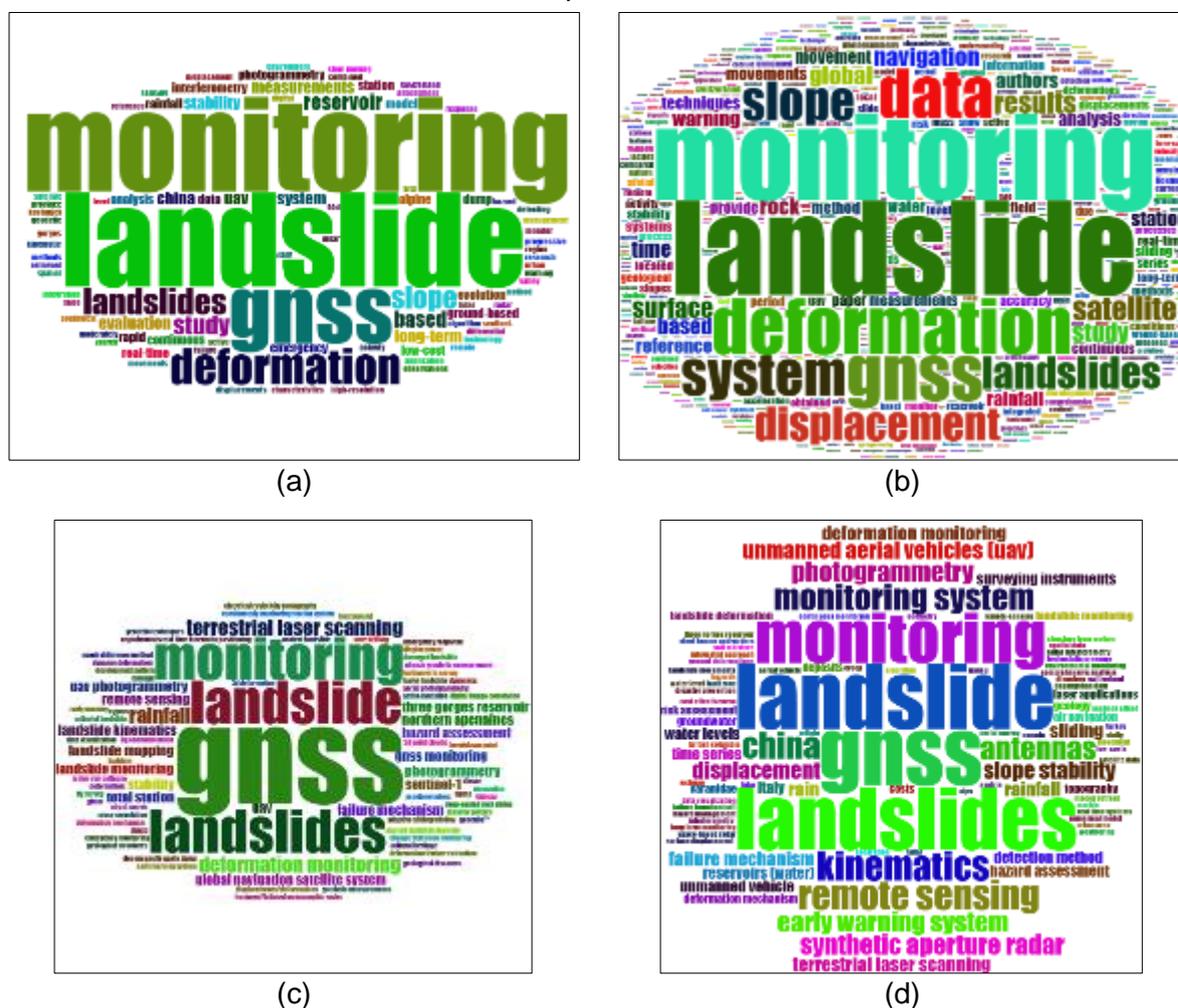
Tabela 13 – Principais periódicos na base de dados Scopus, com aplicação de GNSS em talude no período de 2018 a 2022, conforme metodologia apresentada no Capítulo 4, com as respectivas métricas de impacto.

Periódicos	Distribuição dos artigos		Métricas de impacto		Classificação Qualis/CAPES Engenharias I	
	Quant.	Contribuição	CiteScore 2021	Journal Citation Reports (JCR) 2021	Quadriênio 2013–2016	Quadriênio 2017–2020
1 <i>Remote Sensing Applied Sciences (Switzerland)</i>	11	20,75%	7.4	5.349	B1	A1
2 <i>Landslides</i>	4	7,55%	3.7	2.838	–	A3
3 <i>Frontiers in Earth Science</i>	4	7,55%	10.6	6.153	A1	A1
4 <i>Engineering Geology</i>	3	5,66%	3.2	3.661	B4	–
5 <i>Environmental Earth Sciences</i>	2	3,77%	10.7	6.902	A1	A1
6 <i>Journal of Geophysical Research: Earth Surface</i>	2	3,77%	4.8	3.119	B1	A2
7 <i>Journal of Mountain Science</i>	2	3,77%	6.9	–	–	–
8 <i>Measurement: Journal of the International Measurement Confederation</i>	2	3,77%	3.5	2.371	–	A3
9 <i>Sensors (Switzerland)</i>	2	3,77%	7.8	–	–	–
10 Total	34	64,13%	–	–	–	–

Fonte: Autora (2022)

No que se refere as palavras mais identificadas no título, resumo, palavras-chave dos autores e palavras-chave da base de dados, tem-se as nuvens de palavras apresentadas na Figura 27. Pode-se inferir que o monitoramento de taludes por meio do GNSS está relacionado com o sensoriamento remoto, sistemas de alerta, deslocamento, deformação, satélite, superfície, entre outros termos que expressam o posicionamento GNSS ou afirmam a sua aplicação.

Figura 27 – Nuvem de palavras formadas a partir: (a) dos títulos; (b) dos resumos; (c) das palavras-chave dos autores; (d) das palavras-chave da base de dados; sobre aplicação de GNSS em talude no período de 2018 a 2022, conforme metodologia apresentada no Capítulo 4.



Fonte: Autora (2022)

5.2.2 Casos da Literatura sobre o Monitoramento de Taludes

As análises demonstraram que o GNSS está associado ao monitoramento de taludes de diferentes naturezas, como por exemplo, encostas naturais, taludes de mineração, pilhas de rejeito, áreas que compreendem reservatório de barragem, entre outros.

A seguir estão apresentados casos da literatura sobre o monitoramento de taludes com GNSS:

- Taludes Naturais / Encostas – Carlà *et al.* (2019) e Šegina *et al.* (2020);
- Talude Rodoviário com Corte – Fan *et al.* (2019);
- Talude em Área de Reservatório de Barragem – Wu *et al.* (2021).

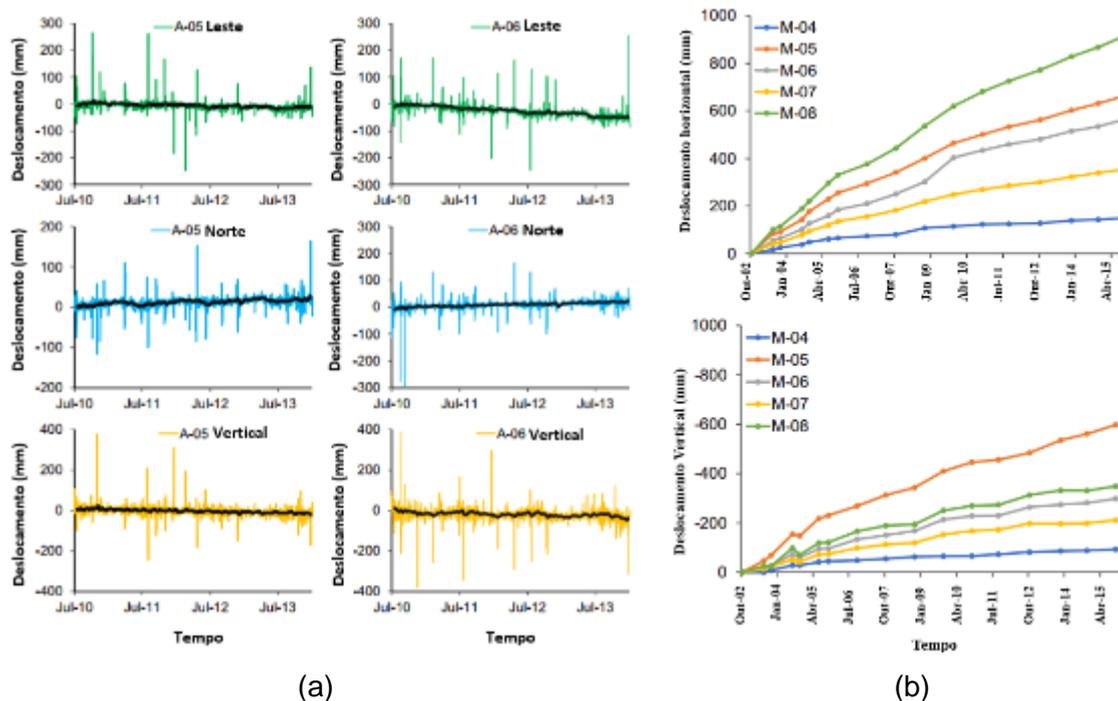
5.2.2.1 Taludes Naturais / Encostas

Em relação a encostas, tem-se que estas são as principais aplicações do posicionamento GNSS, buscando o monitoramento da ocorrência de deslizamentos de terra. O artigo de Carlà *et al.* (2019), que apresentou o maior número de citações, exhibe o monitoramento de um talude alpino em Bosmatto, região dos alpes no noroeste da Itália, que sofreu uma reativação no movimento repentina em 15 de outubro de 2000, após um evento de chuva intensa e prolongada. O monitoramento contou com leituras em duas estações GNSS de monitoramento contínuo, cinco estações GNSS para medições de campanha (operado manualmente), e aquisições de Interferometria de Radar de Abertura Sintética (InSAR – *Interferometric Synthetic Aperture Radar*) da constelação de satélites Sentinel-1 (nas órbitas ascendente e descendente).

Ressalta-se que as leituras do GNSS foram feitas por meio de posicionamento GNSS diferencial estático, tendo sido as antenas das estações permanentes instaladas em um poste e elevadas a uma altura de 3m acima do solo, para manter distância da cobertura de neve durante o inverno. Os dados disponíveis têm uma frequência de medição de aproximadamente 6 horas, compreendidas entre 1 de julho de 2010 e 31 de dezembro de 2013. As leituras realizadas por campanha foram feitas no máximo duas vezes por ano, entre 3 de outubro de 2002 e 8 de outubro de 2015, em razão da dificuldade de subir a encosta com a presença de neve.

A Figura 28a apresenta os deslocamentos na direção Leste-Oeste, Norte-Sul e Vertical das estações GNSS de monitoramento contínuo (A-05 e A-06). A Figura 28b exhibe os resultados dos deslocamentos Horizontal e Vertical das estações GNSS de monitoramento por campanha (M-04, M-05, M-06, M-07, M-08). Os resultados indicam uma taxa de deslocamento geralmente constante, variando de 8,6 mm / ano (estação A-05) a 74,8 mm / ano (estação M-08).

Figura 28 – (a) Deslocamento medido das estações GNSS de monitoramento contínuo; (b) Deslocamento medido nas estações GNSS com medições em campanha.

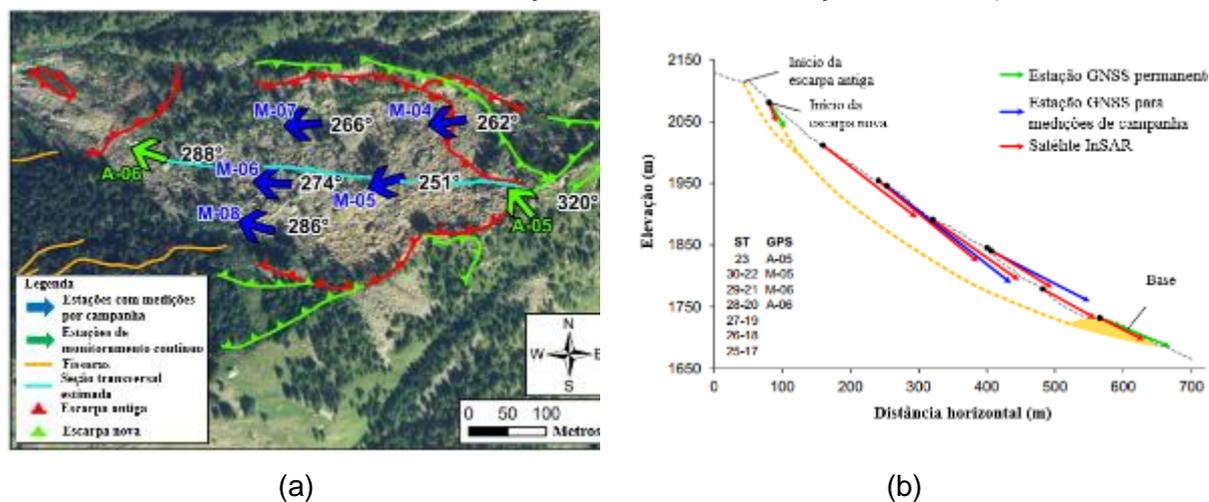


Fonte: Adaptado de Carlà *et al.* (2019).

A Figura 29a exibe a representação dos vetores resultantes dos deslocamentos horizontais medidos pelas estações GNSS de monitoramento contínuo (seta verde) e por campanha (seta azul), também estão representadas as escarpas antiga (linhas vermelhas) e nova (linhas verdes) e a seção transversal proposta (linha azul). A Figura 29b apresenta os resultados de uma seção transversal indicada pela linha azul da Figura 29a, considerando dados GNSS e InSAR.

Para composição do deslocamento da InSAR, que apresenta limitação na definição do deslocamento na direção Norte–Sul, a direção Leste–Oeste foi considerada como a componente horizontal total. Verifica-se que o vetor resultante da InSAR é menor, devido à subestimação da componente horizontal, do que os seus homólogos medidos pelos receptores GNSS. Observa-se um movimento predominantemente na direção Sudoeste e Noroeste, com ângulo de mergulho gradualmente decrescente no sentido do topo ao pé da encosta, estando em congruência com o sentido de deslizamento do talude (Figura 29a e Figura 29b).

Figura 29 – (a) – Deslocamento medido das estações GNSS de monitoramento contínuo; (b) Deslocamento medido nas estações GNSS com medições em campanha.



Fonte: Adaptado de Carlà *et al.* (2019).

Os autores concluíram que os conjuntos de dados do GNSS e da InSAR devem ser utilizados de forma conjunta, superando as limitações individuais, haja vista as características e modos de aquisição diferentes. Como esperado, há discrepâncias entre as velocidades na direção Leste–Oeste da InSAR e as velocidades horizontais das estações GNSS, em razão da ausência da componente Norte–Sul na InSAR. Deste modo, ressalta–se a importância do monitoramento GNSS para definir, com precisão, os deslocamentos do talude, mesmo que de modo pontual, em especial para movimentos com direção Norte–Sul predominantes.

Partindo do pressuposto de que a combinação de instrumentos promove resultados mais satisfatórios de entendimento do fenômeno, tem–se o trabalho de Šegina *et al.* (2020) que combina o desenvolvimento de um receptor GNSS de baixo custo com coleta simultânea de dados pluviométricos para entender os mecanismos de movimento de um talude. A associação dos dados GNSS com instrumentos tradicionais utilizados na geotecnia clássica, comprova a sua aplicabilidade no entendimento da dinâmica dos deslizamentos.

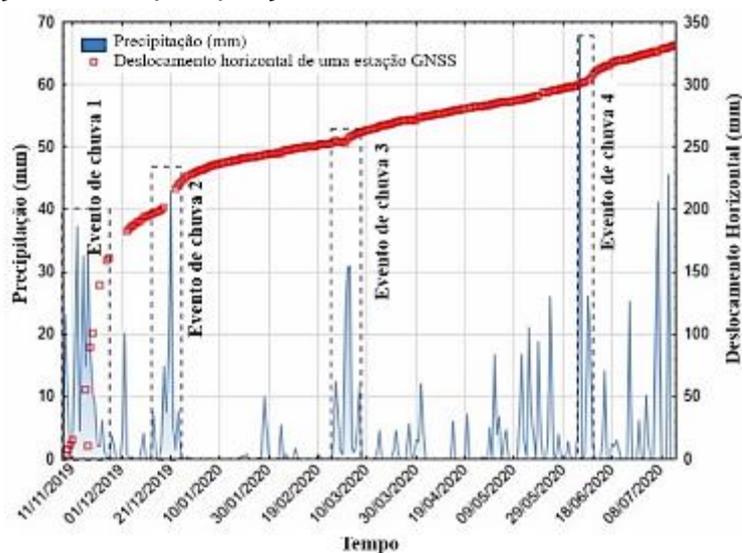
Šegina *et al.* (2020) estudaram um talude na região da Eslovênia, no qual foram instaladas sete estações GNSS de baixo custo. O método de posicionamento utilizado foi o relativo, fazendo uso de informações das constelações de satélites GPS e Galileo, com dados de deslocamento diário, ou seja, um monitoramento contínuo.

O monitoramento foi compreendido entre 24 de outubro de 2019 e 3 de agosto de 2020, sendo comparado os resultados com informações preliminares de estações de controle e constatando a precisão adequada dos sensores. A superfície de ruptura

estimada para o talude em estudo se encontrava a poucos metros de profundidade e apresentou boa correlação com os índices pluviométricos, em especial nas estações instaladas no sopé do talude.

Na Figura 30 é possível observar as mudanças de tendência no deslocamento horizontal frente aos eventos de chuva, de modo que Šegina *et al.* (2020) constataram que a maior taxa de deslocamento horizontal observada no local (17,69 mm/dia) ocorreu entre 16 e 26 de novembro de 2019 (10 dias), o que corresponde ao Evento de chuva 1, com mais de 300mm de precipitação. Foi possível notar que o movimento tende a desacelerar ao longo do período sequencial de chuvas. Nem todos os pontos monitorados apresentaram uma correlação direta com os intervalos de precipitação, o que os autores justificaram ser em decorrência dos mecanismos de movimentação do talude.

Figura 30 – Relação entre a precipitação e o deslocamento horizontal medido com GNSS.



Fonte: Adaptado de Šegina *et al.* (2020).

No estudo de Šegina *et al.* (2020) foi possível concluir que os dados contínuos e quase em tempo real de deslocamentos de superfície adquiridos pelo sistema GNSS de baixo custo representaram uma extensa fonte de informações para análise posterior, auxiliando na elaboração de modelos locais de previsão de deslizamento e de um sistema confiável de controle e alerta. No entanto, a técnica de monitoramento testada (GNSS) só é capaz de fornecer informações sobre os movimentos pontuais da superfície. Para uma descrição completa da dinâmica de deslizamentos profundos, há necessidade de integrar a análise da superfície com investigação do subsolo.

Šegina *et al.* (2020) concluíram que a disponibilidade de dados e a fácil instalação tornam os sensores GNSS desenvolvidos na pesquisa adequados para o monitoramento de locais menos acessíveis com probabilidade de deslizamentos. Foi constatado também que o sistema proposto de baixo custo aumenta a acessibilidade e permite a criação de uma rede mais ampla de pontos de monitoramento em toda a área, ajudando, assim, a entender os mecanismos de deslocamento do talude.

Nos dois casos apresentados anteriormente, tem-se a aplicação do GNSS associado a outras tecnologias, como InSAR e pluviômetro, contudo, há artigos que demonstram a sua compatibilidade com instrumentos tradicionais, como:

- a) Inclínômetro (HUANG *et al.*, 2022b; LIAN *et al.*, 2020; WANG *et al.*, 2021; ZHOU *et al.*, 2021);
- b) Estação total (GLUEER *et al.*, 2021), ou outros mais recentes;
- c) Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) (GUO *et al.*, 2022; KYRIOU *et al.*, 2021; KYRIOU; NIKOLAKOPOULOS; KOUKOUVELAS, 2022; RECHBERGER; FEY; ZANGERL, 2021), entre outros.

5.2.2.2 Talude Rodoviário com Corte

Como mencionado anteriormente, o posicionamento GNSS, dispondo de dados em tempo real, pode integrar um sistema de controle e alerta para ocorrência de deslizamentos. Esta aplicação foi verificada por Fan *et al.* (2019), na elaboração de um sistema de alerta para deslizamento recorrente na cidade de Xingyi, na China. A movimentação no talude tem como causa principal a construção e a ampliação de uma estrada de acesso, a qual expôs uma descontinuidade existente no maciço rochoso.

O desenvolvimento deste sistema de alerta fez uso de inteligência artificial, tendo sido testado para diferentes deslizamentos ocorridos no território chinês, comprovando os modelos de previsão de deslizamento e os limiares aplicados.

