

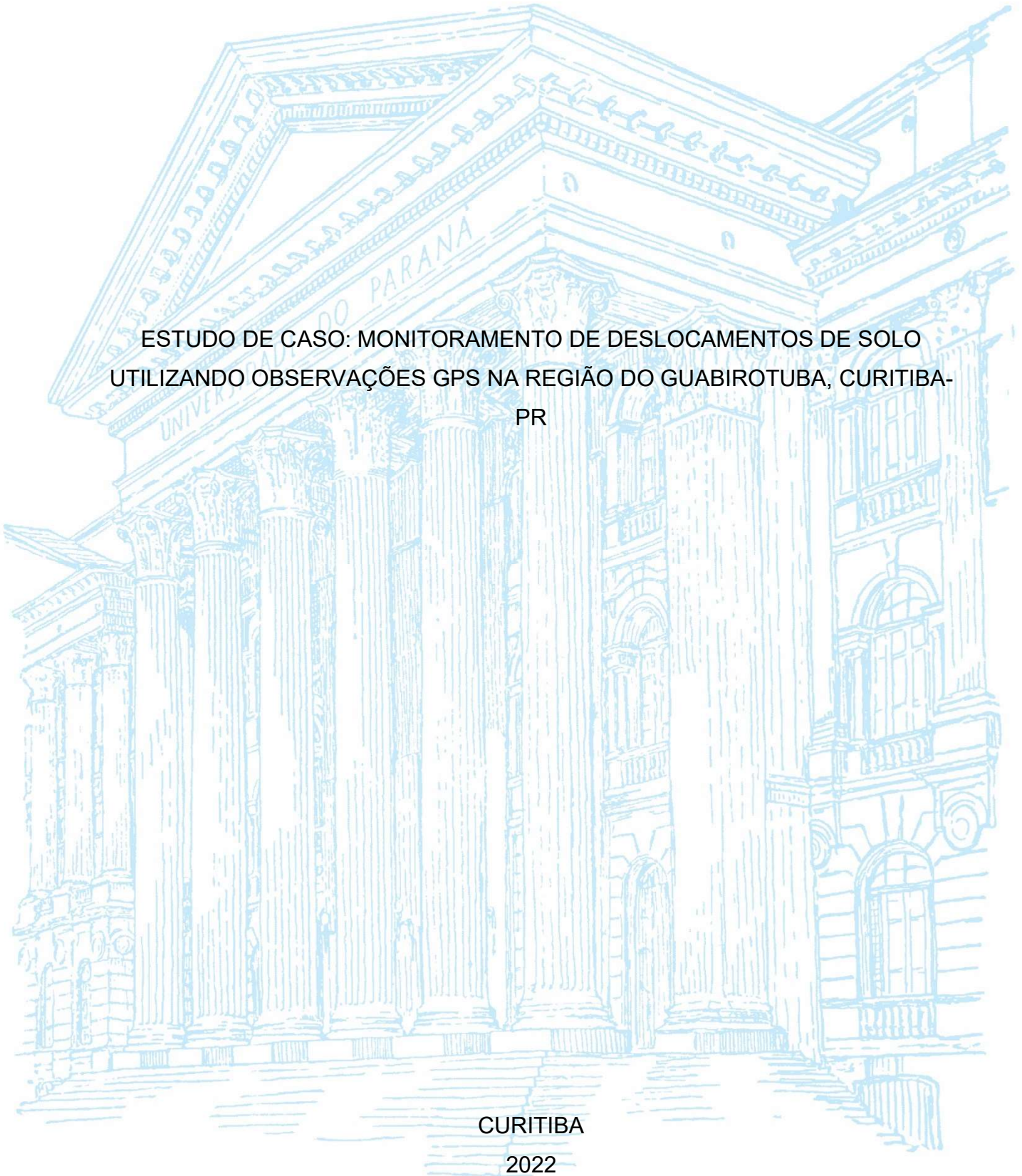
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

RODRIGO ANDRES AMEIGIDE

ESTUDO DE CASO: MONITORAMENTO DE DESLOCAMENTOS DE SOLO
UTILIZANDO OBSERVAÇÕES GPS NA REGIÃO DO GUABIROTUBA, CURITIBA-
PR

CURITIBA

2022



RODRIGO ANDRES AMEIGIDE

ESTUDO DE CASO: MONITORAMENTO DE DESLOCAMENTOS DE SOLO
UTILIZANDO OBSERVAÇÕES GPS NA REGIÃO DO GUABIROTUBA, CURITIBA-
PR

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Cartográfica e de Agrimensura, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Cartográfica e de Agrimensura.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Claudia Pereira Krueger

Orientador: Prof. Msc. Christian Gonzalo Pilapanta Amagua

CURITIBA

2022



Universidade Federal do Paraná
Setor de Ciências da Terra
Engenharia Cartográfica e de Agrimensura

TERMO DE APROVAÇÃO

RODRIGO ANDRES AMEIGIDE

ESTUDO DE CASO: MONITORAMENTO DE DESLOCAMENTOS DE SOLO UTILIZANDO
OBSERVAÇÕES GPS NA REGIÃO DO GUABIROTUBA, CURITIBA-PR

O Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Cartográfica e de Agrimensura, Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná, foi APROVADO como requisito à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Cartográfica e de Agrimensura.

Profª Drª. Cláudia Pereira Krueger

Orientador(a) – Departamento de Geomática, UFPR

Drª. Renata Magda Cavalcante Werlich

Msc. Sérgio da Conceição Alves

Doutorando no Programa de Pós Graduação em Ciências Geodésicas, UFPR

Curitiba, 16 de setembro de 2022.

Aos meus pais e meu irmão por me apoiarem em todos os meus projetos e por serem minha fonte de inspiração.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por estar comigo em todos os meus passos e iluminar meu caminho durante toda minha trajetória.

Aos meus pais, Jorge e Ladir e ao meu irmão, Alain, pela educação e valores que me foram passados. Por todo apoio, carinho e amor incondicional, vocês são meu alicerce.

À minha companheira, Mariam, por todo suporte, amor e paciência durante os últimos anos de graduação, seu apoio sempre me motivou a seguir em frente, você é uma mulher incrível.

Aos meus amigos e colegas de curso, que fizeram essa jornada acadêmica ser muito mais leve e divertida, carregarei boas lembranças dessa etapa da minha vida graças a vocês.

À professora Dr^a Cláudia Pereira Krueger, que prontamente se disponibilizou a me auxiliar neste projeto e é uma referência de excelência profissional e uma pessoa muito querida. Ao orientador, professor MSc Christian Gonzalo Pilapanta Amagua, por todos os ensinamentos passados e paciência durante este projeto, agradeço por me atender a qualquer momento, sempre com atenção e dedicação.

Aos colegas que auxiliaram nas campanhas de levantamentos de campo: Amanda Torres, Daniel Lenkiu, Felipe Fernandes, Gabriel Santos, Guilherme Lange, Michelle Gomes, Rhuan Felipe, Richard Portela e Ulisses Lazzarini.

*Gather ye Rosebuds while ye may,
Old Time is still a-flying;
And this same flower that smiles today,
Tomorrow will be dying.*
(Robert Herrick, 1648)

RESUMO

Os movimentos de massa são parte da dinâmica terrestre que causam constantes mudanças em nosso ambiente, podendo ser fomentado por intervenções naturais ou pela ação do homem. Quando esses fenômenos ocorrem em áreas urbanas, podem provocar diversos prejuízos e vítimas. Nos últimos anos, a capacidade do sistema GPS em estimar as posições com alta precisão tem contribuído para o desenvolvimento de técnicas de monitoramento, servindo como informações nos estudos de deslocamento e deformações da superfície. Neste contexto, com o objetivo de estimar os deslocamentos locais em uma área urbanizada instável no bairro Guabirota, na cidade de Curitiba-PR, Brasil, foi implantada uma rede de monitoramento que periodicamente é avaliada utilizando técnicas geodésicas de posicionamento. Este trabalho apresenta o resultado de onze campanhas, realizadas entre 2014 e 2022. Todos os dados obtidos foram processados através do *software* científico GAMIT-GLOBK, e posteriormente representados em séries de coordenadas locais topocêntricas, para avaliar os movimentos horizontais e verticais da região. Desta forma, foi possível dimensionar e indicar o sentido de deslocamento dos pontos em um processo classificado como rastejo, devido à baixa velocidade do movimento de massa e aos indícios observados na região.