Tendo em vista que o deslocamento é uma ferramenta importante para definição do sistema de alerta, tem-se que a rede de monitoramento, instalada em 27 de janeiro de 2019, contou com estações GNSS de monitoramento contínuo, medidores de rachaduras, pluviômetro e tiltímetro, cuja disposição está apresentada na Figura 31. Fan *et al.* (2019) afirmam a necessidade de instalação de instrumentos

complementares para o fornecimento de informações, mesmo que nem todos proporcionem parâmetros para o sistema de alerta.

Figura 31 – Rede de monitoramento do talude em Xingyi, na China

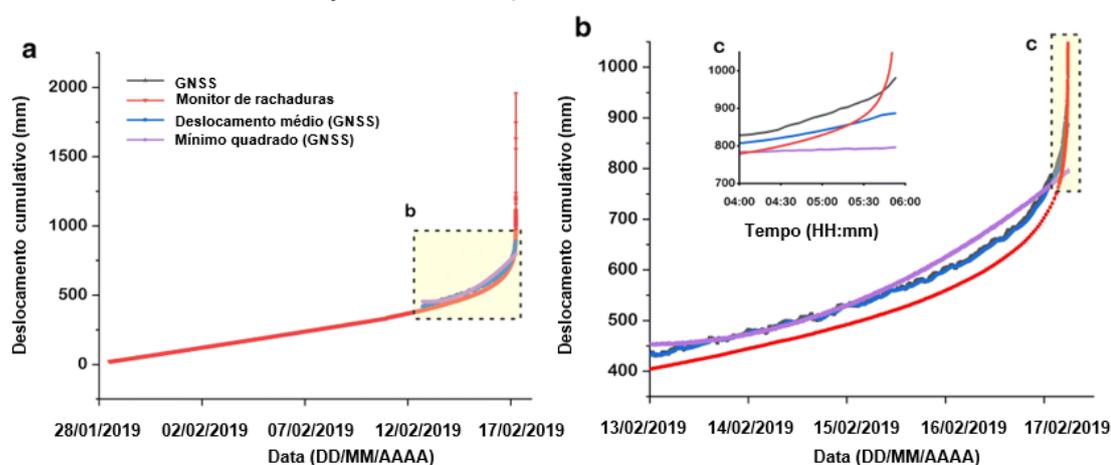


Fonte: Adaptado de Fan *et al.* (2019).

Ressalta-se que a instalação de mais de um tipo de método de monitoramento permite a redundância entre as informações, bem como permite a disponibilidade de alternativas caso ocorra mau funcionamento de algum dispositivo, mantendo, assim, o sistema de alerta ativo durante cenários de emergência.

Com o intuito de destacar a tendência do deslocamento de maneira mais clara, é necessária a aplicação de procedimentos de suavização nos dados do GNSS. Os estudos realizados por Fan *et al.* (2019), demonstraram que no estágio de deformação constante, o método dos mínimos quadrados retira os ruídos de forma satisfatória, enquanto no estágio de deformação acelerada a média móvel filtra o ruído e destaca a tendência da curva deslocamento-tempo. Através da Figura 32 é possível verificar que a aplicação dos métodos dos mínimos quadrados não se adequou satisfatoriamente aos dados GNSS, visto que o talude em questão já se encontrava no estágio de deformação acelerada.

Figura 32 – Comparação e análise de diferentes métodos de filtragem para dados obtidos de medidores de trincas e GNSS em Longjing: (a) dados completos; (b) porção ampliada; (c) diferença nos dados poucas horas antes da falha



Fonte: Adaptado de Fan *et al.* (2019).

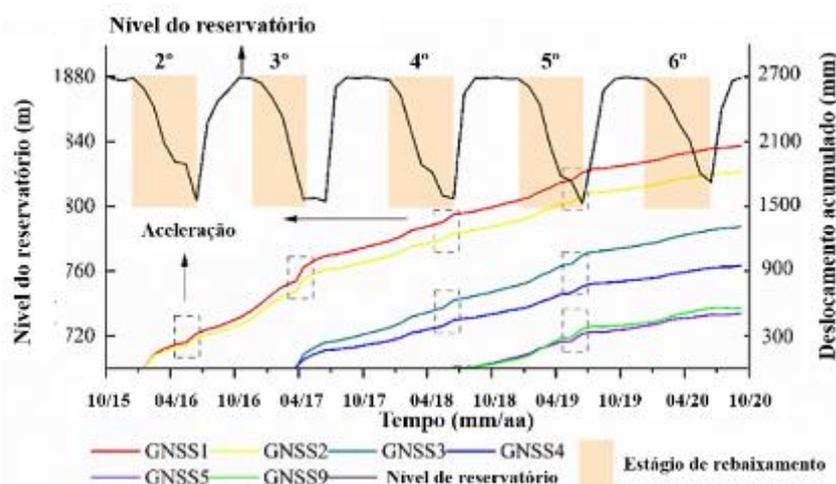
Em função disso, os dados podem ser aplicados a modelos de previsão do deslocamento, com o intuito de estabelecer limiares para o sistema de alerta. De acordo com os autores, o sistema de alerta desenvolvido foi capaz de alertar com sucesso a ocorrência de deslizamento de rochas e desempenhou um papel vital na resposta de emergência.

5.2.2.3 Talude em Área de Reservatório de Barragem

O estudo realizado por Wu *et al.* (2021) trata do monitoramento de um talude as margens do Rio Yalong na China, sendo constituinte de uma área de reservatório de uma barragem. O represamento do reservatório nesta área afetou a condição hidrogeológica das encostas. O plano de monitoramento incluiu três locais de monitoramento de subsuperfície (inclinômetro) e seis pontos de monitoramento de superfície (GNSS).

As informações dos GNSS, baseadas no método de posicionamento relativo e transmissão das informações com *link* 3G, estão compreendidas entre janeiro de 2016 e setembro de 2020, cujos resultados diários apresentaram deslocamentos majoritariamente na direção Leste-Oeste. Os autores analisaram a relação entre o nível de água do reservatório e os deslocamentos medidos nos GNSS. Estes resultados estão apresentados na Figura 33, através dos quais é possível observar o incremento no deslocamento na fase de nível de água mais baixo em todos os pontos analisados (marcados com um retângulo cinza).

Figura 33 – Deslocamento horizontal das estações GNSS e o nível da água do reservatório.



Fonte: Adaptado de Wu *et al.* (2021).

Com base nessa estrutura conceitual, podem ser feitas previsões sobre o deslocamento do talude sob as próximas flutuações periódicas do nível da água em longo prazo. Os autores estabeleceram limiares para composição de um sistema de alerta baseado nos dados de velocidade dos GNSS e no nível do reservatório. Estes limiares foram definidos por meio de análises estatísticas, com a aplicação de médias móveis sobre os valores de velocidade dos GNSS.

Wu *et al.* (2021) concluíram que a análise de séries temporais de velocidade dos GNSS com base no método da média móvel foi adequada para determinar alertas para as fases periódicas de aceleração com o estabelecimento de um limite de velocidade. Enquanto isso, um limite de nível de água também foi atribuído para reduzir avisos falsos para as estações GNSS.

Um fator que limitou o sistema de alerta foi que a complementação e a instalação de novas unidades GNSS não são muito econômicas. O custo de monitoramento atrasa o reconhecimento geral e detalhado da cinemática do deslizamento e, enquanto isso, reduz a área de cobertura do sistema de alerta para todo o talude. Além disso, os autores concluíram que técnicas combinadas entre GNSS, InSAR e fotogrametria aérea podem melhorar a compreensão de grandes deslizamentos ativos na escala de encostas e o desempenho de sistema de alerta.

5.3 MONITORAMENTO DE SUBSIDÊNCIA

O fenômeno de subsidência do solo corresponde ao rebaixamento da superfície, podendo estar relacionado, por exemplo, às modificações internas da estrutura do solo ou à instabilidade de cavidades subterrâneas. De acordo com Whittaker e Reddish (1989), a subsidência geralmente se refere ao deslocamento vertical, mas também implica em movimento horizontal de áreas adjacentes, em virtude do deslocamento lateral do solo gerado pelo movimento descendente que o acompanha.

Tal afundamento da superfície pode resultar de razões geológicas e/ou ações antrópicas, incluindo atividades tectônicas ou vulcânicas, rebaixamento do lençol freático (exploração de aquíferos), consolidação de solos orgânicos, mineração subterrânea, túneis, extração de petróleo e gás, processos de dissolução de minerais e compactação natural (WHITTAKER; REDDISH, 1989; ZEITOUN; WAKSHAL, 2013). Várias cidades no mundo convivem com o fenômeno da subsidência, podendo-se afirmar que a ação humana tem maior influência sobre a sua ocorrência (THU; FREDLUND, 2000).

De acordo com Floris *et al.* (2022), uma área de subsidência é formada gradualmente no processo de avanço da frente de trabalho de mineração. Portanto, é necessário encontrar formas de realizar o monitoramento da superfície em áreas de mineração para determinar o comportamento da movimentação e minimizar os danos associados a este processo.

Por este motivo, alguns estudos apresentam o monitoramento dos deslocamentos dessas áreas, através do GNSS, haja vista os impactos gerados em decorrência da exploração, em especial nos grandes centros urbanos.

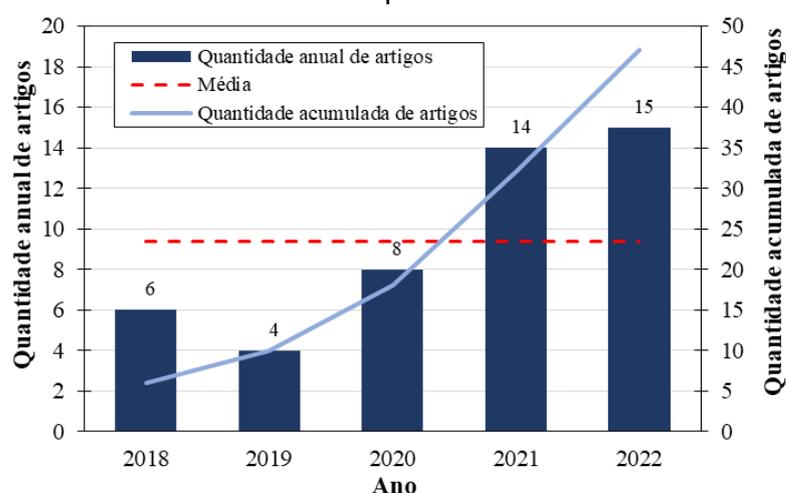
5.3.1 Resultados e Análise Bibliométrica

Através das buscas realizadas na base de dados Scopus para o período de 2018 a 2022, identifica-se o crescimento do número de publicações pertinentes a temática de monitoramento por GNSS, como pode ser observado na Figura 34. Em 2018 foi registrado seis artigos técnicos que retratam o monitoramento em áreas de subsidência através da tecnologia GNSS. O ano de 2019 apresentou um decréscimo

na quantidade de artigos publicados. Entretanto, desde 2020 que a quantidade de artigos tem aumentado ano a ano.

Observa-se que entre 2020 e 2021 houve um aumento de 75% na produção de artigos na temática, ultrapassando a média de 9,4 artigos/ano. O ano de 2022 já se mostra com a maior quantidade de artigos publicados, ainda que não represente a sua totalidade, visto que a pesquisa foi realizada antes da sua conclusão.

Figura 34 – Evolução do número de publicações na base de dados Scopus no período de 2018 a 2022 sobre aplicação de GNSS em subsidência, conforme metodologia apresentada no Capítulo 4.



Fonte: Autora (2022)

As publicações advêm, em sua maioria, de 9 instituições, as quais podem ser observadas na Tabela 14, que consta com o registro das instituições que apresentam mais de um artigo. Observa-se que a afiliação com maior quantidade de artigos publicados é o *Istituto Nazionale Di Geofisica e Vulcanologia*, com sete artigos. As instituições estão situadas em sua maioria no continente europeu (55,5%), enquanto os continentes asiático e americano contam com 22,2% das afiliações.

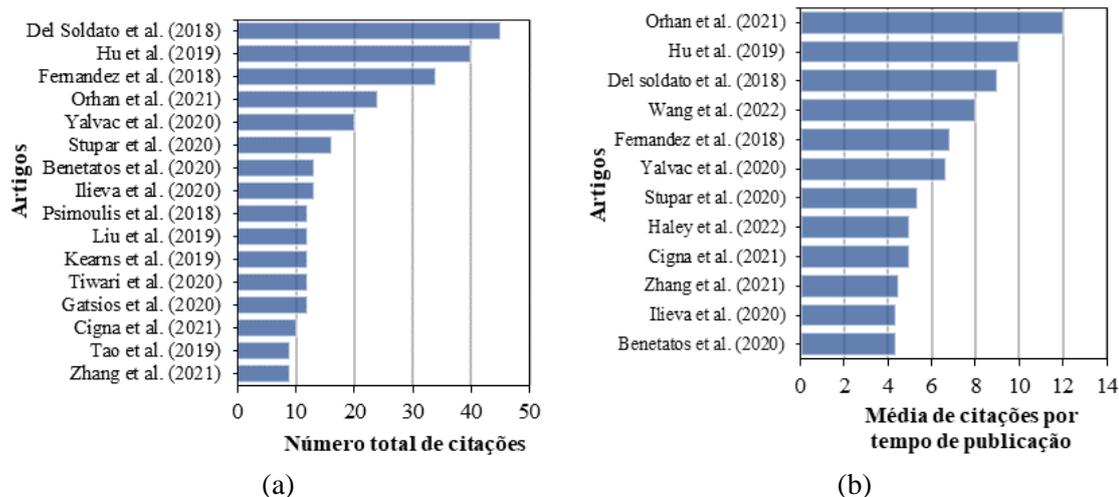
As informações na base de dados da Scopus atestam que para os 48 artigos selecionados o total de citações foi de 381, de modo que, aproximadamente, 77% fazem referência a apenas 16 artigos, os quais estão destacados na Figura 35a. Em relação a quantidade de citações ao longo do tempo, tem-se que dentre os 12 artigos com as maiores médias de citação por tempo de publicação (Figura 35b), a maioria também aparecem listados como aqueles com os maiores números de citação (Figura 35a), o que revela a sua relevância para o tema.

Tabela 14 – Principais instituições com na base de dados Scopus no período de 2018 a 2022 sobre aplicação GNSS em subsidência, conforme metodologia apresentada no Capítulo 4.

Instituições	País	Quantidade de artigos	Referência
<i>Istituto Nazionale Di Geofisica e Vulcanologia</i>	Itália	7	Çirmik et al. (2022); Serpelloni et al. (2022); Bruno et al. (2022); Riguzzi et al. (2021); Bonforte et al. (2021); Fernandez et al. (2018); Riccardi et al. (2018)
<i>University of Houston</i>	Estados Unidos	4	Wang et al. (2022); Wang (2022); Bao et al. (2021); Kearns et al. (2019)
<i>Universidad Complutense de Madrid</i>	Espanha	2	Fernandez et al. (2018); Riccardi et al. (2018)
<i>University of Padova</i>	Itália	2	Nespoli et al. (2021); Cenni et al. (2021)
<i>Via Del Politecnico Snc</i>	Itália	2	Cigna et al. (2021); Gatsios et al. (2020)
<i>Wuhan University</i>	China	2	Zhang et al. (2022); Tao et al. (2019)
<i>University of Colorado</i>	Estados Unidos	2	Corsa et al. (2022); Fernandez et al. (2018)
<i>China University of Geosciences</i>	China	2	Fabris et al. (2022); Li et al. (2022)
<i>Instituto de Geociencias (IGEO, CSIC-UCM)</i>	Espanha	2	Fernandez et al. (2018); Riccardi et al. (2018)

Fonte: Autora (2022)

Figura 35 – Análise das citações dos artigos na base de dados Scopus no período de 2018 a 2022 sobre aplicação de GNSS em subsidência, conforme metodologia apresentada no Capítulo 4: (a) 10 maiores quantidade de citações, 16 artigos; (b) 10 maiores médias de citações por tempo de publicação, 12 artigos



Fonte: Autora (2022)

Dentre os artigos analisados, tem-se destaque para Del Soldato *et al.* (2018) com o maior número total de citações e também está na terceira posição dentre aqueles com as maiores citações por tempo de publicação. Em relação ao trabalho de Haley *et al.* (2022) percebe-se que este se apresenta como uma das maiores médias por tempo de citação, o que revela grande impacto de um trabalho recente.

Em relação aos periódicos de origem das publicações verificadas, tem-se que 46% estão contidas nas cinco revistas apresentadas na Tabela 15. Observa-se que o periódico *Remote Sensing* apresenta o maior volume de artigos publicados no período de análise, correspondendo 27% de todos os artigos. Ainda assim, salienta-se que as revistas destacadas apresentam boas métricas, o que ressalta a relevância dos trabalhos científicos publicados nestas revistas.

Tabela 15 – Principais periódicos na base de dados Scopus, com aplicação de GNSS em talude no período de 2018 a 2022, conforme metodologia apresentada no Capítulo, com as respectivas métricas de impacto.

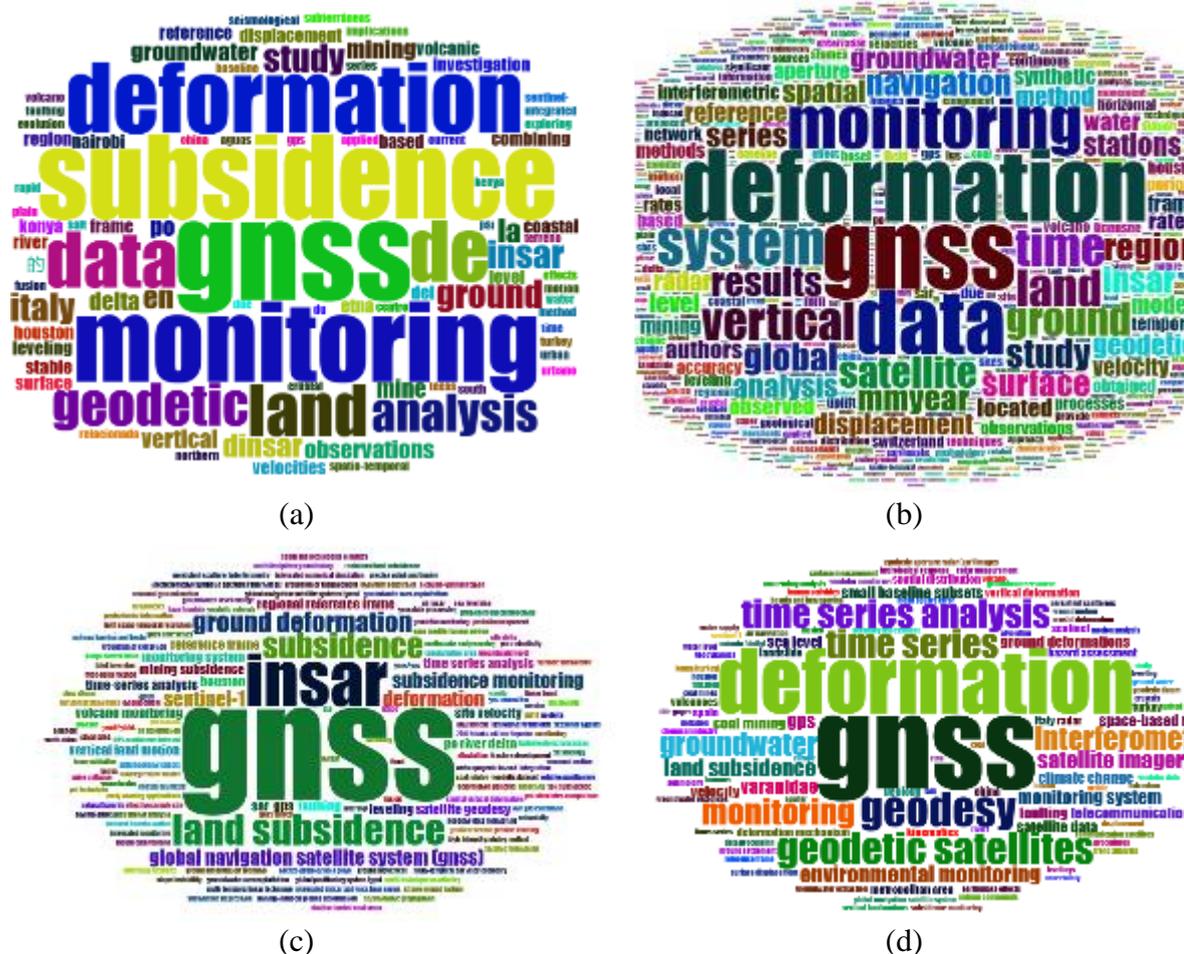
Periódicos	Distribuição dos artigos		Métricas de impacto		Classificação Qualis/CAPES Engenharias I	
	Quantidade	Contribuição	CiteScore 2021	Journal Citation Reports (JCR) 2021	Quadriênio 2013–2016	Quadriênio 2017–2020
1 <i>Remote Sensing</i>	13	27,66%	7.4	5.349	B1	A1
2 <i>Journal of Surveying Engineering</i>	3	6,38%	2.9	1.576	B1	A2
3 <i>Applied Sciences (Switzerland)</i>	2	4,26%	3.7	2.838	–	A3
4 <i>Environmental Monitoring and Assessment</i>	2	4,26%	4.5	3.307	A1	A3
5 <i>Frontiers in Earth Science</i>	2	4,26%	3.2	3.661	B4	–
Total	22	46,82%	–	–	–	–

Fonte: Autora (2022)

No que se refere as palavras mais identificadas no título, resumo, palavras-chave dos autores e palavras-chave da base de dados, tem-se as seguintes nuvens de palavras apresentadas na Figura 36. Pode-se inferir que o monitoramento de subsidência por meio do GNSS está relacionado com deformação, geodésia, deformação do solo, monitoramento, InSAR, entre outros termos que expressam o posicionamento GNSS ou afirmam a sua aplicação.

As análises demonstraram que o GNSS está associado ao monitoramento de subsidência, podendo estes ser relacionados a exploração de água subterrânea ou de minerais e associados a outras formas de monitoramento, como a InSAR.

Figura 36 – Nuvem de palavras formadas a partir: (a) dos títulos; (b) dos resumos; (c) das palavras-chave dos autores; (d) das palavras-chave da base de dados, das publicações verificadas na base de dados Scopus no período de 2018 a 2022 sobre aplicação de GNSS em subsidência, conforme metodologia apresentada no Capítulo 4.



Fonte: Autora (2022)

5.3.2 Casos da Literatura sobre o Monitoramento de Subsidência

As pesquisas mostraram que o posicionamento GNSS pode ser empregado no monitoramento do fenômeno da subsidência, o qual pode estar associado a atividades antrópicas, como exploração de água subterrânea, mineração, e a causas naturais como a dissolução de rochas cársticas, presença de camadas de solo mole, entre outros.

A seguir estão apresentados casos da literatura sobre o monitoramento de subsidência com GNSS:

- a) Subsidiência por Mineração – Kajzar (2018) e Ilieva *et al.* (2020);
- b) Subsidiência por Exploração de Água – Kearns *et al.* (2019) e Erdoğan *et al.* (2022);
- c) Subsidiência por Material do Solo – Fabris *et al.* (2022).

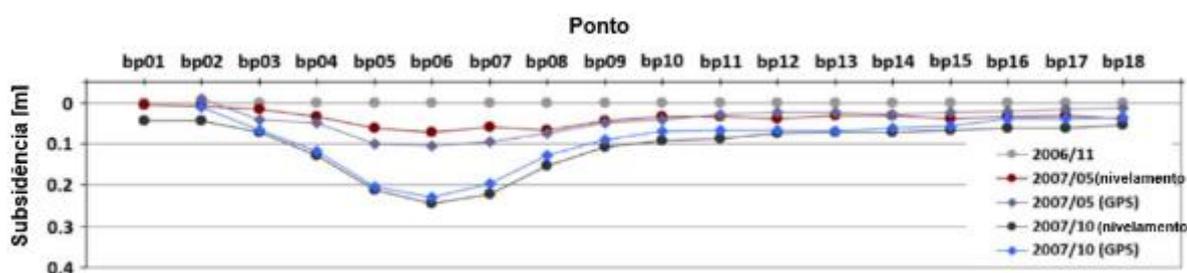
5.3.2.1 Subsidiência por Mineração

Uma região da República Tcheca tem sofrido com a problemática da subsidiência em decorrência da exploração de carvão, sendo objeto de estudo de Kajzar (2018), que apresenta o monitoramento com dados GNSS por meio do posicionamento relativo estático rápido, com uso da constelação GPS.

As medições do deslocamento foram realizadas de novembro de 2006 a março de 2011, sendo considerado um intervalo de 5 semanas entre as leituras enquanto a exploração ainda estava acontecendo, e foi mais espaçada após o encerramento das atividades de mineração.

O estudo permitiu comparar os resultados da campanha GNSS e valores medidos por nivelamento geométrico (Figura 37), de modo que a boa relação apresentada entre os dados, com pequenas diferenças, comprova a aplicabilidade do GNSS para fins de verificação de deslocamentos da superfície.

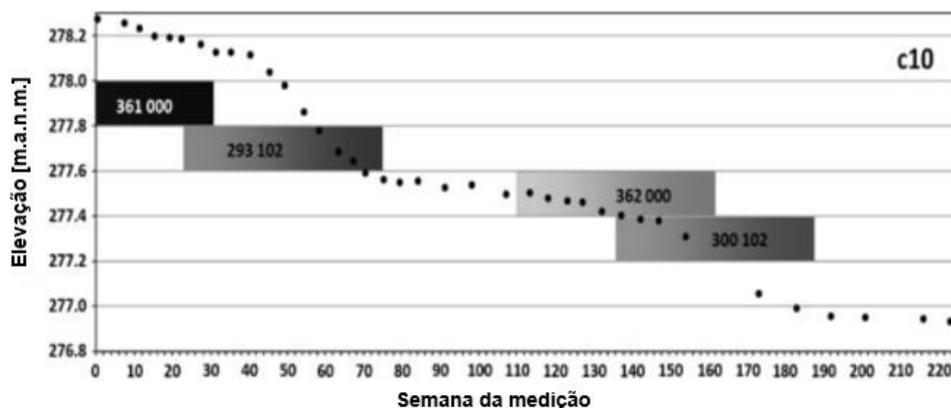
Figura 37 – Comparação dos resultados obtidos pelo método de nivelamento e GPS.



Fonte: Adaptado de Kajzar (2018)

Kajzar (2018) constatou que o comportamento do deslocamento vertical tem relação direta com o avanço da mineração, verificado na Figura 38, em que os retângulos sombreados indicam o tempo de exploração para as diferentes frentes. Verificou-se que há uma diminuição dos deslocamentos entre uma fase de exploração e outra, seguidos de um aumento acelerado no deslocamento e, por último, tem-se a fase de estabilização.

Figura 38 – Evolução do deslocamento vertical em relação a frente de trabalho em um ponto da área de estudo.



Fonte: Adaptado de Kajzar (2018)

Kajzar (2018) concluiu que as medidas do deslocamento superficial para a área de estudo estão em concordância com a teoria de formação de subsidência, de modo que o GNSS pode ser empregado como instrumento de verificação do comportamento de superfícies.

Um outro estudo acerca da temática, apresentado por Ilieva *et al.* (2020), retrata o monitoramento de uma mina de exploração de cobre na Polônia, que a ocorrência de um evento sísmico em 29/01/2019 teve como consequência um *sinkhole* (colapso).

O monitoramento foi composto por sismógrafos da rede local e regional, observações GNSS na estação LES1 (parte do projeto de controle europeu do movimento de placas), coletadas a 10Hz³ de todos os satélites GPS, GLONASS, Galileo e BeiDou visíveis; e acelerômetros.

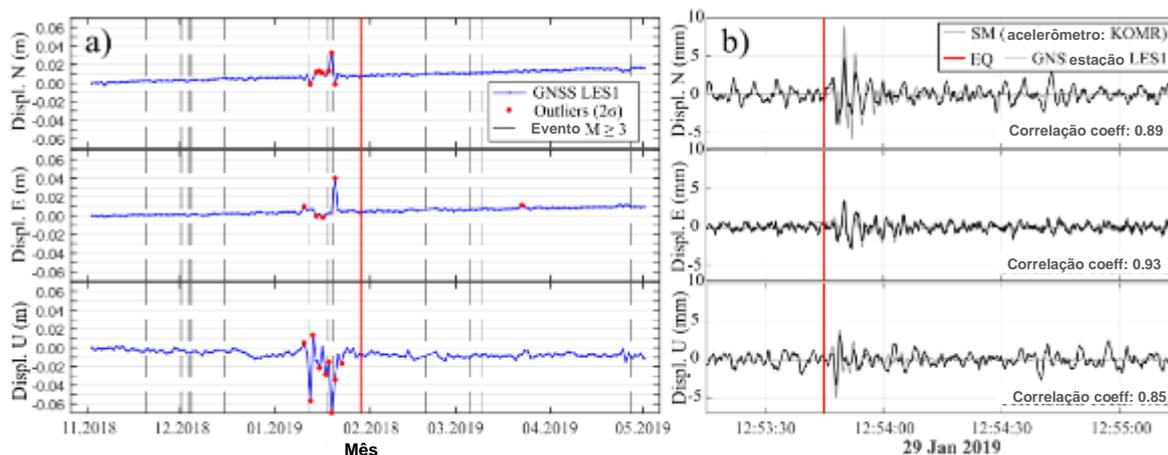
O evento sísmico precedeu o rompimento do teto da mina com explosão de rochas. Os autores afirmam que as deformações de áreas, induzidas por mineração, podem ser monitoradas por sensores GNSS. O monitoramento do caso foi realizado baseado em dois tipos de informação: longo e curto prazo. As informações de longo prazo se referem dados de deslocamento diários por um período de 6 meses (3 meses antes e 3 meses após o evento). O monitoramento de curto prazo consistiu na verificação das oscilações de alta frequência nas coordenadas horizontal e vertical, observadas durante o evento, para produzir uma imagem de alta frequência da passagem da onda sísmica.

³ Se refere a taxa de amostragem utilizada, sendo considerada 10 leituras em 1 segundo.

A análise de longo prazo, compreendida entre 1 de novembro de 2018 e 30 de abril de 2019 (Figura 39a) mostrou que, para o componente Norte–Sul cinco eventos de salto significativos (pontos vermelhos) foram registrados. Para o componente Leste–Oeste foram cinco eventos e, para o componente vertical foram nove eventos. O evento sísmico investigado está representado pela linha vermelha e nenhuma das componentes apresentou resposta imediata frente o evento. No entanto, outros eventos (marcados como uma linha tracejada cinza na Figura 39a) coincidem com erros grosseiros significativos; e para isso estudos adicionais devem ser realizados para investigar se há uma conexão entre deformações e eventos sísmicos induzidos.

As informações de curto prazo se referem a duas horas de dados, sendo plotado na Figura 39b o intervalo próximo ao evento. Além disso, tem-se o comparativo do GNSS com dados do acelerômetro instalado próximo ao receptor. Ilieva *et al.* (2020) constataram que há boa relação entre os dados GNSS e o acelerômetro, de modo que ambos apresentam maiores variações logo após ao evento sísmico para as três componentes de direção.

Figura 39 – Dados do deslocamento GNSS para as três direções em: (a) longo prazo; (b) curto prazo.



Fonte: Adaptado de Ilieva *et al.* (2020).

Os autores concluíram que o estudo GNSS de longo prazo revelou a possível detecção de outros eventos sísmicos de alta energia na área. No entanto, essa relação é variável, a depender da distância entre a estação GNSS e as fontes sísmicas, requerendo uma investigação mais extensa para esta relação. O evento de 29 de janeiro de 2019 foi o primeiro exemplo apresentado de aplicação do GNSS com alta taxa de aquisição em deformações de curto prazo causadas por sismos induzidos.

Ilieva *et al.* (2020) afirmam que a partir da boa correlação entre os dados de deslocamento GNSS e sísmico, na análise de curto prazo, consegue-se estabelecer que as estações GNSS podem ser usadas para dados alternativos adicionais, registrados em torno de um epicentro em uma área com baixa cobertura de sensores sísmicos.

Há ainda outros estudos que apresentam a compatibilidade do posicionamento GNSS com outras técnicas de monitoramento, a exemplo:

- a) InSAR (FURST *et al.*, 2021; PALAMÀ *et al.*, 2022; PARWATA *et al.*, 2020; ZHOU *et al.*, 2021b);
- b) outros instrumentos tradicionais na geotecnia (STUPAR; ROŠER; VULIĆ, 2020; ZHANG *et al.*, 2021).

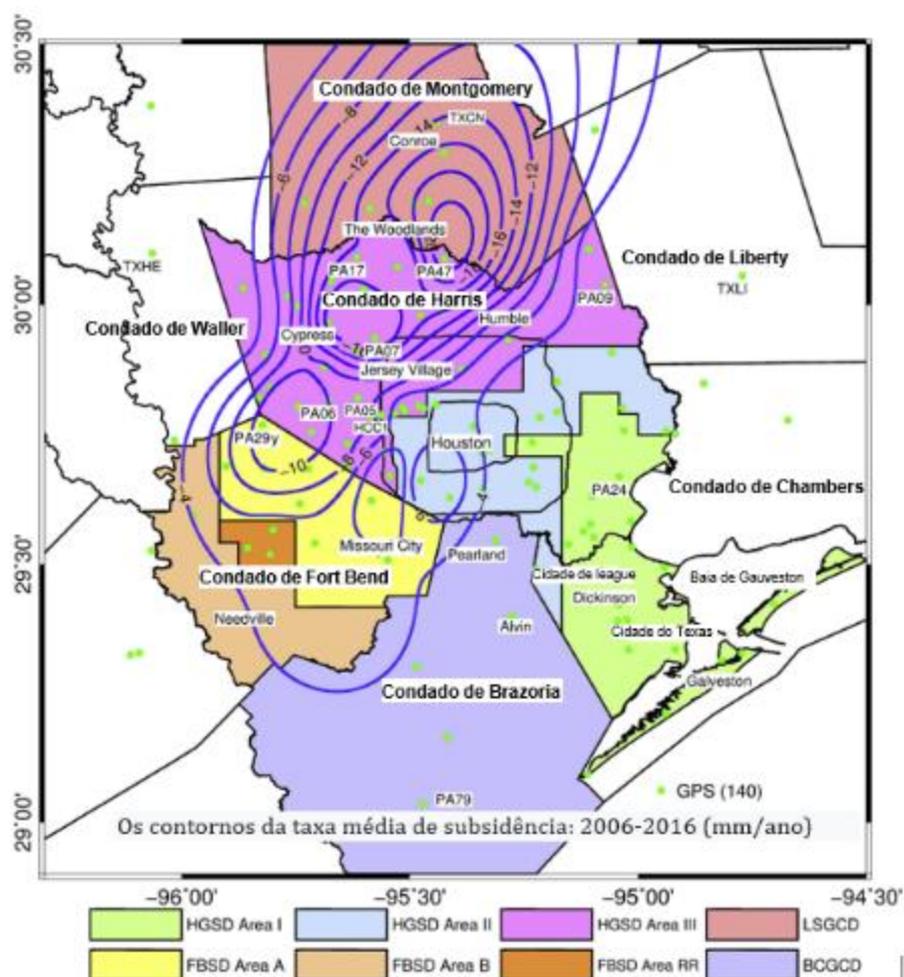
5.3.2.2 *Subsidência por Exploração de Água*

Outra causa antrópica para a ocorrência de subsidência está relacionada a exploração de água subterrânea. Nesta temática, há diferentes estudos que retratam o posicionamento GNSS como ferramenta de monitoramento dos deslocamentos associados ao fenômeno.

O estudo de Kearns *et al.* (2019) apresentou o monitoramento realizado em uma região do Texas acometida pela subsidência em razão da exploração de água. A área metropolitana de Houston representa uma das maiores áreas de subsidência nos EUA, e por isso foi estabelecida uma rede de monitoramento da região com mais de 200 estações GPS.

Análises foram realizadas ao longo do tempo, sendo elaborados mapas que estabelecem as taxas de movimentação anual no período de 2006 a 2016. O mapa de contorno apresentado na Figura 40 foi obtido em função das taxas de movimentação na direção vertical em 140 estações GPS permanentes com tempo de instalação superior a 3 anos. As áreas coloridas representam as zonas de regulação de águas subterrâneas impostas pelas agências locais de gerenciamento de águas subterrâneas.

Figura 40 – Mapa de contorno mostrando a taxa média de subsidência (mm/ano) durante o período de 2006 a 2016.

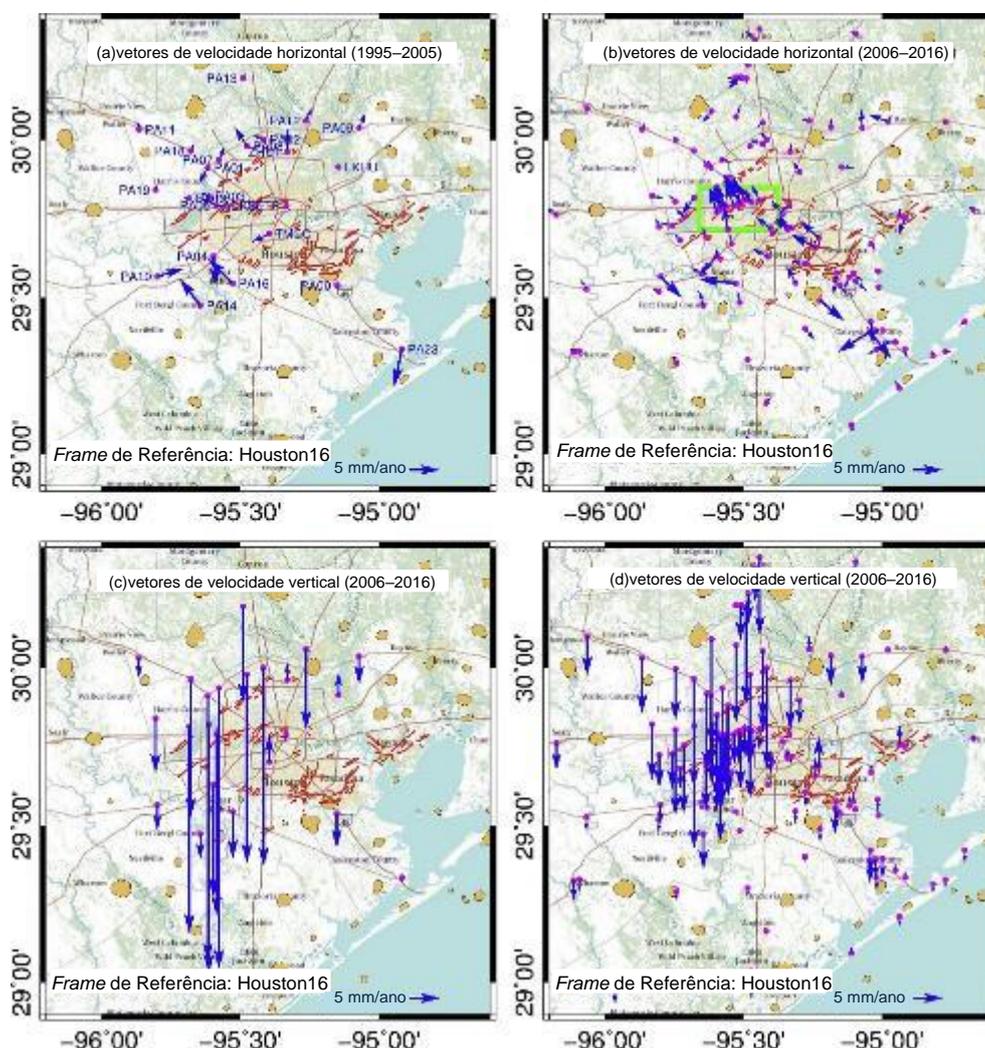


Fonte: Adaptado de Kearns *et al.* (2019).

De acordo com os autores, o mapa de contorno expressa o padrão espacial de subsidência em curso, ressaltando que na parte central do mapa a subsidência praticamente cessou (Área I e II), com uma taxa de movimentação anual menor que 4mm/ano. Na porção mais a norte do mapa, tem-se um movimento rápido com taxa superior a 1cm/ano (Área III e Área A), enquanto deslocamento vertical moderado (<1 cm/ano) é identificado em boa parte do mapa.

Em relação a evolução do deslocamento ao longo do tempo, Kearns *et al.* (2019) verificaram o comportamento dos vetores horizontal e vertical para as estações de monitoramento no intervalo de 1995 a 2005 e de 2006 a 2016, cujos resultados estão apresentados na Figura 41.

Figura 41 – Vetores de velocidade horizontal e vertical entre 1995 e 2005 [(a) e (c)] e entre 2006 e 2016 [(b) e (d)] de estações GPS contínuas (>3 anos) na área metropolitana de Houston.



Fonte: Adaptado de Kearns *et al.* (2019).

A partir da composição dos vetores em dois períodos de análise distintos, percebeu-se que houve diminuição nos valores de deslocamento identificados, tanto nas componentes horizontais (Norte e Leste) como na vertical. Esta redução foi justificada pela implantação de medidas de regulamentação para exploração de águas subterrâneas.

Em uma região da Polônia foi identificada a mesma problemática em decorrência da exploração de água subterrânea, com a ocorrência de colapso associado ao fenômeno. Erdoğan *et al.* (2022) analisaram o deslocamento da região através de 16 estações de monitoramento contínuo instaladas dentro e ao redor da região de interesse, cujos dados estão compreendidos entre 2008 e 2014, em sua maioria.

A análise dos deslocamentos em suas componentes horizontais e vertical confirmou um aumento linear do movimento no mesmo sentido, o que foi explicado, pelos autores, estar relacionado com o aumento da exploração de águas subterrâneas.