Palavras-chave: GPS. Monitoramento. Movimentos de massa. Séries temporais. GAMIT-GLOBK.

ABSTRACT

Mass movements are part of the terrestrial dynamics that cause constant changes in our environment, which can be caused by natural interventions or by human action. When these events happen in urban areas, it may cause several damages and victims. In the last few years, the GPS capacity to estimate positions with high precision has contributed to the development of monitoring techniques, serving as information in displacement and surface deformations studies. In this context, with the objective of estimating local displacements in an unstable urbanized area in the Guabirotuba neighborhood, in the city of Curitiba-PR, Brazil, a monitoring network that is periodically evaluated using geodesic positioning techniques was implanted. This work presents the results of eleven campaigns, carried out between 2014 and 2022. All the data obtained were processed using the GAMIT-GLOBK scientific software and later represented in a series of topocentric local coordinates system to evaluate the horizontal and vertical movements of the region. In this way, it was possible to dimension and indicate the direction of displacement of the points in a process classified as soil creep, due to the low speed of the mass movement and the evidence observed in the region.

Keywords: GPS. Monitoring. Mass movements. Time series. GAMIT-GLOBK.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – CONFIGURAÇÃO MÍNIMA PARA POSICIONAMENTO TRIDIMENSIONAL GPS.....	21
FIGURA 2 – CÁLCULO DOS VETORES DE VELOCIDADES.....	24
FIGURA 3 – DEGRADAÇÃO DA VELOCIDADE EM FUNÇÃO DA PERIODICIDADE DOS DADOS.....	25
FIGURA 4 – FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA.....	26
FIGURA 5 – MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	26
FIGURA 6 – IMAGEM DOS PONTOS.....	28
FIGURA 7 – FISSURAS DOS MUROS.....	29
FIGURA 8 – POSTE INCLINADO.....	30
FIGURA 9 – RESIDÊNCIA DEMOLIDA.....	30
FIGURA 10 – GPS LEICA 1200.....	32
FIGURA 11 – GPS LEICA 900.....	32
FIGURA 12 – TOPCON HIPER SR.....	32
FIGURA 13 – LEIATX900CS.....	32
FIGURA 14 – LEIAX1202GG.....	32
FIGURA 15 – ESTAÇÕES EMPREGADAS NO PROCESSAMENTO.....	36
FIGURA 16 – VELOCIDADE HORIZONTAL DOS PONTOS.....	53

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - EAST M004.....	43
GRÁFICO 2 - NORTH M004	43
GRÁFICO 3 - UP M004	44
GRÁFICO 4 - EAST M013.....	45
GRÁFICO 5 - NORTH M013	45
GRÁFICO 6 - UP M013.....	46
GRÁFICO 7 - MÉDIA DOS RESÍDUOS PONTO M013	47
GRÁFICO 8 - EAST M015.....	48
GRÁFICO 9 - NORTH M01	48
GRÁFICO 10 - UP M015.....	49
GRÁFICO 11 - EAST M016.....	50
GRÁFICO 12 - NORTH M016	50
GRÁFICO 13 - UP M016.....	51

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – CLASSIFICAÇÃO DOS MOVIMENTOS DE MASSA	18
QUADRO 2 - SÉRIE TEMPORAL PONTO M004	42
QUADRO 3 - ESTATÍSTICAS PONTO M004	42
QUADRO 4 - SÉRIE TEMPORAL PONTO M013	44
QUADRO 5 - ESTATÍSTICAS PONTO M013	45
QUADRO 6 - SÉRIE TEMPORAL PONTO M015	47
QUADRO 7 - ESTATÍSTICAS PONTO M015	47
QUADRO 8 - SÉRIE TEMPORAL PONTO M016	49
QUADRO 9 - ESTATÍSTICAS PONTO M016	50

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – ERROS SISTEMÁTICOS PRESENTES NO POSICIONAMENTO.....	22
TABELA 2 - DIAS GPS E TEMPO DE RASTREIO	35
TABELA 3 – ESTAÇÕES DA RBMC.....	36
TABELA 4 - MODELOS DA CONVENÇÃO IERS 2010 UTILIZADOS NO PROCESSAMENTO	37
TABELA 5 – ESTATÍSTICAS DA CONSISTÊNCIA DAS SOLUÇÕES FINAIS.....	40
TABELA 6 - ESTATÍSTICAS DE ESTABILIZAÇÃO DO SISTEMA DE POSICIONAMENTO POR CAMPANHA	41
TABELA 7 - VELOCIDADE ABSOLUTA DOS PONTOS	52

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

COPEL – Companhia Paranaense de Energia
DGPS – *Differential Global Positioning System*
D-LCS – *Daily Loosely Constrained Solutions*
GLONASS – *Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*
GNSS – *Global Navigation Satellite System*
GPS – *Global Positioning System*
GPST – *Global Positioning System Time*
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IERS – *International Earth Rotation Systems*
INCRA – Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária
IGS – *International GNSS Service*
ITRF – *International Terrestrial Reference Frame*
ITRS – *International Terrestrial Reference System*
LAGEH – Laboratório de Geodésia Espacial e Hidrografia
MIT – *Massachusetts Institute of Technology*
MS-DOS – *Microsoft Disk Operating System*
NE – *North-East*
NGS – *National Geodetic Survey*
NW- *North-West*
PP – Posicionamento por Ponto
PR – Paraná
PPP – Posicionamento por Ponto Preciso
RBMC – Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos sistemas GNSS
RINEX – *Receiver Independent Exchange Format*
RKF – *Robust Kalman Filtering*
RMS – *Root Mean Square*
RTK – *Real Time Kinematic*
SIO – *Scripps Institution of Oceanography*
SIRGAS – Sistema de Referências Geocêntrico para as Américas
SLR – *Satellite Laser Ranging*
SW – *South-West*
TEQC – *Translation, Editing and Quality Check Toolkit*

UFPR – Universidade Federal do Paraná

UTC – *Coordinated Universal Time*

UTM – Universal Transversa de Mercator

VLBI – *Very Long Baseline Interferometry*

WRMS – *Weighted Root Mean Square*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVOS	17
1.1.1 Objetivo geral	17
1.1.2 Objetivos específicos.....	17
2 REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1 MOVIMENTOS DE MASSA	18
2.2 GNSS APLICADO AO MONITORAMENTO.....	20
2.3 POSICIONAMENTO POR SATÉLITES.....	21
2.3.1 Erros envolvidos nas observáveis GPS.....	22
2.4 VARIAÇÃO TEMPORAL DE COORDENADAS	23
2.4.1 Efeitos de sinais anuais na velocidade geodésica	24
3 MATERIAIS E MÉTODOS	26
3.1 ÁREA DE ESTUDO E ASPECTOS GEOLÓGICOS.....	27
3.2 MATERIAIS	31
3.2.1 Equipamentos	31
3.2.2 Programas.....	33
3.2.2.1 TEQC.....	33
3.2.2.2 GAMIT/GLOBK.....	33
3.3 MÉTODOS	34
3.3.1 Levantamentos de campo	34
3.3.2 Processamento dos dados	35
3.3.3 Avaliação da consistência do processamento.....	38
3.3.4 Análise das séries temporais.....	38
4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	40
4.1 ANÁLISE DA CONFIABILIDADE DO PROCESSAMENTO	40
4.2 TESTE DA CONSISTÊNCIA DAS SÉRIES TEMPORAIS.....	41
4.3 ANÁLISE DAS SÉRIES TEMPORAIS.....	41
4.4 ANÁLISE DE DESLOCAMENTOS DOS PONTOS	51
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	54
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	54
REFERÊNCIAS	56

APÊNDICE 1 – SÉRIES TEMPORAIS	61
APÊNDICE 2 – ESTATÍSTICAS DAS SÉRIES TEMPORAIS	64
APÊNDICE 3 – GRÁFICOS DAS SÉRIES TEMPORAIS	66

1 INTRODUÇÃO

Os processos de movimentos de massa são eventos naturais ou artificiais e fazem parte da geodinâmica. Quando esses movimentos ocorrem em áreas ocupadas, como em regiões urbanas, podem acarretar consequências econômicas e sociais de significativa dimensão (CERRI, 1999).