Outros estudos apresentam a aplicabilidade do posicionamento GNSS no monitoramento do fenômeno da subsidência para exploração de água. Há ainda outros casos que retratam o monitoramento da superfície através do GNSS considerando a influência da carga hidráulica subterrânea (LI *et al.*, 2022).

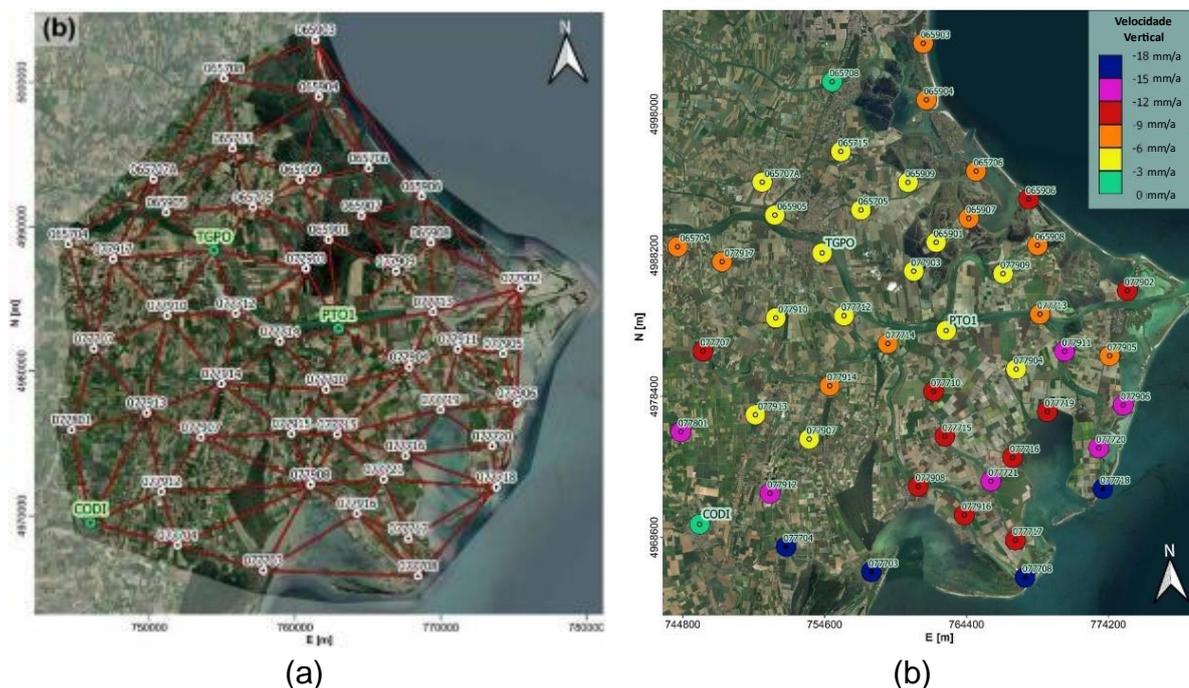
5.3.2.3 Subsidência por Material do Solo

Uma das causas naturais da ocorrência do fenômeno da subsidência se dá em razão de alterações no solo. Neste sentido tem-se o trabalho de Fabris *et al.* (2022), que retrata o monitoramento de subsidência na região do Delta do Rio Po, no norte da Itália, cuja componente natural de origem do deslocamento está fortemente correlacionada com a idade dos depósitos altamente compressíveis do Holoceno, que compõem os 30–40 m mais rasos da sequência sedimentar, e com movimentos tectônicos.

O monitoramento consistiu em três estações permanentes e 46 estações de campanha GNSS, em verde e branco, respectivamente na Figura 42a, com dados através de pesquisas realizadas em 2016, 2018 e 2020. De acordo com os autores, foram utilizados receptores GNSS que coletam informações das constelações GPS e GLONASS e outros que coletam dados das constelações GPS, GLONASS, Galileo e BeiDou.

Comparando o deslocamento vertical em cada ponto (Figura 42b), foi constatado que as estações não permanentes mostram taxas de deslocamento vertical maiores do que as estações permanentes. Esta situação foi explicada por Fabris *et al.* (2022) como sendo em decorrência de anomalias no deslocamento do solo relacionados a atividades antrópicas e/ou feições geológicas. No entanto, as estações em torno de TGPO e PTO1 forneceram valores semelhantes, confirmando a ordem de grandeza da taxa de movimentação vertical do solo na área central medida através dos dois métodos.

Figura 42 – (a) Rede de monitoramento GNSS; (b) Velocidades verticais obtidas nos levantamentos realizados em 2016, 2018 e 2020.



Fonte: Adaptado de Fabris *et al.* (2022)

Fabris *et al.* (2022) concluíram que a disponibilidade de dados GNSS no Delta do Po, como em muitas outras áreas, é espacialmente limitada. Neste sentido, o estudo propôs demonstrar a real utilidade de uma rede densa, sendo considerado um avanço no conhecimento das abordagens de avaliação de subsidência de terras.

A utilização de estações permanentes e não permanentes favoreceu a complementação das informações nas áreas que não continham referências de monitoramento contínuo.

5.4 MONITORAMENTO DE BARRAGENS

As barragens desempenham um papel essencial no desenvolvimento socioeconômico de um país devido à sua capacidade de armazenar água para consumo humano, irrigação de grandes áreas de campos agrícolas, controle de cheias e produção de energia hidroelétrica, entre outros (VAZQUEZ–ONTIVEROS *et al.*, 2022).

As falhas de barragens representam um alto risco para as pessoas, assentamentos humanos, infraestruturas e meio ambiente (SCAIONI *et al.*, 2018). Assim, é importante monitorar sua saúde estrutural para detectar anomalias que

possam ser um indicador de falha potencial e, assim, poder oferecer alertas precoces para ações corretivas apropriadas (VAZQUEZ–ONTIVEROS *et al.*, 2022).

As barragens devem ser monitoradas em diferentes partes, a exemplo dos aterros e ombreiras, das fundações, em interfaces solos estruturas, em obras auxiliares (ensecadeiras, vertedores etc.) ou ao longo da área do reservatório. Para tal, exige o uso de vários sensores para monitorar uma ampla variedade de grandezas, como deformação do corpo, deslocamentos de pontos, temperatura, taxas de infiltração e drenagem e nível piezométrico (REGUZZONI *et al.*, 2022).

No que diz respeito à medição de deslocamentos e deformações, ou seja, a variação geométrica da barragem e seu entorno, a abordagem típica consiste em monitorar um conjunto de pontos de controle devidamente estabelecidos em posições-chave, por exemplo, a crista da barragem, as margens a jusante, os encontros laterais, para recuperar o comportamento geral de toda a estrutura (REGUZZONI *et al.*, 2022).

Sistemas de monitoramento GNSS, usados em combinação com sistemas geotécnicos, hidráulicos e estruturais, podem permitir o monitoramento de deslocamentos de barragens em tempo real, com alta precisão até mesmo remotamente (PIPITONE *et al.*, 2018).

5.4.1 Resultados e Análise Bibliométrica

As análises realizadas na base de dados da Scopus para o período de 2018 a 2022 apresentou uma certa estabilização no quantitativo de artigos publicados na temática do monitoramento de barragens por meio do GNSS, o que pode ser verificado através da Figura 43. O ano com maior registro foi 2018, com cinco publicações, seguido de um declínio em 2019. A partir de 2020 constata-se uma estabilização no quantitativo de publicações.

Figura 43 – Evolução do número de publicações na base de dados Scopus no período de 2018 a 2022 sobre aplicação de GNSS em barragem, conforme metodologia apresentada no Capítulo 4.



Fonte: Autora (2022)

As publicações são originárias, em sua maioria, de três instituições que apresentam mais de um artigo publicados (Tabela 16). Percebe-se que as instituições estão situadas na China e Itália, totalizando seis artigos, o que representa 35% da amostra total de publicações.

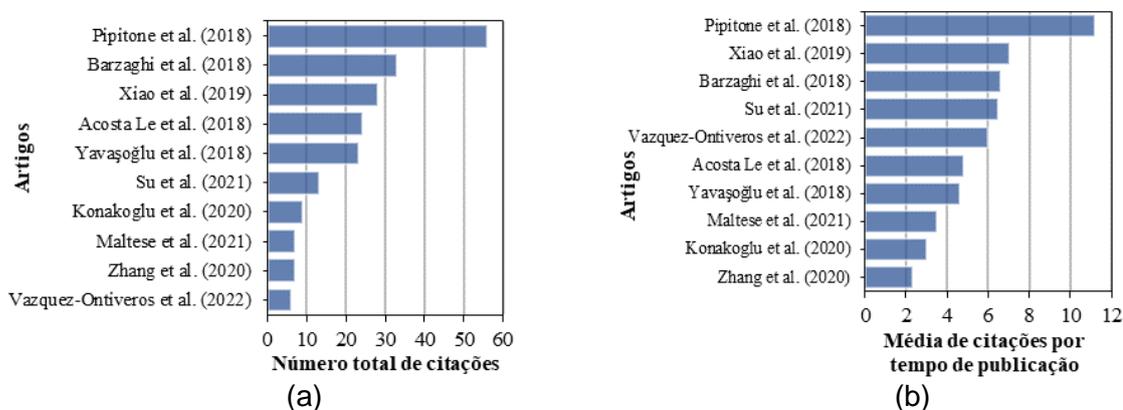
Tabela 16 – Principais instituições com na base de dados Scopus no período de 2018 a 2022 sobre aplicação de GNSS em barragem, conforme metodologia apresentada no Capítulo 4.

Instituições	País	Quantidade de artigos	Referência
<i>Wuhan University</i>	China	2	Jiang et al. (2022); Xi et al. (2022)
<i>Politecnico di Milano</i>	Itália	2	Reguzzoni et al. (2022); Barzaghi et al. (2018)
<i>Università degli Studi di Palermo</i>	Itália	2	Maltese et al. (2021); Pipitone et al. (2018)

Fonte: Autora (2022)

As informações na base de dados da Scopus atestam que, para os 17 artigos selecionados, o total de citações foi de 211, porém apenas dez artigos detém a maioria da quantidade de citações, como apresentado na Figura 44a. Dentre os dez artigos com as maiores médias de citação por tempo de publicação (Figura 44b), a maioria também aparecem listados como aqueles com os maiores números de citação (Figura 44a), o que revela a sua relevância para o tema.

Figura 44 – Análise das citações dos artigos na base de dados Scopus no período de 2018 a 2022 sobre aplicação de GNSS em barragem, conforme metodologia apresentada no Capítulo 4: (a) 10 maiores quantidade de citações, 10 artigos; (b) 10 maiores médias de citações por tempo de publicação, 10 artigos.



Fonte: Autora (2022)

Dentre os artigos analisados, tem-se destaque para Pipitone *et al.* (2018) com o maior número total de citações e também a maior média de citação por tempo de publicação. O trabalho de Vazquez–Ontiveros *et al.* (2022), mesmo sendo um trabalho do último ano, está bem-posicionado na média de citações por tempo de publicação, o que se pode inferir na sua relevância para o meio acadêmico.

No que diz respeito aos periódicos sob os quais as publicações estão vinculadas, tem-se que quatro revistas têm maioria dos artigos, como apresentado na Tabela 17. O periódico de maior impacto foi o *Sensors*, representando 17% dos artigos. As revistas apresentam bons índices, o que favorece o impacto das publicações efetuadas.

Tabela 17 – Principais periódicos na base de dados Scopus, com aplicação de GNSS em barragem no período de 2018 a 2022, conforme metodologia apresentada no Capítulo 4, com as respectivas métricas de impacto.

Periódicos	Distribuição dos artigos		Métricas de impacto		Classificação Qualis/CAPES Engenharias I	
	Quantidade	Contribuição	CiteScore 2021	Journal Citation Reports (JCR) 2021	Quadrênio 2013–2016	Quadrênio 2017–2020
1 <i>Sensors (Switzerland)</i>	3	17,65%	6.4	3.847	A2	A2
2 <i>Geomatics, Natural Hazards and Risk</i>	2	11,76%	5.8	3.922	–	–
3 <i>IEEE Access</i>	2	11,76%	6.7	3.476	–	A3
4 <i>Remote Sensing</i>	2	11,76%	7.4	5.349	B1	A1
Total	9	52,93%	–	–	–	–

Fonte: Autora (2022)

A seguir estão apresentados casos da literatura sobre o monitoramento de barragem com GNSS:

- a) Barragem de Terra – Acosta *et al.* (2018) e Pipitone *et al.* (2018);
- b) Barragem de Concreto – Konakoglu; Cakir e Yilmaz (2020).

5.4.2.1 Barragem de Terra

Em relação as barragens de terra, tem-se diferentes estudos que apresentam o posicionamento GNSS como monitoramento dos deslocamentos superficiais das estruturas, um desses casos é apresentado por Acosta *et al.* (2018). O estudo retrata aplicação do GNSS no monitoramento dos deslocamentos horizontais em uma barragem de terra na Espanha, por meio de sete campanhas de levantamento entre 2008 e 2016, utilizando o posicionamento relativo estático.

Os pontos de controle estão distribuídos ao longo de quatro seções no corpo da barragem, que apresenta 80m de altura e 1480m de comprimento na sua crista. As medições foram feitas de fevereiro a julho de 2008, de março a julho de 2013, de março de 2013 a agosto de 2014, de março de 2013 a setembro de 2015, de março de 2013 a setembro de 2016, cujos resultados estão apresentados na Figura 46.

Figura 46 – Deslocamentos horizontais medidos com GNSS.



Fonte: Adaptado de Acosta *et al.* (2018)

Os deslocamentos verticais foram obtidos por meio de nivelamento e analisados de forma conjunta com o GNSS. De acordo com Acosta *et al.* (2018), a região onde

se identifica os maiores deslocamentos horizontais coincide com a que apresenta os deslocamentos verticais mais intensos. Além disso, foi destacado que esses deslocamentos se deram em razão da força de empuxo provocada pela água.

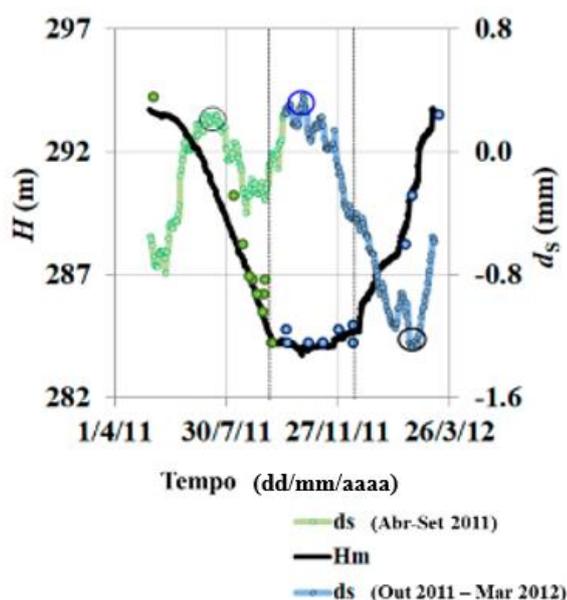
Os autores também verificaram que o deslocamento horizontal máximo se deu em torno de 4 cm em 2008, e depois diminuiu para escala milimétrica. Na região das bermas constatou-se que o comportamento do deslocamento foi semelhante a crista, porém com magnitude menor.

Sendo assim, Acosta *et al.* (2018) concluíram que os resultados demonstram a viabilidade do uso do GNSS como método de monitoramento dos deslocamentos superficiais, fornecendo parâmetros de confirmação e aprimoramento para possíveis modelagens matemáticas de previsão de deslocamento.

Outro estudo acerca das barragens de terra foi realizado por Pipitone *et al.* (2018), no qual os autores estabelecem uma relação entre os deslocamentos medidos e o nível do reservatório.

Foi verificado que o deslocamento máximo medido na barragem se deu quando o nível de água se encontra em sua cota mínima, como apresentado no círculo azul da Figura 47. No entanto, o nível da água não explica totalmente o comportamento do deslocamento da barragem, podendo este estar relacionado também com a temperatura média do ar e da superfície.

Figura 47 – Resultados do monitoramento do nível da água e dos deslocamentos medidos com GNSS em barragem de terra.



Fonte: Adaptado de Pipitone *et al.* (2018)

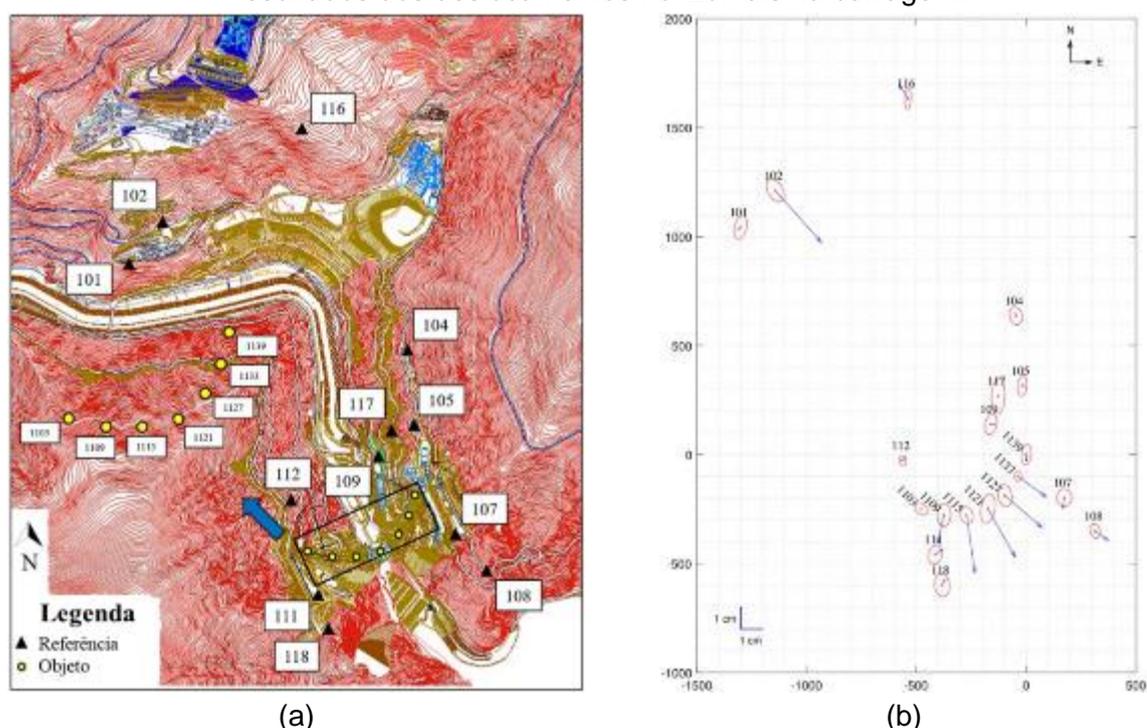
Outros autores também avaliaram a aplicabilidade do posicionamento GNSS para medição de deslocamentos em barragens de terra, empregando as informações para o monitoramento dos deslocamentos superficiais (VAZQUEZ–ONTIVEROS *et al.*, 2022), e em sistemas de alerta (REGUZZONI *et al.*, 2022).

5.4.2.2 Barragem de Concreto

Em relação as barragens de concreto, tem-se que o artigo publicado por Konakoglu; Cakir e Yilmaz (2020) apresenta a aplicação do GNSS no monitoramento dos deslocamentos. Os autores monitoraram dos deslocamentos horizontais da barragem de concreto em arco de Deriner, na Turquia, por meio de campanhas de posicionamento GNSS no método relativo estático, utilizando sete pontos de verificação e 12 estações de referência instaladas próximas a estrutura (Figura 48a).

As medições GNSS foram realizadas em maio e novembro de 2016, maio e agosto de 2017, estando os resultados dos deslocamentos horizontais apresentados na Figura 48b. Os autores confirmaram que os maiores deslocamentos medidos se encontram no trecho central da crista e que os deslocamentos reduzem em direção as ombreiras da barragem.

Figura 48 – (a) Posição dos pontos de verificação na barragem de arco na Turquia; (b) resultados dos deslocamentos horizontais na barragem.



Fonte: Adaptado de Konakoglu; Cakir e Yilmaz (2020)

Através deste estudo Konakoglu; Cakir e Yilmaz (2020) confirmaram que a técnica GNSS pode ser usada de forma eficiente para monitorar com precisão os deslocamentos horizontais de uma barragem em arco. Além disso, os resultados revelaram que os deslocamentos horizontais foram afetados pelo nível d'água do reservatório.

Para além do caso apresentado, há estudos posteriores que avaliam a mesma barragem, a citar Konakoglu (2021), que aplica modelos de deformação para determinar os deslocamentos, considerando os efeitos da mudança do nível da água do reservatório.

5.5 SÍNTESE DAS APLICAÇÕES

O capítulo apresenta diferentes publicações científicas existentes na literatura a respeito da temática da aplicação do GNSS no monitoramento de superfície em barragens, subsidência e taludes.

Através dos resultados foi possível observar que o número de publicações tem crescido durante o intervalo de tempo analisado, em especial para a utilização do GNSS em taludes. Apenas para a utilização em barragem tem-se uma tendência a estabilização, com poucos artigos que retratam o assunto de monitoramento.