Com o início do processo de urbanização, a ocupação do espaço urbano foi caracterizada pelo crescimento desordenado, habitação irregular e degradação do meio físico. Entre outras questões, esses aspectos criam áreas de perigo, tendo em vista que estes fatores têm implicação direta na potencialidade e pré-disposição à processos de dinâmica superficial, como a subsidência do solo (RECKZIEGEL, 2012).

Em relação à identificação da ocorrência dos movimentos de massa, Amaral e Gutjahr (2011) apontam que os sinais de movimento da terra, muitas vezes, não são percebidos e só podem ser notados em pequenas mudanças nas construções ou no terreno (rachaduras no terreno, postes inclinados, fissuras nas paredes, etc.), especialmente em períodos de chuvas fortes ou prolongadas. O deslocamento de material ocorre em diferentes escalas e velocidades, variando de rastejamentos (movimentos lentos) a deslizamentos (movimentos rápidos) (CHORLEY et al., 1984).

Técnicas geodésicas de posicionamento vêm sendo amplamente aplicadas nos últimos anos, no que se refere a monitoramentos de movimentos de massa, conforme pode-se observar em: Schmitt et al. (2007), Brunner et al. (2000), Bian et al. (2014), Zanutta et al. (2017).

No cenário nacional, Werlich (2017) observou indícios de um deslizamento de solo na região do Guabirotuba em Curitiba-PR, onde foi implantada uma rede de monitoramento composta de pontos e marcos geodésicos no ano de 2014, com o objetivo de realizar o acompanhamento temporal dos deslocamentos. Dando continuidade a este estudo, Amagua et al. (2022) apresentaram os resultados de nove campanhas GPS (*Global Positioning System*) realizadas na região, entre os anos de 2014 e 2019, em que constataram vetores de velocidades horizontais de magnitude entre 1 e 16mm/a. A magnitude média e direção das velocidades horizontais obtidas para cada local, permitem demonstrar a deformação da zona sul da área como resultado de um processo de deslizamento local.

Prosseguindo com os estudos realizados por Werlich (2017) e Amagua et al. (2022), este trabalho visa avaliar os movimentos de massa da área, estimando a

magnitude e a direção do processo de deslizamento local contribuindo com o acompanhamento temporal da região.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Detectar movimentos de massa locais em uma área urbana através da análise de dados GPS para avaliar a dimensão desta instabilidade do solo.

1.1.2 Objetivos específicos

A fim de cumprir o objetivo principal, foram definidos os seguintes objetivos específicos a serem cumpridos:

- Realizar o monitoramento da área com receptores de alta frequência com sessões de 3 horas de duração, visando a determinação de deslocamentos pontuais;
- Definir uma sub-rede geodésica composta por pontos da rede implantada por Werlich (2017) para determinar os movimentos da área;
- Realizar o processamento dos dados através do software científico *GAMIT/GLOBK* visando obter soluções posicionais estatisticamente confiáveis e estimar as coordenadas e velocidades das estações com alta acurácia e precisão;
- Gerar e analisar as séries temporais das coordenadas topocêntricas locais para detectar, dimensionar e classificar os movimentos de massa na área de estudo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo são abordados alguns temas que podem contribuir com o leitor na compreensão desse trabalho, sendo: os movimentos de massa, GNSS (*Global Navigation Satellite System*) aplicado ao monitoramento, posicionamento por satélites e sobre a variação temporal das coordenadas.

2.1 MOVIMENTOS DE MASSA

Os movimentos de massa são processos dinâmicos que ocorrem principalmente em vertentes, ou seja, locais com superfície topográfica inclinada, sob a ação direta da gravidade. Estes eventos podem ser desencadeados, por exemplo, por fatores endógenos, tais como tipo de solo, de rocha, de forma do terreno e fatores exógenos, como variáveis climáticas, fatores antrópicos, entre outros (BISPO et. al., 2011).

Quando intensificados pela ocupação humana, os movimentos de solo podem tornar-se um problema ainda maior, devido a remoção da cobertura vegetal, favorecendo o deslocamento de massa em caso de chuvas intensas (DA SILVA et. al., 2016). Podem ser considerados eventos de risco, fenômenos de origem natural ou devido a ação humana que provocam prejuízos ao meio biofísico e social (ZUQUETTE et al., 1995).

Segundo Tominaga (2009), os movimentos de massa podem ser de diversos tipos, pois envolvem uma variedade de materiais e processos. Dentre as classificações brasileiras, uma das que mais se destaca é a de Augusto Filho (1992). Esta classificação é pautada no tipo de movimento, velocidade e no tipo de material transportado e está apresentada no QUADRO 1.

QUADRO 1 – CLASSIFICAÇÃO DOS MOVIMENTOS DE MASSA

Processos	Dinâmica/Geometria/Material
Rastejo	<ul style="list-style-type: none"> • Vários planos de deslocamento (internos) • Velocidades muito baixas (cm/ano) a baixas e decrescentes com a profundidade • Movimentos constantes, sazonais ou intermitentes • Solo, depósitos, rocha alterada/fraturada

	<ul style="list-style-type: none"> • Geometria indefinida
Escorregamentos	<ul style="list-style-type: none"> • Poucos planos de deslocamento (externos) • Velocidades médias (m/h) a altas (m/s) • Pequenos a grandes volumes de material • Geometria e materiais variáveis: <ul style="list-style-type: none"> - Planares: solos pouco espessos, solos e rochas com um plano de fraqueza - Circulares: solos espessos homogêneos e rocha muito fraturada - Em cunha: solos e rochas com dois planos de fraqueza
Quedas	<ul style="list-style-type: none"> • Sem planos de deslocamento • Movimentos tipo queda livre ou em plano inclinado • Velocidades muito altas (vários m/s) • Material rochoso • Pequenos e médios volumes • Geometria variável: lascas, placas, blocos etc. • Rolamento/tombamento
Corridas	<ul style="list-style-type: none"> • Muitas superfícies de deslocamento (internas e externas à massa em movimentação) • Movimento semelhante ao de um líquido viscoso • Desenvolvimento ao longo das drenagens • Velocidades médias a altas • Mobilização de solo, rocha, detritos e água • Grandes volumes de material • Extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas

FONTE: Augusto Filho (1992).

De acordo com Cunha (1991) dentre as principais causas associadas à intervenção humana na indução de movimentos de massa destacam-se:

- Lançamento e concentração de águas pluviais;
- Lançamento de águas servidas;
- Vazamentos na rede de abastecimento de água;
- Fossa sanitária;
- Declividade e altura excessivas de cortes;
- Execução inadequada de aterros;
- Deposição de lixo; e
- Remoção indiscriminada da cobertura vegetal.

2.2 GNSS APLICADO AO MONITORAMENTO

A Geodésia Espacial tem sido uma poderosa ferramenta em atividades de monitoramento. Utilizando as técnicas geodésicas espaciais do *Global Navigation Satellite System* (GNSS), do *Very Long Baseline Interferometry* (VLBI) e o *Satellite Laser Ranging* (SLR) é possível estimar com precisão as coordenadas tridimensionais de pontos de redes geodésicas de monitoramento, servindo como informações nos estudos de deslocamento e deformações da crosta (TANAJURA, 2017).

Teixeira (2005) realizou o monitoramento geodésico de movimentos da crosta utilizando as estações da rede geodésica local de Salto Caxias, uma hidrelétrica localizada entre os municípios de Capitão Leônidas Marques e Nova Prata do Iguaçu, no Paraná, implantadas pela Companhia Paranaense de Energia (COPEL). O autor salientou que os resultados obtidos foram satisfatórios, e destacou a utilização do posicionamento GNSS como uma boa alternativa para o monitoramento, já que obtiveram coordenadas precisas e confiáveis, tendo em consideração o bom desempenho dos testes estatísticos realizados.

Bian et al. (2014), a fim de monitorar com precisão a subsidência do solo de mineração, estabeleceram uma rede de monitoramento GNSS de alta precisão com base nas estações internacionais de serviço GNSS próximas, utilizadas como pontos de referência. Ao estabelecer uma rede de monitoramento GNSS composta por 19 pontos combinada com as estações IGS (*International GNSS Service*) próximas, foi introduzido o modelo *Robust Kalman Filtering* (RKF) visando estimar com precisão a deformação da área. As soluções encontradas para as precisões correspondentes aos deslocamentos do solo foram suficientes para detectar os movimentos do solo através de observações de aproximadamente 4 horas de duração.

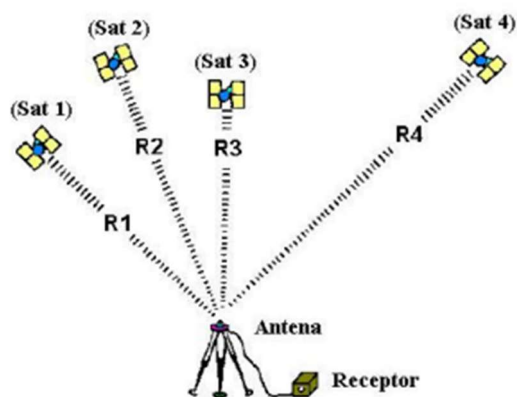
Na pesquisa realizada por Cina (2015) foi testado o desempenho de um receptor GNSS, com o objetivo de verificar se esse tipo de sensor pode ser usado para o monitoramento de deslocamentos do solo. Para tanto, foi desenvolvida uma plataforma que permitiu realizar movimentos em uma antena GNSS com precisão menor que 1 mm. Utilizando um tempo de aquisição dos dados de 10 minutos e uma linha de base de 1 km os resultados indicaram a possibilidade de se chegar a uma precisão que permite realizar o monitoramento de movimentos e deformações utilizando os receptores GNSS (CINA et al., 2015).

2.3 POSICIONAMENTO POR SATÉLITES

As tecnologias espaciais vêm sendo amplamente empregadas no posicionamento de feições terrestres. Nesse sentido, o tem revolucionado as atividades relacionadas ao posicionamento, sendo uma das tecnologias espaciais de posicionamento mais avançadas atualmente. Os principais sistemas globais que podem compor o GNSS são: GPS, GLONASS (*Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*), Galileo e Beidou/Compass (ALVES et. al., 2013).

O princípio básico de posicionamento por satélites consiste nas medidas de distância entre o usuário e, no mínimo, quatro satélites (FIGURA 1). Geometricamente apenas três distâncias, desde que não coplanares, seriam suficientes, entretanto, a quarta medida é necessária devido ao não-sincronismo entre os relógios dos satélites e do receptor (CORREIA et. al., 2008).

FIGURA 1 – CONFIGURAÇÃO MÍNIMA PARA POSICIONAMENTO TRIDIMENSIONAL GPS



FONTE: Seeber (1993).

Empregando a tecnologia GNSS pode-se realizar diversos tipos de posicionamento, como o PP (Posicionamento por Ponto), PPP (Posicionamento por Ponto Preciso), DGPS (GPS-diferencial), posicionamento relativo ou posicionamento baseado em redes (ALVES et. al., 2013).

Caso os erros sejam adequadamente modelados, no posicionamento relativo, as coordenadas são determinadas com precisão de poucos milímetros, sendo esta a principal técnica de posicionamento utilizada em aplicações geodésicas (IBGE, 2008).

Os posicionamentos relativos podem ser pós-processados ou em tempo real. Este relatório não tem por finalidade descrever em detalhes as características e

aplicações do posicionamento GPS. Portanto, para maiores informações sobre os diferentes métodos de posicionamento por satélites podem ser encontrados em Seeber (2003), Leick (2004), Monico (2008) e Ghilani e Wolf (2012).

2.3.1 Erros envolvidos nas observáveis GPS

As observáveis envolvidas no processo de posicionamento GPS estão sujeitas a erros aleatórios, sistemáticos e grosseiros (MONICO, 2008). Os erros aleatórios são considerados uma propriedade inerente da observação, não apresentando relação funcional com as medidas observadas; os erros sistemáticos podem ser corrigidos através de modelos matemáticos, ou minimizados por técnicas apropriadas de observação. Já os erros grosseiros deverão ser identificados e eliminados antes da utilização dos dados no processamento final das observações (IBGE, 2008).

Os erros manifestam-se no processo de estimação de parâmetros caso o modelo matemático seja simples e não represente perfeitamente a realidade física. Dentre os diversos erros envolvidos nas observáveis GPS, alguns possuem maior influência na precisão das coordenadas estimadas, entre eles: erro da órbita do satélite, multicaminho, perdas de ciclo, centro de fase da antena, refração troposférica e refração ionosférica (IBGE, 2008).

De modo geral, os erros sistemáticos presentes no posicionamento podem ser observados na TABELA 1.

TABELA 1 – ERROS SISTEMÁTICOS PRESENTES NO POSICIONAMENTO

FONTE	ERRO	TIPO
Satélite	Erro na órbita Efeitos relativísticos Erros instrumentais	Posição Estabilidade do relógio Sincronização do relógio
Sinal	Radiação solar Refração atmosférica	Pressão por radiação solar Refração troposférica Refração ionosférica
Receptor/Antena	Erros instrumentais	Sincronização do relógio Variações do centro de fase Propagação entre canais
Meio	Geodinâmica Cargas	Movimentos Tectônicos Carga atmosférica Carga oceânica Carga hidrológica Marés atmosféricas Marés oceânicas Marés terrestres

FONTE: Amagua, C. (2018).

Quando se trata de monitoramento temporal é de fundamental importância que os erros sejam modelados e/ou minimizados ao máximo, visando estimar com precisão a deformação da área.

2.4 VARIAÇÃO TEMPORAL DE COORDENADAS

As posições dos marcos geodésicos na superfície terrestre sofrem variações temporais devido aos efeitos geofísicos (como efeitos de carga oceânica, deformações tectônicas, dentre outros) (PETIT et. al., 2010). Logo, é necessário considerar a época associada com a realização de tais sistemas de referências (DE PAULO RAMOS et. al., 2022).

No posicionamento geodésico com o uso do GPS são empregadas efemérides precisas as quais são vinculadas à época da sessão do rastreo e ao referencial realizado pelo IGS (CARVALHO et. al., 2015).

O IGS altera regularmente o sistema de referência o qual é utilizado para vincular seus produtos, entre eles, efemérides precisas, relacionadas às realizações ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*) do ITRS (*International Terrestrial Reference System*) (CARVALHO et. al., 2015).

O ITRS foi realizado pela primeira vez em 1988 (ITRF88) e, desde então, foram efetuadas várias outras realizações. A solução mais recente do ITRF é o ITRF2020 e, após a adoção do SIRGAS2000 (época 2000,4) como o referencial oficial do Brasil, foram materializadas mais quatro versões do ITRF (ITRF2005, ITRF2008, ITRF2014 e ITRF2020). A nova realização do ITRS (ITRF2020) foi disponibilizada online a partir de 15 de abril de 2022 (IGS, 2022). A partir de maio de 2020 o IGS adotou o IGB14 como referencial geodésico das coordenadas dos satélites GNSS (órbitas precisas) (NATIONAL GEODETIC SURVEY, 2020).

De forma a analisar os movimentos periódicos, uma das principais ferramentas existentes é o uso de séries de coordenadas, as quais seguem um modelo matemático preestabelecido, como o modelo de trajetória. O cálculo dos deslocamentos lineares (vetores de velocidades) pode ser realizado de acordo com o exposto na FIGURA 2 (AMAGUA et. al., 2019):

FIGURA 2 - CÁLCULO DOS VETORES DE VELOCIDADES

O diagrama ilustra a equação da posição x^i no tempo t . A equação é apresentada como:

$$x^i = x_0^i + v^i(t - t_0) + A_0^i \cos\left(\frac{2\pi(t - t_0)}{T_0} - \tau_0\right) + A_1^i \cos\left(\frac{2\pi(t - t_0)}{T_1} - \tau_1\right) + \varepsilon$$

As partes da equação são rotuladas da seguinte forma:

- Posição no tempo t** : Indica o valor final da posição x^i .
- Posição inicial (t_0)**: Indica o valor inicial da posição x_0^i .
- Velocidade (Componente linear)**: Indica o termo $v^i(t - t_0)$.
- Componente periódica**: Indica os dois termos de cosseno.
- Períodicidade anual (senoidal)**: Indica o primeiro termo de cosseno com período T_0 .
- Períodicidade semi-anual (senoidal)**: Indica o segundo termo de cosseno com período T_1 .
- Erro**: Indica o termo ε .