Foi constatado que a Itália detém o maior número de instituições que pesquisam sobre a temática, quando verificado os três campos de aplicação, sendo majoritária nas aplicações em talude e subsidência. Na sequência, a China está como a segunda em quantidade de instituições, com maior índice para a área de barragens.

A literatura apresenta diversos casos que retratam o posicionamento GNSS como ferramenta de monitoramento de taludes, de barragens e de subsidência, independentemente do tipo, material constituinte ou mecanismo de deflagração do movimento.

Os estudos de caso mostraram que a aplicação do GNSS no monitoramento favoreceu o entendimento dos mecanismos deflagradores de movimentação. Os taludes mostraram relação com os dados de chuva, com incremento do deslocamento mediante a ocorrência de eventos de precipitação intensa (ŠEGINA *et al.*, 2020). Bem como, foi verificado que o nível do reservatório exerce efeito sobre as movimentações do corpo da barragem (PIPITONE *et al.*, 2018).

A análise de subsidência apresentou uma relação entre os valores de deslocamento e eventos sísmicos identificados na região (ILIEVA *et al.*, 2020), bem como a relação entre a movimentação e a frente de escavação (KAJZAR, 2018). Estas aplicações mostram a possibilidade da utilização do GNSS como instrumento complementar para identificação de eventos sísmicos e controle de frente de trabalho.

Através dos artigos, também pode-se destacar que alguns cuidados devem ser observados na instalação das estações GNSS, para que possam refletir adequadamente os movimentos verificados na superfície (CARLÀ *et al.*, 2019). Além disso, tem-se que o monitoramento pode ser realizado de forma contínua, com estações permanentes no local de estudo, ou levantamento por campanhas, em que são verificadas informações em determinados períodos de tempo específicos.

Deve ser destacado, que os dados GNSS foram utilizados, para maioria dos casos apresentados, através do método de posicionamento relativo ou RTK, fazendo uso de estações de referência instaladas próximo ao objeto de estudo ou de estações pertencentes a redes de monitoramento contínuo.

Em virtude desses resultados, a Tabela 18 apresenta alguns artigos referentes a aplicação do GNSS em taludes, subsidência e barragens, destacando as suas principais contribuições. Por meio desta é possível perceber que o GNSS pode ser empregado para compor um sistema de controle e alerta para as diferentes aplicações. Além disso, observa-se que o posicionamento GNSS pode ser compatibilizado com os dados de outros instrumentos, como aqueles tradicionais (pluviômetro, inclinômetro, estação total, entre outros) ou técnicas de sensoriamento remoto / fotogrametria (InSAR, VANT etc.). A integração das técnicas permite o melhor entendimento dos mecanismos de movimentação da superfície.

Além do método de posicionamento, alguns trabalhos demonstravam que as constelações de satélite também exercem significância sobre os resultados observados, sendo verificadas melhorias na precisão mediante o uso de diferentes constelações, como a associação entre GPS e GLONASS, ou GPS, GLONASS, Galileo e Beidou (FABRIS *et al.*, 2022; ILIEVA *et al.*, 2020; ŠEGINA *et al.*, 2020).

Sendo assim, foi possível constatar a aplicabilidade do posicionamento GNSS a ser empregado para o monitoramento de diferentes superfícies, relacionadas a encostas, barragens ou fenômeno da subsidência.

Tabela 18 – Principais estudos do posicionamento GNSS aplicado a taludes, subsidência e barragem.

(continua)

Aplicação do GNSS no monitoramento de Taludes			
Estudo	Local	Método de posicionamento	Descrição
Carlà <i>et al.</i> (2019)	Itália	Relativo estático	Integração entre os métodos de monitoramento com GNSS, GBInSAR e InSAR, apresentando de que forma os diferentes instrumentos podem ser utilizados.
Šegina <i>et al.</i> (2020)	Eslovênia	RTK	Verificação da precisão de receptor GNSS de baixo custo para o monitoramento de encostas.
Fan <i>et al.</i> (2019)	China	—	Monitoramento de uma encosta com GNSS, medidores de trinca, tiltímetro e pluviômetro e elaboração de sistema de alerta baseado em dados de deslocamento superficial.
Li <i>et al.</i> (2021)	China	RTK	Elaboração de algoritmo para sistema de alerta baseado em IoT, fazendo uso de conexão 5G para transmissão dos dados GNSS.
Huang <i>et al.</i> (2022)	China	—	Aplicação de métodos de suavização para redução de ruídos com o intuito de formar um possível sistema de alerta em função dos dados GNSS.
Wu <i>et al.</i> (2021)	China	Relativo	Verificação de limiares de deslocamento para sistema de alerta com verificação do GNSS, chuva e nível d'água em uma área de reservatório de barragem.
Li <i>et al.</i> (2022)	República Tcheca	PPP e relativo estático	Verificação da precisão do posicionamento utilizando diferentes combinações de satélites.
Rechberger <i>et al.</i> (2021)	Áustria	DGNSS	Monitoramento de um deslizamento em rocha através de dados de diferentes origens (GNSS, VANT, extensômetro, taquimetria), favorecendo o entendimento sobre o sistema de falhas da região.
Chen <i>et al.</i> (2018)	China	Relativo	Monitoramento de encosta através de GNSS, VANT, informações de campo. Favorece a compreensão dos mecanismos de falha do talude.
Aplicação do GNSS no monitoramento de Subsidência			
Estudo	Local	Método de posicionamento	Descrição
Fabris <i>et al.</i> (2022)	Itália	–	Integração da técnica de monitoramento GNSS e InSAR, superando as limitações de cada técnica em uma área de subsidência no norte da Itália, em razão de fatores naturais como a composição do solo (material compressível).
Wang <i>et al.</i> (2022)	EUA	PPP	Monitoramento de região no EUA que sofre com subsidência pela exploração de água subterrânea, com verificação do deslocamento com GNSS.
Palamà <i>et al.</i> (2022)	Polônia	Relativo	Comparativo das informações InSAR e GNSS, em conjunto com informações sísmicas em área de exploração de minerais de cobre.

(conclusão)

Zhang <i>et al.</i> (2022)	China	Relativo	Verificação a longo prazo 1999 a 2017 de informações GNSS do movimento crustal em uma região da China.
Erdoğan <i>et al.</i> (2022)	Polônia	Relativo	Subsidência em função da exploração de água subterrânea na Polônia, com determinação dos deslocamentos por meio do uso de GNSS.
Nespoli <i>et al.</i> (2021)	Itália	–	Subsidência em função da exploração de água subterrânea, com determinação dos deslocamentos por meio do uso de GNSS e verificando também os níveis de chuva.
Cenni <i>et al.</i> (2021)	Itália	–	Subsidência pela ocorrência de solo compressível na região, com os deslocamentos medidos por GNSS contínuos, de campanha e InSAR
Del Soldato <i>et al.</i> (2018)	Itália	–	Combinação do monitoramento com InSAR e GNSS para definição de mapas de subsidência.
Kearns et al (2019)	EUA	–	Definição de quadro de referência local para o Texas com dados de GPS contínuo, apresentação de estudos de caso.

Aplicação do GNSS no monitoramento de Barragem

Estudo	Local	Método de posicionamento	Descrição
Acosta <i>et al.</i> (2018)	Espanha	Relativo Estático	Verificação do posicionamento GNSS em medições do deslocamento horizontal em uma barragem de terra, comparando os resultados reais com simulações por métodos dos elementos finitos.
Vazquez-Ontiveros <i>et al.</i> (2022)	México	Relativo	Monitoramento do deslocamento e do nível de água com GNSS em uma barragem de terra.
Pipitone <i>et al.</i> (2018)	Itália	Relativo	Comparativo das informações InSAR, imagens ópticas e GNSS, sendo verificado informações de deslocamento e nível de água do reservatório.
Jiang <i>et al.</i> (2022)	China	Relativo	Compatibilização de levantamento GNSS com medidores tradicionais, utilizando diferentes constelações de satélites para aumentar a precisão.
Konakoglu <i>et al.</i> (2020)	Turquia	Relativo	Aplicação de modelos para verificação do comportamento da barragem de arco por meio do GNSS.
Yavaşoğlu <i>et al.</i> (2018)	Turquia	–	Monitoramento de longo prazo com GNSS e verificação do impacto do nível de água em barragem de arco.
Su <i>et al.</i> (2021)	China	–	Modelo de previsão do deslocamento de uma barragem de arco através de algoritmo <i>Random Forest</i> usando dados GNSS.

Fonte: Autora (2022).

6 CARACTERÍSTICAS DA APLICAÇÃO DO GNSS PARA O MONITORAMENTO

Neste capítulo é apresentado alguns aspectos sobre a utilização do posicionamento GNSS, com destaque para etapas que compõe a sua utilização, e os cuidados a serem tomados para que os dados obtidos sejam satisfatórios. Ressalta-se que não se tem a intenção de esgotar todos os aspectos envolvidos no monitoramento, pois cada projeto tem suas peculiaridades e a tecnologia envolvida está em processo de evolução, de modo que se tem continuamente a disponibilidade de novas técnicas, novos *softwares*, novos equipamentos. Sendo assim, são apresentados aspectos fundamentais a respeito da sua aplicação.

Além disso, são feitas considerações sobre as vantagens de utilizar o posicionamento GNSS para fins geotécnicos, as limitações envolvidas na técnica e as perspectivas de avanço e melhoria do monitoramento realizado com o GNSS.

6.1 UTILIZAÇÃO E CUIDADOS

Para utilização do posicionamento pelo GNSS para fins de monitoramento, é necessário inicialmente o planejamento do levantamento. Deve-se selecionar as feições a serem monitoradas na área de interesse, estabelecer o método de posicionamento a ser utilizado, quantidade e tipo de monitoramento, se por campanha ou contínuo (HU; CHEN; ZHANG, 2019; MONICO, 2008).

Além disso, para construção de uma infraestrutura geodésica regional moderna três componentes fundamentais devem ser consideradas: uma rede de estações GNSS (*hardware*), pacotes de *software* sofisticados para processamento de dados brutos e quadros de referência regionais rigorosos (*firmware*) (WANG *et al.*, 2022a).

Neste sentido, definições e cuidados a serem considerados na fase de obtenção e processamento dos dados estão descritos na sequência, para que se possa atingir resultados satisfatórios por meio do GNSS.

6.1.1 Obtenção das informações

Inicialmente, busca-se estabelecer quais os objetivos e resultados esperados para a campanha de monitoramento. A partir de então, tem-se as diretrizes para

concepção do planejamento da rede de estações, observando alguns cuidados e recomendações, presentes na literatura técnica.

Sendo escolhido a realização do monitoramento de campanha, deve ser estabelecido o intervalo de repetição do levantamento e o tempo de observação em cada ponto. De maneira geral, o comprimento da sessão de observação tem impacto na precisão do posicionamento, ou seja, sessões mais longas resultam em maior precisão, mas também podem aumentar os custos devido ao tempo extra necessário para coletar os dados (LI; KAČMAŘÍK; POSPÍŠIL, 2022). A duração da sessão também pode variar em relação ao método de posicionamento empregado, seja relativo estático, relativo cinemático, RTK, entre outros. Sendo assim, é importante encontrar um equilíbrio entre comprimento da sessão e nível de precisão desejado.

Os pontos a serem monitorados precisam ser representativos da região de estudo, de modo que as estações devem estar localizadas em áreas tectonicamente estáveis, construídas em rocha sólida ou solo resistente, e o ponto na superfície é identificado com um monumento implantado em terreno estável, se possível em rocha, ou blocos de concreto com fundação suficientemente profunda (ERDOĞAN *et al.*, 2022; GILI; COROMINAS; RIUS, 2000; SEEBER, 2003).

Além disso, as estações devem estar posicionadas em pontos que apresentem menos obstruções, como áreas de floresta, prédios altos, postes ou linhas de energia, pois estes prejudicam a visibilidade dos satélites e agregam erros nas medições realizadas (SEEBER, 2003). Para minimizar os erros associados a multicaminho é recomendada a utilização de receptores de dupla frequência projetados adequadamente (por exemplo, uma antena *choke-ring*) (SAVŠEK *et al.*, 2010; SCAIONI *et al.*, 2018).

Não sendo possível a instalação das estações em locais abertos, sem obstrução do sinal, o problema relacionado a má geometria do satélite pode ser solucionado de duas formas (JIANG *et al.*, 2022). A primeira se refere a utilização de sinais multi-GNSS, de todos os satélites disponíveis, no processamento. A segunda se dá pela combinação de informações GNSS e observações terrestres clássicas, como o nivelamento.

De acordo com IBGE (2006), o tipo de equipamento a ser utilizado é escolhido em relação a precisão a ser atingida através do posicionamento. Em situações cujas linhas de base variam entre 5 e 10 km, a acurácia obtida com receptores de baixo custo e de frequência única é similar à frequência dos receptores de dupla frequência

(L1/L2) (CARDOSO; GIORGINI; PAULA, 2020). Sendo assim, é recomendada a verificação dos tipos de receptor disponíveis e a sua adequação a uma dada situação.

De acordo com Seeber (2003), para realização de posicionamento com diferentes estações é indicado que estas sejam instaladas próximas umas das outras, ou seja, linhas de base curta, o que favorece a redução de erros, pois erros associados a órbita, ao relógio do satélite, e erros de modelagem ionosférica se anulam. Ressalta-se que, diferentemente dos métodos tradicionais, as estações GNSS instaladas para o monitoramento de uma área, não necessitam de intervisibilidade.

As estações a serem utilizadas seguem preparações no que diz respeito ao estabelecimento de parâmetros satisfatórios, principalmente em relação a máscara de elevação a ser aplicada, para visualização dos satélites adequados, e ao valor máximo de DOP (*Dilution of Precision*) a ser utilizado (IBGE, 2006).

A máscara de elevação varia entre 5° e 15° na maioria dos posicionamentos realizados em áreas com poucas obstruções, e para áreas urbanas, com obstruções, é necessário fazer um estudo dos satélites para aquela localidade e assim definir melhor a máscara de elevação a ser aplicada (SEEBER, 2003; SETTI JÚNIOR *et al.*, 2020).

O fator DOP representa a dispersão ou diluição dos sinais GNSS no espaço. Portanto, quanto menor for o fator DOP, mais precisa será a observação GNSS (GILI; COROMINAS; RIUS, 2000). É ideal que o valor de DOP seja próximo a 1, mas é aceitável geometrias de satélites que forneçam valores de DOP até 3 (RICS, 2010).

O método de posicionamento a ser utilizado é dependente do objetivo do levantamento, da precisão exigida, do número e tipo de receptores disponíveis e das condições logísticas. O método de posicionamento mais utilizado para aplicações geotécnicas é o relativo, em especial quando tem-se a intenção de atingir melhores precisões. Este método é baseado em uma combinação de observações feitas por um receptor na área de interesse e outro localizado em região estável (LI; KAČMAŘÍK; POSPÍŠIL, 2022; MONICO, 2008). Este método pode ser implementado em tempo real, usando a técnica RTK (WANG *et al.*, 2022b) ou em um modo pós processado, como a técnica relativa estática (ACOSTA *et al.*, 2018; CARLÀ *et al.*, 2019).

Outro parâmetro no processo de coleta de dados que merece atenção é a taxa de amostragem da observação, que corresponde a frequência com que as medições, posição e velocidade, são tomadas. De maneira geral, quanto mais alta a taxa de amostragem, maior é a precisão obtida, porém há aumento no uso de recursos e por

isto deve ser realizado estudo sobre a taxa de amostragem ideal para uma dada aplicação (LI; KAČMAŘÍK; POSPÍŠIL, 2022).

A forma de transmissão dos dados para as centrais de processamento também deve ser planejada em momento anterior a implantação das estações. Há diferentes formas de envio dos dados, como ondas de rádio VHF ou UHF, e mais recentemente, por protocolos de internet (NTRIP) que foram facilitados em decorrência da telefonia celular (COSTA *et al.*, 2008). Este protocolo foi desenvolvido para contornar a limitação que as ondas de rádio tinham para superar longas distancias entre as estações (HOFMANN–WELLENHOF; LICHTENEGGER; WASLE, 2008).

Deve-se mencionar que a utilização de transmissão via *wireless* pode incorrer na necessidade de instalação de um repetidor de sinal, em especial para grandes áreas, sendo inseridos, preferencialmente, em uma região central entre as estações e de maneira mais elevada (CARDOSO; GIORGINI; PAULA, 2020)

Em função das informações já mencionadas tem-se que o plano de observação inclui:

- a) O método de posicionamento;
- b) Duração de cada sessão;
- c) Taxa de amostragem;
- d) Tipo de rede de referência;
- e) Local de instalação das antenas;
- f) Parâmetros das estações (DOP, máscara de elevação).

6.1.2 Processamento

A etapa de processamento das informações permite obter como resultado a posição tridimensional da estação, parâmetros de atmosfera e a verificação da qualidade do posicionamento.

Deve-se mencionar que a etapa de processamento pode se dar em período após a realização das campanhas, ou seja, como uma atividade de escritório, bem como pode ser realizada *in loco*. Esta última se refere a aplicação do monitoramento em tempo real, sendo assim, o próprio receptor é provido de *software* capaz de processar os dados e enviar as informações para as centrais de controle.

Há disponível no mercado uma série de programas que realizam o pós-processamento dos dados, tanto de caráter comercial como científico. Os programas

comerciais estão associados ao tipo de antena utilizado, ou seja, cada fabricante fornece ao mercado o seu *software* individual. Na maioria desses programas é possível realizar as tarefas de processamento dos dados sem que haja interferência do operador (MONICO, 2008).

A diferença para os *softwares* científicos reside na disponibilidade de opções de processamento, ou seja, é possível escolher as etapas de processamento, definir linhas de base, estações de referência, entre outros. Além do mais, os programas científicos, em razão dessas interferências, são capazes de promover resultados mais precisos e acurados (HOFMANN–WELLENHOF; LICHTENEGGER; WASLE, 2008).

Em razão das diferentes possibilidades de antenas para captação do sinal é fundamental que os dados estejam em formato compatível para o seu processamento. Então foi desenvolvido um formato universal (RINEX), de modo que os dados binários das estações são convertidos para este formato, permitindo a integração entre diferentes modelos de estações e *softwares* (SEEBER, 2003).

O aumento de constelações e sistemas de satélites teve como consequência o aumento de observações captadas pelos receptores GNSS. Dessa forma, o tempo de processamento dos dados no formato RINEX foi aumentado, dificultando até o compartilhamento e transmissão desses dados. Como solução, foi criado o formato HATANAKA, que é a compressão do formato RINEX, bastante utilizado e compatível com o centro de processamento do IBGE.

Em relação aos tipos de erros associados ao posicionamento GNSS, é possível realizar medidas que favoreçam a sua eliminação ou mitigação. A maioria dos erros podem ser corrigidos na etapa de pré-processamento das informações, como erros associados a refração ionosférica e troposférica, erros de órbita e de relógio, entre outros.

O pré-processamento dos dados irá promover correções para os erros associados, bem como garantir melhores precisões nos levantamentos realizados. RICS (2010) apresenta algumas sugestões a serem observadas na etapa de processamento das informações:

- a) Verificação da altura da antena;
- b) Usar os padrões do fabricante para processamento dos parâmetros;
- c) Verificação dos pontos da rede de monitoramento;
- d) Observação de problemas gerados nas linhas de base.

Tendo sido realizada as correções dos dados, ou seja, mitigados ou removidos os erros associados as medições, procede-se com a etapa de estimativa da posição. Neste passo, os dados processados são usados para estimar a posição, velocidade e altura do receptor GNSS. Esta estimativa é baseada nas observações dos sinais dos satélites GNSS e nas informações de tempo fornecidas pelo receptor.

Tem-se que a forma de processamento dos dados é dependente do método de posicionamento utilizado, seja em tempo real ou por campanha, relativo ou absoluto. Sendo assim, é necessário estabelecer algumas características do posicionamento para que se consiga determinar as etapas adequadas de pós-processamento.

De maneira geral, para que haja a definição da posição das estações é necessário fazer considerações acerca das órbitas e relógios dos satélites, correção do centro de fase das antenas dos satélites e receptores, parâmetros de transformação ITRF/SIRGAS 2000, modelo de carga oceânica, modelo de velocidades e modelo de ondulação geoidal (PERDIGÃO; SANTOS, 2010).

Essas correções e parâmetros são calculados pelos centros de processamento. No Brasil por exemplo, existe o IBGE-PPP, que utiliza parâmetros globais para obter coordenadas por meio do Posicionamento por Ponto Preciso (PPP). Para utilizar o IBGE-PPP, é necessário ter o arquivo RINEX/HATANAKA com os dados observados, altura e tipo da antena utilizada.