FONTE: Adaptado de Amagua et al. (2019).

O modelo é constituído de um termo linear, e outros dois termos periódicos, que descrevem os movimentos anuais e semianuais dos pontos. Desta forma, é possível modelar as coordenadas de um ponto ao longo do tempo de maneira simplificada.

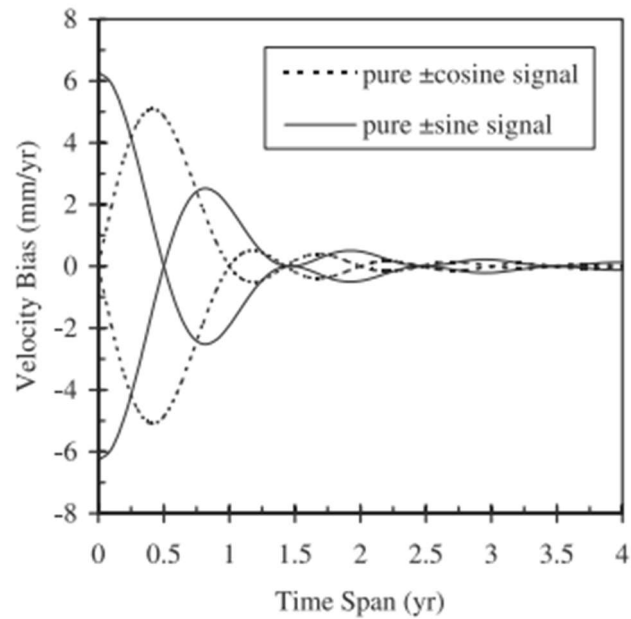
2.4.1 Efeitos de sinais anuais na velocidade geodésica

No estudo realizado por Blewitt et al., (2002) foi desenvolvida a teoria de erros em velocidades para séries temporais de coordenadas que contêm erros de repetição anual. Esses erros são ocasionados principalmente por variações das condições atmosféricas (propagação do sinal) e carregamentos hidrológicos (deformação superficial por efeitos de carga) (VAN DAM et al., 2001).

Na FIGURA 3, tem-se a polarização do viés da velocidade de sinais senoidais (seno e cosseno) por um intervalo de tempo. Observa-se que o viés da velocidade com amplitude de 1 mm é uma função oscilatória em um intervalo de dados T , que tende a zero para grandes T .

A FIGURA 3 apresenta como a precisão das velocidades obtidas através de dados GPS depende do tempo decorrido entre a obtenção dos dados. Desta maneira, quanto mais tempo de dados, melhor a precisão.

FIGURA 3 – DEGRADAÇÃO DA VELOCIDADE EM FUNÇÃO DA PERIODICIDADE DOS DADOS



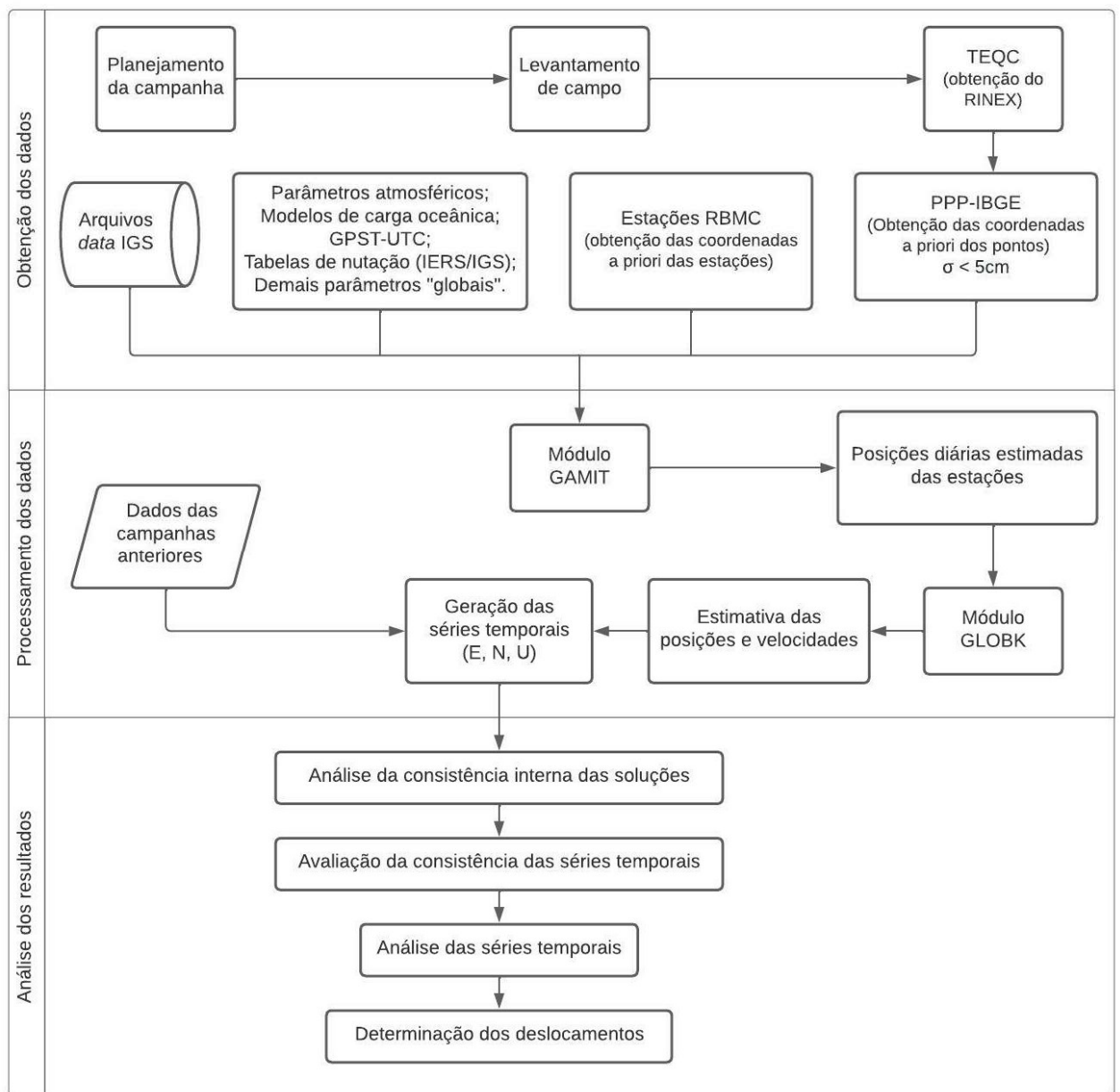
FONTE: Blewitt, G. & Lavallée, D. (2002).

Blewitt e Lavallée (2002) recomendam em seu estudo que para aplicações geofísicas de precisão, os sinais senoidais anuais e semestrais sejam estimados simultaneamente com a velocidade do local e a posição inicial do ponto, indicando que sejam adotados 2 anos e meio como um intervalo mínimo de dados para soluções de velocidade destinadas a interpretações tectônicas. Entretanto, esta estimativa simultânea torna-se rapidamente desnecessária além de 4 anos e meio, pois, como é possível verificar na FIGURA 3, o viés de velocidade eventualmente torna-se insignificante, desde que, realizadas nas mesmas épocas do ano, no mesmo horário e nas mesmas condições (BLEWITT et al., 2002).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento deste trabalho se deu através da execução de três etapas principais: a obtenção dos dados, o processamento dos dados e a análise dos resultados. A FIGURA 4 apresenta resumidamente como cada uma das etapas mencionadas foram realizadas.

FIGURA 4 – FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA



FONTE: O Autor (2022).

Na área foi estabelecida uma sub-rede geodésica composta por 11 pontos da rede implantada por Werlich (2017), os quais são representados pelos pontos vermelhos na FIGURA 5, estes pontos foram escolhidos pois são os pontos presentes na área mais crítica da região, identificada por Amagua et al. (2022). Na FIGURA 6, pode-se observar as imagens com a localização dos pontos levantados nessa campanha.

FIGURA 6 - IMAGEM DOS PONTOS



FONTE: O Autor (2022).

Werlich (2017) destaca que devido a sua composição geomorfológica e a presença de diversos processos geológicos nas proximidades do Rio Guabirota, há

uma alta suscetibilidade à erosão e movimento de massa na região. Apesar de não ser o objetivo da pesquisa analisar os fatores que acarretam os deslocamentos, Werlich (2017) menciona que durante a criação deste loteamento, foi realizado um aterramento para que o desnível não ficasse tão acentuado como era originalmente. Entretanto, foi encontrado indícios de que o aterro tenha sido realizado de forma inadequada, com uma mistura de terra e entulhos, sugerindo que uma intervenção antrópica pode ter contribuído para o processo natural de acomodação do solo.

Durante o levantamento dos dados em campo foi possível observar fissuras em muros das residências (FIGURA 7), postes inclinados (FIGURA 8) e uma residência demolida devido aos danos estruturais (FIGURA 9). Evidências da presença de deslocamento superficiais na área de estudo.

FIGURA 7 - FISSURAS NOS MUROS



FONTE: O Autor (2022).

FIGURA 8 - POSTE INCLINADO



FONTE: O Autor (2022).

FIGURA 9 - RESIDÊNCIA DEMOLIDA



FONTE: O Autor (2022).

3.2 MATERIAIS

Os materiais utilizados durante a execução desse projeto foram listados e agrupados de acordo com sua utilização.

3.2.1 Equipamentos

Para a coleta dos dados GPS dos pontos de interesse, foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Receptores geodésicos de dupla frequência Leica GPS 1200 (FIGURA 10);
- Receptor geodésico de dupla frequência Leica GPS 900 (FIGURA 11);
- Receptor geodésico de dupla frequência Topcon Hiper SR (FIGURA 12);
- Antena Leica LEIATX900CS (FIGURA 13);
- Antena Leica LEIAX1202 GG (FIGURA 14).

Os receptores GPS empregados nesse trabalho contam com as seguintes precisões relativas no modo estático.

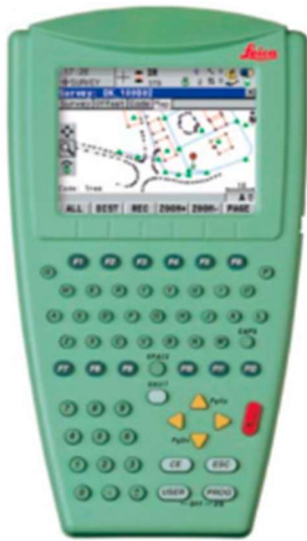
Leica GPS 1200 e Leica GPS 900:

- Horizontal: $5\text{mm} \pm 0,5\text{ppm}$; e
- Vertical: $10\text{mm} \pm 0,5\text{ppm}$.

Topcon Hiper SR:

- Horizontal: $3\text{mm} \pm 0,1\text{ppm}$; e
- Vertical: $5\text{mm} \pm 0,4\text{ppm}$.

FIGURA 10 - GPS LEICA 1200



FONTE: Grupo Acre (2022).

FIGURA 11 – GPS LEICA 900



FONTE: Precision Geosystems (2022).

FIGURA 12 - TOPCON HIPER SR



FONTE: Topcon positioning (2022).

FIGURA 13 – LEIATX900CS



FONTE: Precision Geosystems (2022).

FIGURA 14 - LEIAX1202GG



FONTE: Leica Geosystems (2022).

3.2.2 Programas

Os programas utilizados para o processamento dos dados foram o TEQC e o GAMIT/GLOBK.

3.2.2.1 TEQC

O TEQC (*Translation, Editing, Quality Checking*) trata-se de programa que possibilita o pré-processamento e verificação de qualidade dos dados GPS, desenvolvido pela Universidade *Navstar Consortium* (UNAVCO).

O *software* desenvolvido em MS-DOS, foi utilizado para tradução de dados brutos dos receptores para obtenção do RINEX (*Receiver Independent Exchange Format*) (UNAVCO, 2016).

3.2.2.2 GAMIT/GLOBK

O GAMIT/GLOBK é um pacote abrangente de análise de GPS desenvolvido em conjunto pelo *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), *Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics* (CfA) e *Scripps Institution of Oceanography* (SIO) para estimar coordenadas e velocidades de estações, deformações pós-sísmica, atrasos atmosféricos, órbitas de satélites e parâmetros de orientação da Terra (HERRING, et al., 2010).

Este é um software de processamento de dados GNSS de alta precisão amplamente aplicado em ciências da terra. Por exemplo, ele tem sido usado para monitorar o movimento global das placas ou o movimento crustal regional (AVOUC e TAPPONNIER, 1993; ALTAMIMI et al., 2012, 2016; WANG, 2020) para analisar a dinâmica dos limites das placas e interior (ZHANG et al., 2005; BETTINELLI et al., 2006; BILHAM et al., 1997). Além disso, muitas das vezes é combinado com a distribuição de falhas sísmicas para estudar o processo de terremoto e ocorrência de deformação crustal (HE et al., 2018; JIANG et al., 2014; RYDER et al., 2011) (LI, 2021).

3.3 MÉTODOS

Nesta seção são apresentadas as metodologias empregadas para a coleta de dados para o monitoramento da sub-rede geodésica, além de informações quanto aos levantamentos. Também são discutidas sobre o processamento dos dados obtidos.

3.3.1 Levantamentos de campo

Dando continuidade aos estudos realizados por Werlich (2017) e Amagua et al. (2022) as campanhas realizadas neste trabalho foram efetuadas com o Método de Posicionamento Relativo Estático, utilizando, também, o Posicionamento Absoluto empregando o serviço PPP-IBGE para obtenção das coordenadas a priori necessárias para o processamento com o GAMIT. Os processamentos realizados com os dados são encontrados com mais detalhes na seção 3.3.2.

Os levantamentos em campo foram efetuados em duas campanhas: uma no dia GPS 182 (M010, M011, M012, M016 e M019) e a segunda campanha foi realizada uma semana depois, no dia GPS 189 (M003, M004, M005, M013, M015 e M018), a disposição dos pontos pode ser observada na FIGURA 5.

Nas duas campanhas realizadas neste trabalho foram gravadas apenas informações obtidas com os satélites da constelação GPS, tempo de rastreamento em cada ponto foi de até 3 horas, com intervalo de gravação dos dados de 1 segundo com máscara de elevação de 10°. Vale destacar que, apesar dos dados terem sido obtidos a cada segundo, os dados foram processados a cada 30 segundos.

Na TABELA 2 são apresentados os dias GPS das duas campanhas realizadas, assim como, das campanhas efetuadas nos anos de 2014, 2015, 2016, 2017 e 2019, bem como a duração de cada rastreamento em cada ponto que compõem a rede implantada por Werlich (2017).

TABELA 2 - DIAS GPS E TEMPO DE RASTREIO

Ponto	CAMPANHA (Dia GPS/Ano)										
	1 ^a (319/14)	2 ^a (029/15)	3 ^a (101/15)	4 ^a (156/15)	5 ^a (121/16) (123/16*)	6 ^a (049/17)	7 ^a (263/17) (264/17*) (265/17**)	8 ^a (120/19) (121/19*) (122/19**)	9 ^a (239/19) (240/19*) (241/19**)	10 ^a (182/22)	11 ^a (189/22)
M003	1h09min	1h19min	1h20min	1h14min	1h32min	1h27min	4h36min**	4h26min**	-	-	2h48min
M004	-	1h29min	1h25min	1h15min	1h18min	1h19min	4h14min	4h8min**	4h22min*	-	2h56min
M005	-	1h22min	1h54min	1h13min	1h21min	1h27min	4h10min*	4h13min**	3h59min*	-	2h17min
M010	1h07min	1h25min	2h02min	1h14min	1h15min*	1h23min	4h05min*	4h04min*	4h16min	2h16min	-
M011	0h38min	1h25min	1h21min	1h20min	1h13min	1h23min	4h06min*	4h39min*	4h10min	2h49min	-
M012	1h10min	1h21min	1h57min	1h15min	1h36min	1h33min	-	-	-	2h47min	-
M013	1h16min	1h24min	1h23min	1h15min	1h36min	1h33min	-	4h12min*	4h19min**	-	2h09min
M015	1h05min	1h31min	1h22min	1h18min	-	-	-	-	-	-	2h36min
M016	1h10min	1h17min	1h20min	1h33min	1h28min*	-	4h08min	4h39min	4h07min	2h48min	-
M018	1h14min	1h28min	1h23min	1h17min	1h18min*	1h30min	-	-	-	-	3h00min
M019	1h11min	1h17min	1h57min	1h12min	1h34min	1h23min	-	4h28min	3h21min	2h41min	-

FONTE: O Autor (2022).