Para a etapa de controle de qualidade (pós-processamento), através de testes estáticos é possível verificar se as medições realizadas para um dado ponto estão dentro de níveis de aceitabilidade. De acordo com RICS (2010), os elementos gerais importantes para controlar a qualidade dos dados no pós-processamento são:

- a) garantir que as soluções de linha de base corretas sejam processadas e selecionadas;
- b) observações de linha de base fora da precisão exigida são excluídas ou observadas novamente;
- c) o ajuste da rede é calculado com uma estratégia de ponderação correta (modelo estocástico);
- d) transformações de coordenadas e projeções são computadas corretamente.

Estas verificações devem ser feitas para se obter resultados satisfatórios de posição e velocidade através do processamento de dados GNSS, sendo considerada como o Ajustamento das Observações

Tendo sido o processamento aceito em determinado nível de confiança, deve-se efetuar a transformação das coordenadas para o sistema de referência de interesse e daí para a projeção cartográfica. Para o caso das aplicações na engenharia geotécnica é usual que as coordenadas sejam descritas em coordenadas planas (MONICO, 2008). De posse dos resultados de posição e velocidade obtidos por GNSS, pode-se então efetuar a verificação do comportamento das estruturas geotécnicas de interesse.

6.2 VANTAGENS

Foi observado ao longo deste trabalho que o posicionamento GNSS pode ser utilizado em diferentes aplicações do monitoramento geotécnico. Neste sentido, busca-se destacar quais as vantagens desta técnica.

Uma das principais vantagens do posicionamento GNSS diz respeito a sua versatilidade, podendo ser utilizado para as mais diferentes aplicações. O GNSS pode ser utilizado para agricultura de precisão, atividades de monitoramento, navegação, entre outros (SEEBER, 2003).

Na área de engenharia, tem-se uma vasta gama de aplicações, podendo-se citar o monitoramento de longo prazo de estruturas críticas, como plataformas de petróleo offshore, arranha-céus, pontes rodoviárias, barragens e diques (KEARNS *et al.*, 2019). Algumas dessas aplicações podem ser observadas na Tabela 11 apresentada no Capítulo 5.

Com a modernização dos sistemas GPS e GLONASS, e com a finalização dos novos sistemas Galileo e BeiDou, cerca de 120 satélites GNSS estarão disponíveis para usuários em todo o mundo (LI; KAČMAŘÍK; POSPÍŠIL, 2022). Este incremento de novos sistemas e novos satélites permite a realização do posicionamento multi-GNSS, ou seja, medições realizadas com os métodos de posicionamento utilizando informações de diferentes constelações de satélites simultaneamente.

Constata-se que um maior número de satélites conduz a uma maior robustez das soluções GNSS e, em algumas condições, também a uma maior precisão de posicionamento. Isto, porque a disponibilidade de satélites e sua disposição no céu permitem melhores geometrias, favorecendo o aumento da precisão (ROBERTS; TANG; BROWN, 2015). Em especial, o multi-GNSS é recomendado para áreas urbanas que apresentam muitas obstruções do sinal (SETTI JÚNIOR *et al.*, 2020).

As diferentes técnicas de posicionamento promovem alta precisão. De acordo com Kearns *et al.* (2019), utilizando métodos pós-processados, com linhas de base curtas (até 50m), pode-se atingir precisão submilimétrica para posições diárias nas três direções. O trabalho de Wang *et al.* (2022a) corrobora com a definição de incertezas submilimétricas para velocidades horizontais e verticais com observações contínuas de cinco anos ou mais.

Diferentes trabalhos versam sobre a precisão do posicionamento GNSS, ressaltando como uma vantagem a possibilidade de atingir nível de incerteza adequados para determinadas aplicações. Contudo, não é unânime os valores de acurácia, sendo necessário a verificação do tipo de técnica, constelações e satélites disponíveis, possíveis obstruções do sinal, entre outros fatores que afetam a precisão da tecnologia.

A disponibilidade de redes regionais, globais ou densificadas de estações geodésicas GNSS, adquirindo dados continuamente, facilita a realização das medições. Scaioni *et al.* (2018) afirmam que a crescente difusão de estações permanentes de monitoramento contínuo, como a RBMC, também pode ser explorada para aplicações de monitoramento de deslocamento superficial e para estabelecer a referência externa.

Sendo assim, a presença dessas redes favorece a aplicação de posicionamento relativo, sendo necessária a utilização de apenas um receptor móvel. Além disso, para redes com longo tempo de observação, é possível estabelecer estruturas de referência regionais rigorosas para estudar deslocamentos de solo localizados (colapso, subsidência e deslizamentos de terra) e deformação estrutural (KEARNS *et al.*, 2019).

A disponibilidade de estações de monitoramento permanentes associado a altas taxas de amostragem, favorecem a utilização da tecnologia GNSS como uma ferramenta para monitoramento de deslocamentos lentos por longos períodos em estruturas como barragens, pontes, túneis, entre outros (VAZQUEZ-ONTIVEROS *et al.*, 2022).

As observações GNSS de longo prazo também fornecem dados de calibração e validação do deslocamento superficial do solo para outras técnicas de sensoriamento remoto e modelagem dos fenômenos geotécnicos que atingem um determinado local de estudo (WANG *et al.*, 2022a).

Através dos estudos de caso apresentados foi possível observar que o GNSS é uma tecnologia que pode ser utilizada em conjunto com outras técnicas de monitoramento. É comum a aplicação do GNSS associado ao monitoramento geodésico tradicional, como estação total e nivelamento.

De modo promissor, observa-se a utilização das medições GNSS correlacionada a novos métodos de monitoramento como InSAR, VANT, LiDAR, entre outros. A utilização combinada permite superar as limitações individuais de cada técnica. Para os casos de associação com a InSAR, tem-se que o GNSS pode promover a validação dos dados em grandes áreas, bem como a sua integração é capaz de facilitar o entendimento acerca dos mecanismos e comportamento de determinado fenômeno (CARLÀ *et al.*, 2019; DEL SOLDATO *et al.*, 2021).

No trabalho desenvolvido por Fabris *et al.* (2022), fica claro que essas técnicas são complementares, de modo que o GNSS favoreceu a obtenção de dados em área vegetadas não cobertas pelos dados da InSAR. Diferentes artigos retratam esta combinação, como pode ser observado através da Tabela 18.

De acordo com Gili, Corominas e Rius (2000), o posicionamento GPS possui a vantagem de poder ser utilizado independentemente das condições climáticas, sendo viável para uso com chuva, neblina, sol forte ou à noite.

Este fator é corroborado por Vazquez-Ontiveros *et al.* (2022), os quais afirmam que a tecnologia GNSS se mostra de forma competitiva, quando comparado com métodos tradicionais de levantamento, como nivelamento e trilateração, em especial pela possibilidade de fornecer informações de medição independentemente das condições climáticas.

Ainda comparando o GNSS com métodos tradicionais de levantamento que podem fornecer a mesma precisão, pode-se afirmar que o uso do GNSS tem uma série de vantagens que o torna um método eficiente em termos de tempo e custo-benefício. Santos *et al.* (2007) e Scaioni *et al.* (2018) afirmam que o GPS se mostra vantajoso em razão da não necessidade de haver visibilidade entre os pontos que compõem a rede de medição e a estação de referência, o que favorece a observação de áreas maiores sem restrição de localização.

Esta vantagem é especialmente útil para o monitoramento de barragens, taludes, edifícios, em que as estações precisam estar distantes e sem visibilidade entre os pontos (GILI; COROMINAS; RIUS, 2000). As antenas, no entanto, devem ter boa visibilidade do céu, para receber os sinais do satélite sem interferência.

Uma vantagem particularmente especial do GNSS diz respeito a possibilidade de fornecer informações do deslocamento superficial para as três direções (Norte–Sul, Leste–Oeste e Vertical) em função das suas coordenadas (DEL SOLDATO *et al.*, 2021). Estas coordenadas podem estar associadas a um quadro de referência local, por exemplo o eixo de uma barragem, ou a um quadro de referência global, como o ITRF2014 (SCAIONI *et al.*, 2018).

Como exibido em estudos de caso, o GNSS pode fornecer informações com elevada precisão em altas taxas de amostragem. Esta potencialidade permite a sua utilização em sistemas de controle e alerta, conforme demonstrado por Wu *et al.* (2021), bem como pode ser aplicado de forma complementar aos equipamentos de medição sísmica (ILIEVA *et al.*, 2020).

Diante do exposto, tem–se que a tecnologia GNSS se apresenta como uma ferramenta de monitoramento com uma série de benefícios e potencialidades, que favorecem a sua utilização em diferentes cenários. A evolução da técnica ao longo do tempo tornou–a compatível com outros métodos de monitoramento, atingindo elevada precisão e disponível em todo o mundo.

6.3 LIMITAÇÕES

O posicionamento GNSS tem sido largamente utilizado ao longo dos anos, contudo, para que os levantamentos atinjam a precisão requerida se faz necessário algumas verificações do sinal.

A utilização do GNSS tem como limitação inicial a necessidade de visualização de, no mínimo, quatro satélites para determinar a posição, para a maioria dos métodos de posicionamento, com exceção do posicionamento relativo cinemático, que são necessários pelo menos cinco satélites (MONICO, 2008).

Esta necessidade é principalmente prejudicada em áreas vegetadas, urbanas ou região montanhosa, nas quais se encontram obstruções físicas do sinal, tais como a topografia local, construções, vegetação, postes, linhas de transmissão, entre outros. A visibilidade dos satélites é, portanto, um fator crucial para o desempenho do sistema GNSS, sendo necessária a verificação da geometria dos satélites em função do DOP (SANTOS *et al.*, 2007). Além da redução da visibilidade dos satélites, os obstáculos potencializam os efeitos de multicaminho e, esses efeitos somados têm por consequência a redução da precisão do posicionamento (JIANG *et al.*, 2022).

O sinal GNSS sofre interferências em sua passagem pela atmosfera, apresentando erros associados a troposfera e ionosfera, o que pode afetar a precisão do posicionamento. Então, de acordo com Alves; De Abreu e Souza (2013), para que se obtenha a acurácia requerida para um dado levantamento, devem ser realizadas modelagens para remoção dos efeitos da atmosfera. Para retirar os efeitos da troposfera pode-se citar os modelos empíricos e modelos de PNT (Previsão Numérica do Tempo), e sobre os efeitos da ionosfera incide a grade ionosférica, modelagem regional da ionosfera ou a modelagem tomográfica.

A precisão do posicionamento GNSS depende de vários fatores, incluindo o comprimento da linha de base, que é a distância entre dois pontos medidos. Quanto maior for a linha de base, maior será a incerteza na posição dos pontos medidos. Isto ocorre porque pequenas variações no tempo de chegada dos sinais GNSS em cada ponto serão ampliadas proporcionalmente ao comprimento da linha de base.

Para solucionar esse problema, é necessário aplicar métodos de posicionamento diferencial, como o RTK, que permitem obter alta precisão mesmo em linhas de base relativamente longas (ALVES; DE ABREU; SOUZA, 2013).

Em relação aos produtos do posicionamento GNSS, tem-se que a obtenção dos deslocamentos nas três direções (horizontais e vertical) é vista com uma das vantagens desta técnica. Contudo, diferentes estudos mostram que a precisão do monitoramento na direção vertical é inferior àqueles obtidos na direção horizontal (HU; CHEN; ZHANG, 2019; SEEBER, 2003).

Wang (2013) aplicou PPP somente de GPS em um monitoramento de deslizamento de terra em Porto Rico. Seu estudo indicou que uma precisão horizontal abaixo de 5 mm pode ser alcançada de forma estável com duração de dados de observação de 4 horas e precisão vertical abaixo de 10 mm com sessões de pelo menos 8 horas de duração.

O posicionamento GNSS se refere ao comportamento do deslocamento da superfície de maneira pontual. Do ponto de vista de entendimento total de fenômenos geotécnico, como a subsidência de grandes áreas, a utilização do equipamento se torna limitada, pois as informações são obtidas para um ponto específico, sem permitir a verificação do comportamento em profundidade.

Apesar das limitações identificadas para o posicionamento GNSS, este se mostra como uma ferramenta adequada para o monitoramento em estruturas e obras geotécnicas, como pode ser visto anteriormente. Além disso, tem-se que estudos são

realizados para mitigar ou erradicar estas limitações, favorecendo ainda mais a utilização do posicionamento GNSS.

6.4 TENDÊNCIAS

O posicionamento GNSS está em processo de expansão e modernização contínua. Assim, alguns avanços têm sido alcançados com o desenvolvimento de atualizações que favorecem a sua utilização em áreas ainda inexploradas, ou melhorem as condições de aplicação do posicionamento.

Inicialmente tem-se o entendimento de que novos satélites estão sendo lançados para modernização dos sistemas. Burity (2016) retrata que o bloco a ser lançado GPSIII, do sistema GPS, é a geração mais recente planejada, com o intuito de melhorar os serviços de localização, navegação e tempo, além de aumentar a segurança, precisão e confiabilidade do sistema. Neste bloco está previsto a inclusão do código L1C, um sinal civil dedicado, na onda portadora L1, que foi projetado para ser semelhante ao código aberto do Sistema Galileo, facilitando a integração com outros sistemas que compõem o GNSS (IBGE, 2008).

O GLONASS tem planos de modernização semelhantes. Satélites GLONASS-B transmitirão novos sinais CDMA nas três bandas de frequência GLONASS, com previsão de lançamento para 2023, com seis satélites até 2025 (SETTI JÚNIOR *et al.*, 2020). A robustez do Galileo é prevista ser superior à do GPS, e está sendo considerada como uma evolução para o sistema, incluindo um aspecto regional de satélites IGSO na Europa. Já o BDS é o único sistema GNSS que possui atualmente uma componente regional, e planeja expandir em breve com a adição de satélites LEO, chamados Centispace-1 (HEIN, 2020).

Ao fim dos lançamentos previstos para os sistemas, haverá disponível mais de 120 satélites operacionais transmitindo sinais em diferentes frequências. Isso terá um impacto significativo no posicionamento atual, que atualmente depende principalmente dos dados de dupla frequência do GPS.

Setti Júnior *et al.* (2020) afirmam que a totalidade dos satélites irá promover melhorias nos métodos de posicionamento, incluindo maior precisão nas estimativas de posição, tempo de coleta de dados mais curto, modelagem mais robusta dos erros que afetam as observações GNSS e o surgimento de novas aplicações para os sinais, como sensoriamento remoto geodésico e aplicações em tempo real.

Em razão da grande disponibilidade de satélites, é esperado que haja integração entre as diferentes constelações. Sendo assim, estão sendo criados modelos e técnicas para processar soluções Multi-GNSS, assim como aperfeiçoamentos na qualidade de produtos precisos com informações sobre órbitas de satélite e relógios dos sistemas, modelagem atmosférica e uso de receptores e antenas de baixo custo (LI; KAČMAŘÍK; POSPÍŠIL, 2022; SETTI JÚNIOR *et al.*, 2020).

De acordo com Kaplan e Hegarty (2017), os modelos de receptores existentes geralmente acessam duas ou mais constelações, sendo predominante a combinação de GPS e GLONASS. É esperado o crescimento na quantidade de receptores que operam com as constelações GLONASS e BeiDou, além daqueles que utilizam simultaneamente os sistemas disponíveis (BeiDou, Galileo, GLONASS, GPS).

No tocante aos receptores, tem-se que uma tendência do posicionamento GNSS versa sobre a possibilidade de utilização de receptores de baixo custo, como Šegina *et al.* (2020), para atingir bons resultados de monitoramento. Além disso, segundo Krueger *et al.* (2020) há possibilidade de aplicação de receptores de baixo custo disponíveis em smartphones para o posicionamento RTK, visto que, estes conseguiram resolução de ambiguidade instantânea.

Contudo, deve-se observar que este tipo de antena promove observações até 90% mais ruidosas que as obtidas por receptores geodésicos, devido à sensibilidade ao multicaminho e a outros fatores, como a polarização da antena, sendo necessário o desenvolvimento de métodos capazes de mitigar tais efeitos (SETTI JÚNIOR *et al.*, 2020).

A tecnologia 5G poderá proporcionar melhorias no posicionamento através da facilidade de transmissão de informações. De acordo com Krueger *et al.* (2020), a integração do 5G com o GNSS tem como principais objetivos a Internet das Coisas (IoT) e a banda larga móvel ultrarrápida. Essa combinação pode melhorar a transmissão de correções diferenciais e, conseqüentemente, o posicionamento em tempo real. No entanto, para que ocorra a melhoria do posicionamento preciso, especialmente em ambientes urbanos, será fundamental garantir a compatibilidade e interoperabilidade entre o 5G e o GNSS (HEIN, 2020).

Há também possibilidade de avanços nos métodos de posicionamento, um exemplo a consolidação do método PPP-RTK, sendo uma técnica que combina as vantagens dos dois métodos, e é considerada como concorrente ou complementar a aplicação do RTK em rede (KRUEGER *et al.*, 2020). Contudo, há ainda vários detalhes

do método que devem ser verificados, como a modelagem dos efeitos atmosféricos ou ainda à validação das ambiguidades e eliminação de *outliers*, para que haja a sua consolidação (OLIVEIRA JR, 2017).

Outra forma de utilização do GNSS que tem se mostrado promissora é a GNSS–R (GNSS *Reflectometry*), que consiste em uma técnica de posicionamento baseada na reflexão de sinais GNSS para medir parâmetros geofísicos, como a altura da superfície do mar, a espessura da camada de gelo marinho, a umidade do solo etc. (HOFMANN–WELLENHOF; LICHTENEGGER; WASLE, 2008). Em vez de receber sinais diretos do satélite, o GNSS–R usa a reflexão dos sinais GNSS nas superfícies da Terra para coletar informações sobre o ambiente.

Este tipo de aplicação pode ser mais bem explorado na geotecnia, como por exemplo, para o monitoramento de encostas, detectando a umidade do solo (ZHOU *et al.*, 2022), em barragens para verificação do nível do reservatório (VAZQUEZ–ONTIVEROS *et al.*, 2022), de modo a agregar em um único instrumento duas verificações que apresentam relação direta.

Desde o seu início na década de 1970, o sistema GNSS experimentou grandes avanços. O que começou como sistemas militares GPS e GLONASS, evoluiu para quatro sistemas globais quase completos, com a possibilidade de outros serem desenvolvidos e lançados. Além disso, existem vários sistemas regionais em desenvolvimento. O progresso no GNSS permitiu que ele fosse utilizado para muito mais do que posicionamento, incluindo modelagem da atmosfera por meio do GNSS–R. Embora já tenha avançado bastante, ainda há muito a ser pesquisado e desenvolvido para aprimorar a tecnologia e criar novas aplicações para o GNSS nos próximos anos e décadas.

6.5 SÍNTESE

O capítulo apresentou informações que dizem respeito a aplicação do GNSS, ressaltando alguns cuidados que devem ser observados para obter bons resultados. Além disso, foram destacadas ponderações acerca das vantagens e das limitações do posicionamento GNSS, bem como de prováveis tendências da técnica.

O posicionamento GNSS pode ser dividido em duas etapas principais: obtenção das informações e processamento. No que se refere a obtenção dos dados, tem–se que algumas considerações devem ser apreciadas em alguns itens, a citar:

- a) definição do objetivo do levantamento;
- b) definição do tipo de levantamento (contínuo ou por campanha);
- c) definição do comprimento das sessões de obtenção de dados;
- d) locação das estações em pontos estratégicos da área de interesse;
- e) definição dos parâmetros das estações (DOP e máscara de elevação);
- f) definição do método de posicionamento (PPP, RTK, DGNSS etc.);
- g) definição da taxa de amostragem.

A partir dessas definições pode-se promover a obtenção dos dados, seguindo para a etapa de processamento dos dados. Ressalta-se que esta etapa pode ocorrer in loco, no monitoramento em tempo real, ou em escritório para métodos de posicionamento pós-processados.

O processamento dos dados segue considerações e ponderações durante o seu desenvolvimento até a obtenção das posições, a citar:

- a) escolha do tipo de software (comercial ou científico);
- b) transformação dos dados do receptor para RINEX ou HATANAKA;
- c) verificação da altura da antena;
- d) verificação dos pontos de interesse e linhas de base;
- e) modelagem dos erros associados;
- f) definição da posição;
- g) testes estatísticos de controle de qualidade.

Sendo assim, tem-se a apresentação dos cuidados a serem observados durante as etapas do posicionamento GNSS. Ressalta-se que não se buscou esgotar todos os aspectos relacionados a aplicação da tecnologia, haja vista as diversas possibilidades de aplicação, e constantes atualizações dos métodos.

No capítulo também foram apresentadas considerações sobre as vantagens, as limitações e as tendências do posicionamento GNSS. Com o intuito de reunir essas informações foi construída a Tabela 19, que retrata os principais pontos discutidos.

Tabela 19 – Vantagens, limitações e tendências do posicionamento GNSS

Vantagens	Limitações	Tendências
Precisão: O GNSS fornece uma alta precisão de posicionamento, permitindo a localização precisa de objetos, veículos, pessoas e outros recursos.	Disponibilidade limitada de satélites: a precisão do posicionamento GNSS é diretamente relacionada à quantidade de satélites visíveis. Em áreas urbanas densamente povoadas, pode haver obstruções que reduzam o número de satélites visíveis.	Lançamento e modernização dos sistemas GNSS, com novos satélites e prováveis correções a serem aplicadas.
Flexibilidade: O GNSS pode ser usado em uma ampla variedade de aplicações, incluindo navegação, agricultura, topografia, geologia, construção e muito mais.	Obstruções físicas: obstáculos como prédios, árvores ou montanhas podem bloquear ou atenuar os sinais dos satélites GNSS	Integração de diferentes sistemas GNSS, como GPS, GLONASS, BeiDou e Galileo, para melhorar a precisão e a disponibilidade global.
Integração com outros sistemas: O GNSS pode ser integrado com outros sistemas, como sensores, câmeras e sistemas de informação geográfica, para fornecer informações adicionais.	Sensibilidade a erros atmosféricos: O GNSS pode ser afetado por erros atmosféricos, como o delay na propagação do sinal através da atmosfera, o que pode afetar a precisão do posicionamento.	Desenvolvimento de soluções GNSS mais econômicas e de baixo custo para aplicações em massa.
Monitoramento contínuo e de longo prazo: as estações e os métodos de posicionamento foram atualizados sendo possível verificar os deslocamentos superficiais de forma contínua e automatizada, permitindo a compreensão do longo prazo para algumas localidades.	Comprimento de linha de base: o posicionamento pode ser afetado pelo comprimento excessivo de linha de base em relação ao método utilizado.	Advento de conexões mais rápidas que permitem a transmissão das informações favorecendo posicionamento em tempo real.
Alta taxa de aquisição: a tecnologia GNSS permite aquisição dos dados em elevadas taxas, o que favorece a aplicação em sistemas de controle de alerta ou de forma complementar para medições sísmicas.	Menor precisão na direção vertical: as medidas realizadas para a direção vertical apresentam precisão inferior as medições horizontais.	Uso de tecnologias de correção de precisão, como RTK e PPP, para aumentar a precisão de posicionamento em tempo real.
Coordenadas tridimensionais: o GNSS consegue determinar o deslocamento superficial para as três direções.	Informações pontuais e de superfície: a estação GNSS obtém informações sobre o comportamento da superfície de maneira pontual, o que dificulta o entendimento de fenômenos em grandes áreas e em profundidade.	Crescimento da utilização de GNSS–R para aplicações de monitoramento de medidas geofísicas, como a umidade do solo, presença de vapor de água, entre outros.

Fonte: Autora (2023).

7 CONCLUSÕES

Por meio do levantamento bibliográfico realizado foi possível definir os principais conceitos envolvidos no posicionamento GNSS, de modo a facilitar o entendimento acerca dos princípios de funcionamento, sistemas de coordenadas, erros associados e os métodos de posicionamento que podem ser empregados, ressaltando a sua aplicabilidade, vantagens e limitações, e as possíveis tendências.

As análises dos artigos da literatura permitiram estabelecer conceitos sobre a produção científica na temática nos últimos anos, podendo-se verificar os autores, instituições e países com maior influência. Foi ainda possível constatar as formas de aplicação do GNSS no monitoramento geotécnico, destacando o método de posicionamento relativo, através de instrumento individual ou em rede.

Além disso, foi apontado que os dados GNSS podem ser utilizados de maneira integrada a outros instrumentos, o que favorece o entendimento das movimentações, em especial se estas acometem grandes áreas ou estão relacionadas a agentes deflagradores, como a chuva.

Contudo, para que a determinação da posição e da velocidade apresente a precisão esperada, é necessário que alguns cuidados sejam observados, nas etapas de obtenção dos dados e do processamento. Sendo assim, esta pesquisa buscou apresentar, de forma sistemática, os procedimentos que reduzem as interferências e mitigam os erros associados ao posicionamento.

O estudo destacou também as vantagens de se utilizar a técnica do GNSS no monitoramento geotécnico. Essas vantagens permitem a identificação da direção e evolução dos movimentos ao longo do tempo, contribuindo para um melhor entendimento dos mecanismos envolvidos, bem como possibilita a sua integração em um sistema de controle e alerta.

Apesar disso, há limitações relacionadas à técnica que precisam ser consideradas, a fim de se implementarem medidas corretivas. É esperado que as tendências futuras do posicionamento GNSS atuem na minimização ou eliminação dessas restrições, particularmente quanto à sensibilidade a obstáculos físicos.

Uma tendência de avanço importante para a geotécnica diz respeito ao uso do GNSS-R, de forma a combinar medições de deslocamento superficial e umidade do solo em um único equipamento. Esta aplicação pode ser especialmente importante para taludes, tendo em vista que os movimentos estão fortemente associados a

mudanças no estado de tensão do maciço devido a, por exemplo, infiltração de água da chuva.

Ressalta-se que o posicionamento GNSS é uma ferramenta abrangente, moderna, complexa e em evolução, sendo assim há novos métodos de posicionamento, técnicas de processamento, modelos de correção sendo desenvolvidos. Deste modo, o trabalho não conseguiu esgotar as informações conceituais da técnica, nem aplicações da ferramenta para o monitoramento geotécnico.

Como continuidade do estudo sobre o uso do posicionamento GNSS no monitoramento geotécnico, pode-se recomendar:

- a) o acompanhamento das tendências no posicionamento GNSS, verificando o impacto que os novos satélites e sistemas irão fornecer a precisão das medidas;
- b) verificação da integração da tecnologia GNSS com outros instrumentos, como inclinômetros, extensômetros, sismógrafos, a fim de melhorar a precisão e a eficiência do monitoramento geotécnico;
- c) formação de banco de dados de deslocamento, em função dos casos da literatura, com o intuito de estabelecer limiares para sistema de controle e alerta.

REFERÊNCIAS

- ACOSTA, L. E. *et al.* Displacements Study of an Earth Fill Dam Based on High Precision Geodetic Monitoring and Numerical Modeling. **Sensors**, 2018, Vol. 18, Page 1369, v. 18, n. 5, p. 1369, 27 abr. 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/s18051369>. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/18/5/1369>>. Acesso em: 28 dez. 2022.
- ALVES, D. B. M.; DE ABREU, P. A. G.; SOUZA, J. S. GNSS: status, modelagem atmosférica e métodos de posicionamento. **Rev. Bras. Geom.**, v. 1, n. 7, p. 2–7, 2013. DOI: 10.3895/rbgeo.v1n1.5431. Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.br/rbgeo/article/view/5431>>. Acesso em: 07 out. 2022.
- AMARAL, J. J. F. **Como fazer uma pesquisa bibliográfica**. Fortaleza, CE: Universidade Federal do Ceará, 2007. Disponível em: <http://200.17.137.109:8081/xiscanoe/courses-1/mentoring/tutoring/Como%20fazer%20pesquisa%20bibliografica.pdf>. Acesso em: 13. Set. 2022.
- ANTUNES, C. **Levantamentos topográficos**: Apontamentos de topografia. Faculdade de Ciência da Universidade de Lisboa. Departamento de Matemática: Engenharia Geográfica. 130p. 1995. Disponível em: <https://www.ufpe.br/documents/801160/801815/levantamentos-topograficos-apontamentos.pdf/5f233b21-6924-41a4-a17c-0622c6b8d653>. Acesso em: 15 jan. 2023.
- ARAÚJO, L. R. da S. **Acurácia de levantamento topográfico realizado com receptores de navegação**. 2019. 24 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano, Petrolina, 2019. Disponível em: <https://releia.ifsertao-pe.edu.br/jspui/bitstream/123456789/577/1/LUCAS%20RAIMUNDO%20DA%20SILVA%20ARA%20C3%9AJAJO.pdf>. Acesso em: 28 nov. 2022.
- BERTIGER, et al. GipsyX/RTGx, a new tool set for space geodetic operations and research. **Advances in Space Research**, v. 66, n. 3, p. 469-489, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.04.015>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117720302532?via%3Dihub>. Acesso em: 24 fev 2023.
- BOCCATO, V. R. C. Metodologia da pesquisa bibliográfica na área odontológica e o artigo científico como forma de comunicação. **Rev. Odontol.** Univ. Cidade São Paulo, São Paulo, v. 18, n. 3, p. 265–274, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-65132013005000078>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/prod/a/9BprB4MFDXfpSJqkL4HdJCQ/>. Acesso em: 25 out. 2022.
- BRAASCH, M. S. **Multipath effects**. In: PARKINSON, B. W.; SPILKER, J. J. JR., AXELRAD, P.; ENGE, P. (Eds.). *Global Positioning System: Theory and Applications*.

American Institute of Aeronautics and Astronautics: Reston, VA, USA, Volume 1, Chapter 14. 1996.

BURITY, E. F. **Determinação da Vulnerabilidade Física em Áreas de Risco de Deslizamento a partir do Posicionamento GNSS, com Técnica RTK–NTRIP.** 2022. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2022. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/22487>. Acesso em: 13 jul. 2022.

CABINET OFFICE, N. S. P. S. J. **Quasi–Zenith Satellite Orbit (QZO), Technical Information.** Disponível em: <https://qzss.go.jp/en/technical/technology/orbit.html>. Acesso em: 11 set. 2022.

CABRAL, J. J. DA S. P.; SANTOS, S. M.; PONTES FILHO, I. D. S. Bombeamento Intensivo de Água Subterrânea e Riscos de Subsidência do Solo. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 11, p. 147–157, 2006. Disponível em: https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/23/b6a853f3fd33a2638ed2c7aafb118091_8ff3a6332c8c0acdfff038e003e46648.pdf. Acesso em: 14 dez. 2022.

CALDEIRA, M. C. O. **Análise do Impacto do Efeito Ionosférico e Cintilação Ionosférica no Posicionamento em Redes e Por Ponto.** 2016. 122 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Programa de Pós–Graduação em Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2016. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/144291/caldeira_mco_me_prud.pdf?sequence=3&isAllowed=y. Acesso em: 13. jul. 2022.

CARDOSO, F. H. C.; GIORGINI, M. G.; PAULA, A. Q. **Diretrizes para o monitoramento de deformações e deslocamentos em barragens e estruturas de mineração utilizando GNSS.** XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. **Anais...**2020. Disponível em: <https://doi.org/10.4322/cobramseg.2022.0178>. Acesso em: 11 dez. 2022.

CARLÀ, T. *et al.* Combination of GNSS, satellite InSAR, and GBInSAR remote sensing monitoring to improve the understanding of a large landslide in high alpine environment. **Geomorphology**, v. 335, p. 62–75, 15 jun. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X19301084>. Acesso em: 26 out. 2022.

CHUEKE, G. V.; AMATUCCI, M. Métodos de sistematização de literatura em estudos científicos: bibliometria, meta–análise e revisão sistemática. **Internext**, v. 17, n. 2, p. 284–292. mai/agos. 2022. DOI: <https://doi.org/10.18568/internext.v17i2.704>. Disponível em: <https://internext.espm.br/internext/article/viw/704>. Acesso em: 15. set. 2022.

COSTA, S. *et al.* **RBMC EM TEMPO REAL, VIA NTRIP, E SEUS BENEFÍCIOS NOS LEVANTAMENTOS RTK E DGPS.** II Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. **Anais...**Recife: 2008. Disponível em:

<https://silo.tips/download/rbmc-em-tempo-real-via-ntrip-e-seus-beneficios-nos-levantamentos-rtk-e-dgps>. Acesso em: 11 set. 2022.

CSNO, C. S. N. O. **BeiDou Navigation Satellite System Open Service Performance Standard**. 2021. Disponível em:

<http://www.beidou.gov.cn/xt/gfxz/201812/P020181227529449178798.pdf>. Acesso em: 18 set. 2022.

CSNO, C. S. N. O. **BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document Open Service Signal B1I (Version 3.0)**. [s.l: s.n.]. . Acesso em: 11 fev. 2023. Disponível em:

<http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/ICD/201902/P020190227702348791891.pdf>. Acesso: 27 nov. 2022.

DABOVE, P.; MANZINO, A. M.; TAGLIORETTI, C. GNSS network products for post-processing positioning: limitations and peculiarities. **Applied Geomatics**, v. 6, n. 1, p. 27–36. 2014. DOI: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12518-014-0122-3>.

Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12518-014-0122-3>. Acesso em: 16 nov. 2022.

DACH, R. *et al.* (Ed.) **Bernese GNSS Software Version 5.2**. Switzerland:

Astronomical Institute, University of Bern, 2015. Disponível em: <https://boris.unibe.ch/72297/>. Acesso em: 24 fev. 2023.

DE LACY, M. C. *et al.* Monitoring of vertical deformations by means high-precision geodetic levelling. Test case: The Arenoso dam (South of Spain). **Journal of Applied Geodesy**, v. 11, n. 1, p. 31–41, 1 mar. 2017. Disponível em: Monitoring of vertical deformations by means high-precision geodetic levelling. Test case: The Arenoso dam (South of Spain). Acesso em: 27 nov. 2022.

DEL SOLDATO, M. *et al.* Review of Works Combining GNSS and InSAR in Europe. **Remote Sensing 2021**, Vol. 13, Page 1684, v. 13, n. 9, p. 1684, 27 abr. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13091684>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/13/9/1684>. Acesso em: 15 set. 2022.

DIAS, L. M. **Avaliação de diferentes metodologias em levantamentos planialtimétricos**. 65f. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciência e Tecnologia) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Caraúbas, 2019. Disponível em:

https://repositorio.ufersa.edu.br/bitstream/prefix/2931/2/LARISSAMD_MONO.pdf. Acesso em: 03 nov. 2022.

DILSSNER, F.; SEEBER, G.; WÜBBENA, G.; SCHMITZ, M. **Impact of near-field effects on the GNSS position solution**. In: Proceedings of the 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2008), Savannah, GA, USA, 16–19 September 2008; p. 612–624. Disponível em: <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=7981>. Acesso em: 3 set. 2022.

ELÓSEGUI, P.; DAVIS, J. L.; JALDEHAG, R. T. K.; JOHANSSON, J. M.; NIELL, A. E.; SHAPIRO I. I. Geodesy Using the Global Positioning System: The Effects of Signal Scattering on Estimates of Site Position. **J. Geophys. Res.**, v. 100, p. 9921–9934. DOI: <https://doi.org/10.1029/95JB00868>. 1995. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/95JB00868>. Acesso em: 7 jul. 2022.

ERDOĞAN, H. *et al.* Investigating the effects of groundwater level changes on GNSS observations in the Konya Closed Basin. **Earth Sciences Research Journal**, v. 25, n. 4, p. 405–414, 7 fev. 2022.

EUSPA, E. A. FOR THE S. P. **Galileo is the European global satellite-based navigation system**. Disponível em: <<https://www.euspa.europa.eu/european-space/galileo/What-Galileo>>. Acesso em: 11 fev. 2023.

FABRIS, M. *et al.* An Integrated InSAR and GNSS Approach to Monitor Land Subsidence in the Po River Delta (Italy). **Remote Sensing 2022, Vol. 14, Page 5578**, v. 14, n. 21, p. 5578, 4 nov. 2022. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2072-4292/14/21/5578>>. Acesso em: 18 ago. 2022.

FAN, X. *et al.* Successful early warning and emergency response of a disastrous rockslide in Guizhou province, China. **Landslides**, v. 16, n. 12, p. 2445–2457, 1 dez. 2019.

FLORIS, M. *et al.* Surface Subsidence Monitoring Induced by Underground Coal Mining by Combining DInSAR and UAV Photogrammetry. **Remote Sensing 2022, Vol. 14, Page 4711**, v. 14, n. 19, p. 4711, 21 set. 2022.

FRANÇA, R. M. **Topografia do Futuro: Técnicas Processos e Desafios**, 2016.

FURST, S. L. *et al.* Monitoring surface deformation of deep salt mining in Vauvert (France), combining InSAR and leveling data for multi-source inversion. **Solid Earth**, v. 12, n. 1, p. 15–34, 12 jan. 2021.

GALVÃO, T. F.; PANSANI, T. de S. A.; HARRAD, D. Principais itens para relatar Revisões sistemáticas e Meta-análises: A recomendação PRISMA. **Epidemiologia e Serviços de Saúde**, v. 24, n. 2, p. 335–342. jun. 2015. DOI: <https://doi.org/10.5123/S1679-49742015000200017>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ress/a/TL99XM6YPx3Z4rxn5WmCNCF/?lang=pt>. Acesso em: 18 dez.2022.

GAMIT. Disponível em: <<http://www-gpsg.mit.edu/~simon/gtgk/>>. Acesso em: 25 fev. 2023.

GARMIN. **GPS Portátil Garla eTrex10**. s.d. Disponível em: <https://www.garminstore.com.br/gps-portatil-garmin-etrex10-gps-glonass-caminhadas-geocaching/p?skuld=60>. Acesso em 10. jan. 2023.

GEMAEL, C.; ANDRADE, J. B. de. **Geodésia celeste**. Curitiba: Editora UFPR, 389p. 2003.

GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de Taludes**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo, SP: Atlas, 2002.

GILI, J. A.; COROMINAS, J.; RIUS, J. **Using Global Positioning System techniques in landslide monitoring Engineering Geology**. [s.l.: s.n.]. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(99\)00127-1](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(99)00127-1). Disponível em: www.elsevier.nl/locate/enggeo. Acesso em: 25 out. 2022.

GLUEER, F. *et al.* Robotic Total Station Monitoring in High Alpine Paraglacial Environments: Challenges and Solutions from the Great Aletsch Region (Valais, Switzerland). **Geosciences** **2021**, Vol. 11, Page 471, v. 11, n. 11, p. 471, nov. 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3263/11/11/471>. Acesso em: 13 dez. 2022.

GOUVEIA, T. A. F. **Modelagem neutrosférica sobre a América do Sul baseada em PNT e assimilação de dados locais e robusta avaliação utilizando observações GNSS**. 136f. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2013. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/86823/gouveia_taf_me_prud.pdf?sequence=1. Acesso em: 28 set. 2022.

GUO, F. YUN *et al.* Rapid onset hazards, fault-controlled landslides and multi-method emergency decision-making. **Journal of Mountain Science**, v. 19, n. 5, p. 1357–1369, 1 maio 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11629-021-6941-x>. Acesso em: 16 out. 2022.

HEIN, G. W. Status, perspectives and trends of satellite navigation. **Satellite Navigation**, v. 1, n. 1, p. 1–12, 1 dez. 2020. Disponível em: <https://satellite-navigation.springeropen.com/articles/10.1186/s43020-020-00023-x>. Acesso em: 03 nov. 2022.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J. **Global Position System: Theory and Practice**. New York: Springer-Verlag Wien. 389p. 1997.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; WASLE, E. **GNSS — Global Navigation Satellite Systems GPS, GLONASS, Galileo, and more**. 1. ed. [s.l.] Springer Vienna, 2008.

HU, B.; CHEN, J.; ZHANG, X. Monitoring the Land Subsidence Area in a Coastal Urban Area with InSAR and GNSS. **Sensors** **2019**, Vol. **19**, Page **3181**, v. 19, n. 14, p. 3181, 19 jul. 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/s19143181>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/14/3181>. Acesso em: 15 jan. 2023.

HUANG, X. *et al.* Study on deformation characteristics and mechanism of reactivated ancient landslides induced by engineering excavation and rainfall in Three Gorges

Reservoir area. **Natural Hazards**, v. 110, n. 3, p. 1621–1647, 1 fev. 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11069-021-05005-z>. Acesso em: 18 jan. 2023.

HUNEGNAW, A.; TEFERLE, F. N. Evaluation of the Multipath Environment Using Electromagnetic–Absorbing Materials at Continuous GNSS Stations. **Sensors**, v. 22, n. 9, p. 3384. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22093384>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/9/3384>. Acesso em: 25 out. 2022.

IBGE, Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Resolução nº. 1/2005 - Altera a caracterização do Sistema Geodésico Brasileiro**. Rio de Janeiro: IBGE. 2005. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 20 de julho de 2011.

IBGE, Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Normas e especificações para levantamentos GPS. In: IV CONFEGE. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: 2006. . Acesso em: 1 fev. 2023.

IBGE, Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Recomendações para levantamentos relativos estáticos–GPS**, abr. 2008. Disponível em: https://geoftp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/normas/rec_om_gps_internet.pdf . Acesso em: 26 set. 2022

ILIEVA, M. *et al.* Combined Study of a Significant Mine Collapse Based on Seismological and Geodetic Data—29 January 2019, Rudna Mine, Poland. **Remote Sensing**, 2020, Vol. 12, Page 1570, v. 12, n. 10, p. 1570, 15 maio 2020.

INCRA, I. N. D. C. E. R. A. **Manual Técnico para Georreferenciamento de Imóveis Rurais**. MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO AGRÁRIO, Brasília. 2022.

ISRO, I. S. R. O. **Indian Space Research Organisation**. Disponível em: <https://www.isro.gov.in/>. Acesso em: 11 fev. 2023.