3.3.2 Processamento dos dados

Todos os dados das diferentes campanhas GPS foram processados utilizando o software científico GAMIT/GLOBK (seção 3.2.2.2). Previamente, por meio do serviço PPP-IBGE, foram obtidas as coordenadas a priori dos pontos com precisão menor que 5 centímetros, de modo a restringir o ajustamento da sub-rede geodésica durante o processamento com o programa GAMIT/GLOBK com bons valores iniciais de coordenada.

No pós-processamento relativo foram utilizadas nove estações de monitoramento contínuo, pertencentes à RBMC (TABELA 3) e a SIRGAS-CON, de modo a adequar as posições dos pontos a uma realização do ITRF. Tudo isso faz parte da recente solução multianual SIRGAS (ou seja, SIR17P01), que está alinhada ao IGS14, época 2015.0.

Para uma estabilização das soluções individuais foi aplicado uma restrição generalizada utilizando um conjunto com bons valores a priori (ou seja, estações SIRGAS-CON) minimizando seus ajustes ao estimar uma translação e rotação geral da rede (parâmetros de Helmert) em um processo iterativo (Amagua et al., 2022).

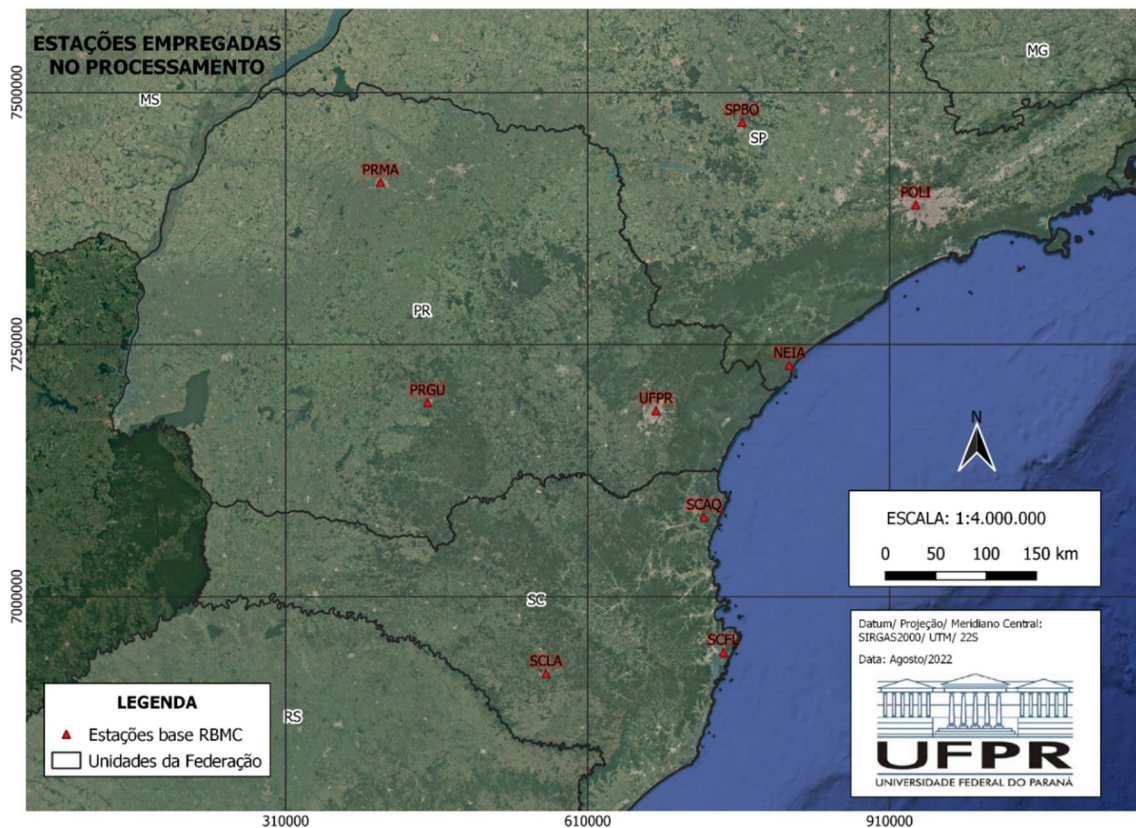
As estações de monitoramento contínuo utilizadas no processamento possuem uma distância entre 116 e 356 km (TABELA 3), aproximadamente, em relação a estação Curitiba-UFPR. As altitudes elipsoidais estão entre 6 e 1.043m, em NEIA e PRGU, respectivamente. Essas estações foram escolhidas buscando uma geometria rígida da distribuição das estações base, visando a robustez da rede. Na FIGURA 15, pode-se observar a distribuição das estações base empregadas no processamento.

TABELA 3 – ESTAÇÕES DA RBMC

Estação RBMC	Cidade - Estado	Linha de Base aproximada em relação a Estação UFPR (km)	Altitude Elipsoidal (m)
NEIA	Cananéia – São Paulo	140	6,055
POLI	São Paulo – São Paulo	329	730,622
PRGU	Guarapuava – Paraná	227	1.043,16
PRMA	Maringá – Paraná	356	543,365
SCAQ	Araquari – Santa Catarina	116	17,285
SCFL	Florianópolis – Santa Catarina	249	17,072
SCLA	Lages – Santa Catarina	282	940,722
SPBO	Botucatu – São Paulo	298	803,122
UFPR	Curitiba - Paraná	-	925,807

FONTE: O Autor (2022).

FIGURA 15 - ESTAÇÕES EMPREGADAS NO PROCESSAMENTO



FONTE: O Autor (2022).

No pós-processamento relativo utilizando o GAMIT-GLOBK, as soluções D-LCS (*Daily Loosely Constrained Solutions*) foram calculadas utilizando uma estratégia de “linha da base”, na qual os parâmetros de órbita foram considerados fixos e apenas as coordenadas do local, atrasos atmosféricos de zênite e parâmetros de orientação da Terra foram estabelecidos utilizando as órbitas finais do IGS. Apesar da obtenção dos dados ter sido feita a cada 1 segundo, os dados foram processados com um intervalo de 30 segundos, pois as informações provenientes das estações base se encontravam nesse intervalo.

No processamento foram considerados diversos modelos de acordo com a convenção IERS (*International Earth Rotation Systems*) 2010, com o intuito de modelar e/ou minimizar as diferentes fontes de erros presentes no posicionamento. A TABELA 4 apresenta alguns dos modelos utilizados no processamento.

TABELA 4 - MODELOS DA CONVENÇÃO IERS 2010 UTILIZADOS NO PROCESSAMENTO

FENÔMENO	MODELO CONVENÇÃO IERS 2010
Movimento polar	Modelo PMSDNUT2
Precessão e Nutação do CIP (<i>Celestial Intermediate Pole</i>)	IAU2006/2000PN
Carga de maré oceânica	FES2004
Carga de maré atmosférica causada pelos constituintes semidiurnos S1 e S2	Modelo de Ray e Ponte (2003)
Deslocamento de centro de fase de antena GNSS	Schmid et al. (2007)

FONTE: O Autor (2022).