JALDEHAG, R. T. K.; JOHANSSON, J. M.; RÖNG, B. O.; ELÓSEGUI, P.; DAVIS, J. L.; SHAPIRO, I. I.; NEILL, A. E. Geodesy using the Swedish Permanent GPS Network: Effects of signal scattering on estimates of relative site positions, **J. Geophys. Res.**, v. 101, p. 17841–17860. ago.1996. DOI: <https://doi.org/10.1029/96JB01183>. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/96JB01183>. Acesso em: 13 ago. 2022.

JIANG, W. *et al.* High precision deformation monitoring with integrated GNSS and ground range observations in harsh environment. **Measurement**, v. 204, p. 112179, 30 nov. 2022.

KAJZAR, V. Geodetic and seismological observations applied for investigation of subsidence formation in the CSM mine (Czech Republic). **Mining of Mineral Deposits**, v. 12, n. 2, p. 34–46, 2018.

KAPLAN, E. D.; HEGARTY, C. J. (Ed.) **Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications**. Boston: Artech House, 2 ed. 723p. 2017.

KEARNS, T. J. *et al.* Houston16: A stable geodetic reference frame for subsidence and faulting study in the Houston metropolitan area, Texas, U.S. **Geodesy and Geodynamics**, v. 10, n. 5, p. 382–393, 1 set. 2019.

KONAKOGLU, B.; CAKIR, L.; YILMAZ, V. Monitoring the deformation of a concrete dam: a case study on the Deriner Dam, Artvin, Turkey. v. 11, n. 1, p. 160–177, 2020. Disponível em: <http://www-tandfonline.ez16.periodicos.capes.gov.br/action/journalInformation?show=aimsScope&journalCode=tgnh20#.VsXodSCLRhE>, Acesso em: 25 dez. 2022.

KRUEGER, C. P. 1964–. Investigações sobre aplicações de alta precisão do GPS no âmbito marinho. 1996.

KRUEGER, C. P. *et al.* Real-time GNSS positioning: Evolution, practical applications and perspectives for the future. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 72, p. 1359–1379, 1 dez. 2020.

KRÜGER, G.; SPRINGER, R.; LECHNER, W. **Computers and electronics in agriculture Global Navigation Satellite Systems (GNSS)Computers and Electronics in Agriculture**. [s.l: s.n.].

KYRIOU, A.; NIKOLAKOPOULOS, K. G.; KOUKOUVELAS, I. K. Timely and Low-Cost Remote Sensing Practices for the Assessment of Landslide Activity in the Service of Hazard Management. **Remote Sensing**, 2022, Vol. 14, Page 4745, v. 14, n. 19, p. 4745, 22 set. 2022.

LACERDA, R. T. O.; ENSSLIN, L.; ENSSLIN, S. R. Uma análise bibliométrica da literatura sobre estratégia e avaliação de desempenho. **Gestão & Produção**, v. 19, n. 1, p. 59–78. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-530X2012000100005>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/gp/a/sKh5wfCCGv68fdRP8GStLXC/?lang=pt>. Acesso em: 25 jun. 2022.

LARSON, K. M.; BILICH, A.; AXELRAD, P. Improving the precision of high-rate GPS. **J. Geophys. Res.**, v. 112, B05422. mai. 2007. DOI: <https://doi.org/10.1029/2006JB004367>. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2006JB004367>. Acesso em: 13 ago. 2022.

LI, W. *et al.* The Crustal Vertical Deformation Driven by Terrestrial Water Load from 2010 to 2014 in Shaanxi–Gansu–Ningxia Region Based on GRACE and GNSS. **Water** 2022, Vol. 14, Page 964, v. 14, n. 6, p. 964, 18 mar. 2022.

LI, W.; KAČMARĚÍK, M.; POSPÍŠIL, P. MULTI-GNSS POSITIONING FOR LANDSLIDE MONITORING: A CASE STUDY AT THE RECICA LANDSLIDE. **Acta Geodynamica et Geomaterialia**, v. 19, n. 3, p. 255–270, 2022.

LIAN, X. *et al.* Determination of the Stability of High–Steep Slopes by Global Navigation Satellite System (GNSS) Real–Time Monitoring in Long Wall Mining. **Applied Sciences 2020, Vol. 10, Page 1952**, v. 10, n. 6, p. 1952, 12 mar. 2020.

LIU, W. *et al.* Signal–in–Space Range Error of the Global BeiDou Navigation Satellite System and Comparison with GPS, GLONASS, Galileo, and QZSS. **Journal of Surveying Engineering**, v. 149, n. 1, p. 04022013, 23 set. 2022.

LIU, Z. *et al.* Comparison on landslide nonlinear displacement analysis and prediction with computational intelligence approaches. **Landslides**, v. 11, n. 5, p. 889–896, 31 out. 2014.

MARCONI, M. D., LAKATOS, E. M. **Fundamentos de Metodologia Científica**. 7 ed. São Paulo: Atlas, 2010.

MEKIK, C.; ARSLANOGLU, M. Investigation on Accuracies of Real Time Kinematic GPS for GIS Applications. **Remote Sensing 2009, Vol. 1, Pages 22–35, v. 1, n. 1, p. 22–35, 30 mar. 2009.**

MOHER, D.; LIBERATI, A.; TETZLAFF, J.; ALTMAN, D. G. Preferred reporting items for systematic reviews and meta–analyses: The PRISMA statement. **International Journal of Surgery**, 8, p. 336–341. jul. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijsu.2010.02.007>. Disponível em: <https://www.bmj.com/content/339/bmj.b2535>. Acesso em: 02 jan. 2023.

MONGEON, P.; PAUL–HUS, A. The jornal coverage of Web of Science and Scopus: a comparative analysis. **Scientometrics**, 106, p. 213–228. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11192–015–1765–5>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11192–015–1765–5>. Acesso em: 25 ago. 2022.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações**. São Paulo: Editora Unesp, 2 ed. 477p. 2008.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo NAVSTAR–GPS: Descrição, Fundamentos e Aplicações**. São Paulo: Editora Unesp, 2000.

MONTENBRUCK, O. *et al.* **The Multi–GNSS Experiment (MGEX) of the International GNSS Service (IGS) – Achievements, prospects and challenges**. **Advances in Space Research**. Elsevier Ltda, 1 abr. 2017.

MUKESH, R. *et al.* Analysis of signal strength, satellite visibility, position accuracy and ionospheric TEC estimation of IRNSS. **Astrophysics and Space Science**, v. 364, n. 11, p. 1–34, 1 nov. 2019.

NAKAO, L. T. H.; KRUEGER, C. P. Análise Dos Métodos de Posicionamento e dos Parâmetros Definidores Da Qualidade De Um Levantamento Batimétrico. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 23, n. 3, p. 419–433, 1 jul. 2017.

PACHECO, R. L.; SILVA, L. D. G. M. da.; MELO, S. M. M. de; RIERA, R. Guidelines para publicação de estudos científicos. Parte 4: como publicar revisões sistemáticas. **Diagn. Tratamento**, v. 23, n. 1, p. 19–23. abri. 2018. Disponível em: <https://pesquisa.bvsalud.org/porta1/resource/pt/biblio-882165>. Acesso em: 23 set. 2022.

PAGE, M. J., MCKENZIE, J. E., BOSSUYT, P. M., BOUTRON, I., HOFFMANN, T. C., MULROW, C. D., ... MOHER, D. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. **BMJ**, n.71. 2021. DOI:10.1136/bmj.n71. Disponível em: <https://www.bmj.com/content/372/bmj.n71>. Acesso: 28 nov. 2022.

PALAMÀ, R. *et al.* A Multi-Temporal Small Baseline Interferometry Procedure Applied to Mining-Induced Deformation Monitoring. **Remote Sensing 2022, Vol. 14, Page 2182**, v. 14, n. 9, p. 2182, 2 maio 2022.

PAN, L. *et al.* Assessment of IRNSS-Only Data Processing: Availability, Single-Frequency SPP and Short-Baseline RTK. **Remote Sensing**, v. 14, n. 10, 1 maio 2022.

PARWATA, I. N. S. *et al.* Monitoring the Subsidence Induced by Salt Mining in Tuzla, Bosnia and Herzegovina by SBAS-DInSAR Method. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, v. 53, n. 11, p. 5155–5175, 1 nov. 2020.

PAULA, R. S. P.; SHIMODA, E.; BATISTA, F. B.; SANTOS JÚNIOR, P. J. Indicadores bibliométricos na base scopus: Uma análise das publicações sobre o tema “economia ambiental”. **Brazilian Journal of Development**, v. 3, p. 350–365. 2017. Disponível em: <https://www.brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/37>. Acesso em: 11 nov. 2022.

PERDIGÃO, T. D.; SANTOS, A. P. AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA A PARTIR DE DIFERENTES TEMPOS DE RASTREIO UTILIZANDO A SOLUÇÃO PPP ON-LINE DO IBGE. III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação . **Anais...Recife**: 2010. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/ppp/d>>. Acesso em: 11 fev. 2023

PETROPOULOS, G. P.; SRIVASTAVA, P. K. **GPS AND GNSS TECHNOLOGY IN GEOSCIENCES**. [s.l.] Elsevier, 2021.

PIPITONE, C. *et al.* Monitoring Water Surface and Level of a Reservoir Using Different Remote Sensing Approaches and Comparison with Dam Displacements Evaluated via GNSS. **Remote Sensing**, Vol. 10, Page 71, v. 10, n. 1, p. 71, 6 jan. 2018.

RAHAL, W. L.; BENABADJI, N.; BELBACHIR, A. H. Automatic tracking system for weather satellite image reception. **Turk J Elec Eng & Comp Sci**, v. 20, n. 4, p. 537–546. 2012. DOI: 10.3906/elk-1003-401. Disponível em: <https://journals.tubitak.gov.tr/elektrik/vol20/iss4/7/>. Acesso em: 14 set. 2022.

RECHBERGER, C.; FEY, C.; ZANGERL, C. Structural characterisation, internal deformation, and kinematics of an active deep-seated rock slide in a valley glacier retreat area. **Engineering Geology**, v. 286, p. 106048, 5 jun. 2021.

REGUZZONI, M. *et al.* GNSS-Based Dam Monitoring: The Application of a Statistical Approach for Time Series Analysis to a Case Study. **Applied Sciences 2022, Vol. 12, Page 9981**, v. 12, n. 19, p. 9981, 4 out. 2022.

RETHIKA, T. *et al.* Ionospheric Delay Estimation during Ionospheric Depletion Events for Single Frequency Users of IRNSS. **Innovative Systems Design and Engineering**, v. 6, n. 2, p. 98–107, 2015.

RICS, R. I. OF C. S. **Guidelines for the use of GNSS in land surveying and mapping**. [s.l.] RICS, 2010. v. 2

ROBERTS, G. W.; TANG, X.; BROWN, C. J. A review of satellite positioning systems for civil engineering. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Civil Engineering**, v. 168, n. 4, p. 185–192, 2015.

ROSCOSMO. **Sistema de navegação global por satélite GLONASS**. Disponível em: <<https://www.glonass-iac.ru/guide/glonass.php>>. Acesso em: 5 out. 2022.

RUSSELL, S. S.; SCHAIBLY, J. H. Control Segment and User Performance. **Navigation**, v. 25, n. 2, p. 166–172, 1978.

SANOU, D. A.; LANDRY, R. JR. Analysis of GNSS Interference Impact on Society and Evaluation of Spectrum Protection Strategies. **Positioning**, v. 04, n. 02, p. 169–182, 2013.

SANTOS, S. M. DOS *et al.* GPS effectiveness to geotechnical problems in urban areas. **Geotecnia**, n. 109, p. 131–142, 21 mar. 2007.

SANTRA, A. *et al.* Augmentation of GNSS utility by IRNSS/NavIC constellation over the Indian region. **Advances in Space Research**, v. 63, n. 9, p. 2995–3008, 1 maio 2019.

SAVŠEK, S. *et al.* Geodetski vestnik. **IZ ZNANOSTI IN STROKE**, 2010.

SCAIONI, M. *et al.* Geodetic and Remote-Sensing Sensors for Dam Deformation Monitoring. **Sensors 2018, Vol. 18, Page 3682**, v. 18, n. 11, p. 3682, 29 out. 2018.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy**. 2003.

ŠEGINA, E. *et al.* Monitoring Surface Displacement of a Deep-Seated Landslide by a Low-Cost and near Real-Time GNSS System. **Remote Sensing 2020, Vol. 12, Page 3375**, v. 12, n. 20, p. 3375, 15 out. 2020.

SETTI JÚNIOR, P. DE T. *et al.* Posicionamento Multi-GNSS. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. v. 72, p. 1200–1224, 2020.

SHARIFI, S. *et al.* Evaluation of filtering methods for use on high–frequency measurements of landslide displacements. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 22, n. 2, p. 411–430, 14 fev. 2022.

SILVA, G. P. D.; COUTINHO, R. Q.; ROSA, R. A. D. S. An Approach to Positional Quality Control Methods for Airborne InSAR High-Resolution X-Band Orthoimages And P-Band Digital Terrain Model. **Boletim de Ciências Geodésicas**, [s. l.], v. 27, 2021. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1590/s1982-21702021000100001>.

Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/bcg/a/MQSV87PqNyC8KtJDt8RQXkb/?lang=en>. Acesso em: 1 dez. 2022.

SILVA, H. dos R. **Notas de aula de geodésia espacial**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais – Campus Inconfidentes. 2017. Disponível em:

https://intranet.ifs.ifsuldeminas.edu.br/paulo.borges/Download/EAC066/Aula04_Sistemas_de_Referencia.pdf. Acesso em: 18 jan. 2023.

SILVA, P. V.; JORGE, T. A. Análise de conteúdo por meio de nuvem de palavras de postagens em comunidades virtuais: novas perspectivas e resultados preliminares. **CIAIQ2019**, v. 2, p. 41–48, 2019. Disponível em:

<https://proceedings.ciaiq.org/index.php/CIAIQ2019/article/view/2002>. Acesso em: 23 JAN. 2023.

SILVA, R. M. da; SILVA, J. dos S. V. da; FREITAS, A. R. de. Análise de Posicionamento Absoluto com GPS de Navegação no Pantanal Pós–Desligamento da Disponibilidade Seletiva (SA – Selective Availability). In: Simpósio sobre Recurso Naturais e Socioeconômico do Pantanal, 3. **Anais [...]**. Corumbá. p. 1–19. 2000.

Disponível em: <https://docplayer.com.br/17441267-Analise-de-posicionamento-absoluto-com-gps-de-navegacao-no-pantanal-pos-desligamento-da-disponibilidade-seletiva-sa-selective-availability.html>. Acesso em: 23 jan. 2023.

SIMÕES, P. M. L.; OLIVEIRA, C. V. Avaliação da susceptibilidade à erosão e aos movimentos de massa no município de Ibitiré. **Geonomos**, v. 22, n. 1, p. 22–30, 2014.

SOUZA, C. R. M. de. **Interferidores de GPS: análise do sistema e de potenciais fontes de interferência**. 90f. 2005. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica) – Instituto Militar de Engenharia, Programa de Pós–Graduação em Ciências em Engenharia Elétrica. 2005. Disponível em:

https://pgee.ime.eb.br/pdf/pdf/carlos_sousa.pdf. Acesso em: 25. jul. 2022.

STEWART, M.; TSAKIRI, M. The future of RTK GPS/GLONASS positioning in the urban canyon. **Australian Surveyor**, v. 42, n. 4, p. 172–178, 1997.

STUPAR, D. I.; ROŠER, J.; VULIĆ, M. Investigation of Unmanned Aerial Vehicles–Based Photogrammetry for Large Mine Subsidence Monitoring. **Minerals**, Vol. 10, Page 196, v. 10, n. 2, p. 196, 21 fev. 2020.

SUBIRANA, J. S.; ZORNOZA, J. M. J.; HERNÁNDEZ-PAJARES, M. **GNSS Data Processing: Fundamentals and Algorithms**. ESA Communications, 2013. v. I

THU, T. M.; FREDLUND, D. G. Modelling subsidence in the Hanoi City area, Vietnam. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 37, n. 3, p. 621–637, 2000.

TIGA, J. F. **Análise espacial e estatística dos movimentos de massa deflagrados pelas chuvas dos dias 11 e 12 de janeiro de 2011 na região serrana do estado do Rio de Janeiro, Brasil**. Dissertação de Mestrado—Brasília: UnB, 2013.

TOMASELLI, M.; GUALMINI, M.; PETRAGLIA, A.; PONTIN, A.; CARBOGNANI, M.; GERDOL, R. Three mires in the south–eastern Alps (northern Italy). **Journal of Maps**, v. 14. p. 303–311. 2018. DOI: 10.1080/17445647.2018.1461692. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17445647.2018.1461692>. Acesso em: 03 set. 2022.

TOPCON. **Hiper SR: Avançado, ultracompacto e produtivo**. s.d. Disponível em: <https://www.topconpositioning.com/br/gnss-and-network-solutions/integrated-gnss-receivers/hiper-sr#panel-product-info>. Acesso em 10 de janeiro de 2023.

TRAGUETA, N. L. **Implicações do uso de receptores GPS de navegação sem conhecimento de suas limitações e configurações básicas**. 89f. 2008. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Botucatu, 2008. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/90725/tragueta_nl_me_botfca.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em : 15 nov. 2022.

TREINTA, F. T.; FARIAS FILHO, J. R.; SANT'ANNA, A. P.; RABELO, L. M. Metodologia de pesquisa bibliográfica com a utilização de método multicritério de apoio à decisão. **Production**, v. 24, n. 3, p. 508–520. set. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-65132013005000078>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/prod/a/9BprB4MFDXfpSJqkL4HdJCQ/>. Acesso em: 15 out. 2022.

VANTI, N. Da bibliometria à webometria: uma exploração conceitual dos mecanismos utilizados para medir o registro da informação e a difusão do conhecimento. **Ciência da Informação**, v. 31, n. 2, p. 152–162, maio/ago. 2002. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-19652002000200016>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ci/a/SLKfBsNL3XHPPqNn3jmqF3q/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 12 out. 2022.

VAZQUEZ-ONTIVEROS, J. R. *et al.* Monitoring of local deformations and reservoir water level for a gravity type dam based on GPS observations. **Advances in Space Research**, v. 69, n. 1, p. 319–330, 1 jan. 2022.

WANG, G. *et al.* Houston GNSS Network for Subsidence and Faulting Monitoring: Data Analysis Methods and Products. **Journal of Surveying Engineering**, v. 148, n. 4, p. 04022008, 25 jun. 2022a.

WANG, K.–L. *et al.* High–Resolution LiDAR Digital Elevation Model Referenced Landslide Slide Observation with Differential Interferometric Radar, GNSS, and Underground Measurements. **Applied Sciences** 2021, Vol. 11, Page 11389, v. 11, n. 23, p. 11389, 1 dez. 2021.

WANG, P. *et al.* Performance evaluation of a real–time high–precision landslide displacement detection algorithm based on GNSS virtual reference station technology. **Measurement**, v. 199, p. 111457, 1 ago. 2022b.

WELLS, D. E. *et al.* **Guide to GPS Positioning**. Canadian GPS Associates: Fredericton, NB, Canada. 1987. Disponível em: <https://gge.ext.unb.ca/Pubs/LN58S.pdf>. Acesso em: 14 jul. 2022.

WHITTAKER, B. N.; REDDISH, D. J. **Subsidence: occurrence, prediction, and control**. [s.l.] Elsevier, 1989.

WU, S. *et al.* Threshold Definition for Monitoring Gapa Landslide under Large Variations in Reservoir Level Using GNSS. **Remote Sensing**, Vol. 13, Page 4977, v. 13, n. 24, p. 4977, 8 dez. 2021.

XI, R. *et al.* Simultaneous estimation of dam displacements and reservoir level variation from GPS measurements. **Measurement**, v. 122, p. 247–256, 1 jul. 2018.

XIE, W. *et al.* Characteristics and Performance Evaluation of QZSS Onboard Satellite Clocks. **Sensors** 2019, Vol. 19, Page 5147, v. 19, n. 23, p. 5147, 24 nov. 2019.

ZEITOUN, D. G.; WAKSHAL, E. **Land Subsidence Analysis in Urban Areas**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2013.

ZHANG, C. *et al.* Space–sky–surface integrated monitoring system for overburden migration regularity in shallow–buried high–intensity mining. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 80, n. 2, p. 1403–1417, 1 fev. 2021.

ZHOU, C. *et al.* Emergency Survey and Stability Analysis of a Rainfall–Induced Soil–Rock Mixture Landslide at Chongqing City, China. **Frontiers in Earth Science**, v. 9, p. 1044, 25 nov. 2021a.

ZHOU, W. *et al.* An Improved GNSS and InSAR Fusion Method for Monitoring the 3D Deformation of a Mining Area. **IEEE Access**, v. 9, p. 155839–155850, 2021b.

ZHOU, X. *et al.* Research of Deformation and Soil Moisture in Loess Landslide Simultaneous Retrieved with Ground–Based GNSS. **Remote Sensing**, Vol. 14, Page 5687, v. 14, n. 22, p. 5687, 11 nov. 2022.