Para a antena LEICA ATX900CS, como não existem parâmetros médios de calibração IGS, foi utilizado um modelo de calibração específico que atende aos requisitos estabelecidos pelo IGS e NGS (*National Geodetic Survey*) para modelagem de deslocamento do centro de fase da antena, desenvolvido pelo LAGEH (Laboratório de Geodésia Espacial e Hidrografia) da UFPR (Amagua et al., 2022). Outros efeitos, como efeitos ionosféricos, efeitos troposféricos e efeitos de não carregamento também foram modelados de acordo com a IERS 2010.

As estratégias de processamento descritas anteriormente foram aplicadas a cada subconjunto de sessões listadas na TABELA 2.

3.3.3 Avaliação da consistência do processamento

A consistência das soluções é avaliada observando os valores de WRMS (*Weighted Root Mean Square*), também conhecido como precisão da repetibilidade das soluções. O wrms representa o erro médio quadrático ponderado das operações realizadas em campo que reflete os dados afetados por erros orbitais, erro de atraso atmosféricos, efeitos de multicaminho, entre outros (LI, 2021). De acordo com Sánchez et al. (2015), os níveis estabelecidos para as sessões de posicionamento GPS é de no máximo 4 mm para as coordenadas horizontais e 15 mm para a vertical.

Para avaliar as discontinuidades e perturbações identificadas na série temporal, são analisados os valores de *post-RMS*, indicando se os resultados obtidos representam uma estabilização ruim do referencial e/ou perturbações irregulares nos dados ou se, de fato, tratam-se de algum evento físico no local. Segundo Amagua et al., (2022), o nível esperado que garante a consistência do processo de estabilização para um ajuste local é de aproximadamente 1 a 5 mm.

3.3.4 Análise das séries temporais

Para que se possa analisar os deslocamentos locais, torna-se necessário representar as séries de coordenadas como coordenadas locais topocêntricas transformando do sistema geocêntrico para o sistema local topocêntrico (E, N, U), onde o eixo “E” aponta para a direção leste e é perpendicular ao eixo “N”, ambos contidos no plano topocêntrico, e o eixo “U” coincide com a normal ao elipsoide que passa pelo vértice escolhido como a origem do sistema (SIMÕES et. al, 2017).

Portanto, para cada ponto estudado as coordenadas foram transformadas de coordenadas cartesianas tridimensionais (X_i, Y_i, Z_i) em coordenadas locais topocêntricas (E_i, N_i, U_i) da seguinte forma (NADAL, C.):

$$\begin{bmatrix} E_i \\ N_i \\ U_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \sin \varphi_0 & \cos \varphi_0 \\ 0 & -\cos \varphi_0 & \sin \varphi_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\sin \lambda_0 & \cos \lambda_0 & 0 \\ -\cos \lambda_0 & -\sin \lambda_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i - X_0 \\ Y_i - Y_0 \\ Z_i - Z_0 \end{bmatrix}$$

Em que:

E_i, N_i, U_i = coordenadas locais topocêntricas dos vértices i ;

X_i, Y_i, Z_i = coordenadas cartesianas dos vértices i ;

φ_0, λ_0 = latitude e longitude da origem do sistema;

X_0, Y_0, Z_0 = coordenadas cartesianas ortogonais da origem do sistema.

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos e as análises efetuadas mediante a aplicação da metodologia descrita anteriormente.

4.1 ANÁLISE DA CONFIABILIDADE DO PROCESSAMENTO

Conforme descrito na seção 3.3.3, foram analisadas as incertezas obtidas em cada campanhas. A TABELA 5 apresenta os referidos valores.

TABELA 5 – ESTATÍSTICAS DA CONSISTÊNCIA DAS SOLUÇÕES FINAIS

Campanha	WRMS E (mm)	WRMS N (mm)	WRMS U (mm)
1	2,3	1,4	3,1
2	1,8	1,5	1,3
3	2,3	2,1	3,1
4	1,8	1,4	2,3
5	1,9	1,8	2,8
6	1,7	2,1	4,9
7	1,9	1,8	2,9
8	1,3	2,8	2,4
9	1,9	2,3	3,7
10	4,7	3,5	10,8
11	4,2	3,4	11,9

FONTE: O Autor (2022).

Nota-se que as campanhas realizadas nesse trabalho (campanhas 10 e 11) apresentam valores mais elevados que as anteriores, isso se deve ao fato da sub-rede geodésica adotada ser menor que das outras campanhas e muito dos pontos dessa sub-rede se encontram em locais próximos a árvores sendo afetado por alguns erros de multicaminho e salto de ciclos, por exemplo, aumentando os valores estatísticos desta campanha, este efeito pode ser observado também no teste da consistência das séries temporais (seção 4.2).

Entretanto, percebe-se que as repetibilidades obtidas para cada campanha estão dentro dos níveis estabelecidos para as sessões de posicionamento GPS ($\pm 2-4$ mm para coordenadas horizontais e $\pm 10-15$ mm para verticais). Portanto, o processo de estabilização pode ser considerado robusto e, conseqüentemente, todas as soluções individuais podem ser consideradas consistentes com a última solução SIRGAS (ou seja, solução SIR17P01).

4.2 TESTE DA CONSISTÊNCIA DAS SÉRIES TEMPORAIS

Conforme indicado na seção 3.3.3 deve-se avaliar os valores de WRMS visando verificar se há descontinuidades e perturbações nas séries temporais não advindas de *outliers*. As estatísticas obtidas para a iteração final realizada para cada campanha como parte do processo de estabilização estão indicadas na TABELA 6.

TABELA 6 - ESTATÍSTICAS DE ESTABILIZAÇÃO DO SISTEMA DE POSICIONAMENTO POR CAMPANHA

Campanha	Estações utilizadas	Pre RMS (mm)	Post RMS (mm)
1	9	27,10	1,66
2	9	49,00	1,30
3	9	35,90	1,69
4	9	21,70	1,24
5	9	33,40	1,59
6	8	53,60	1,65
7	8	18,80	1,76
8	7	43,40	1,93
9	7	34,10	1,91
10	8	47,00	4,45
11	8	52,60	4,38

FONTE: O Autor (2022).

Foi utilizado um mínimo de sete estações em todas as iterações. O nível esperado que garante a consistência do processo de estabilização para um ajuste local é de aproximadamente 1 a 5 mm (Amagua et al., 2022).

Através da TABELA 6, pode ser verificado que o “Post RMS” de cada uma das soluções se encontra dentro do intervalo esperado, indicando a confiabilidade do referencial de cada solução, permitindo assumir que as descontinuidades na série temporal e perturbações irregulares nos dados tratam-se de eventos físicos (por exemplo: processos de deslizamento, eventos sísmológicos ou rastejo).

4.3 ANÁLISE DAS SÉRIES TEMPORAIS

Como destaca Amagua et al. (2022) os pontos M004, M015 e M016 foram os que apresentaram os maiores deslocamentos, produzindo velocidades absolutas (ou seja, velocidades que correspondem estritamente ao ponto) de vários centímetros por ano em suas componentes. Desta forma, nesta análise enfatiza-se os pontos em questão visando observar com maior detalhe seu comportamento. Contudo, como foi

detectado um valor considerável de deslocamento no ponto M013, optou-se por incluí-lo nas análises.

A seguir, são apresentados os quadros com os valores de deslocamento normalizados (ou seja, valor da coordenada no referencial topográfico local menos a média das coordenadas da componente correspondente) bem como os gráficos das séries temporais dos pontos mencionados, indica-se ainda os valores de máximo, mínimo e a amplitude dos dados. Os quadros e os gráficos das séries temporais dos demais pontos podem ser visualizados em (APÊNDICE 1, APÊNDICE 2 e APÊNDICE 3).

QUADRO 2 - SÉRIE TEMPORAL PONTO M004

DATA	E(mm)	N(mm)	U(mm)	σE (mm)	σN (mm)	σU (mm)
08/06/2015	9,2396	-37,3856	-25,2316	5,3800	5,4000	78,5800
02/05/2016	7,4587	-29,5925	-24,1944	24,6500	7,8000	63,7400
22/09/2017	-16,6386	-29,8744	38,3595	4,2300	3,7100	22,2900
03/05/2019	3,3567	24,4632	4,3297	4,9000	4,4900	23,6600
02/09/2019	5,6624	20,4385	-8,9825	4,3300	3,8800	23,0000
08/07/2022	-9,0788	51,9507	15,7193	8,0100	7,0600	49,7600

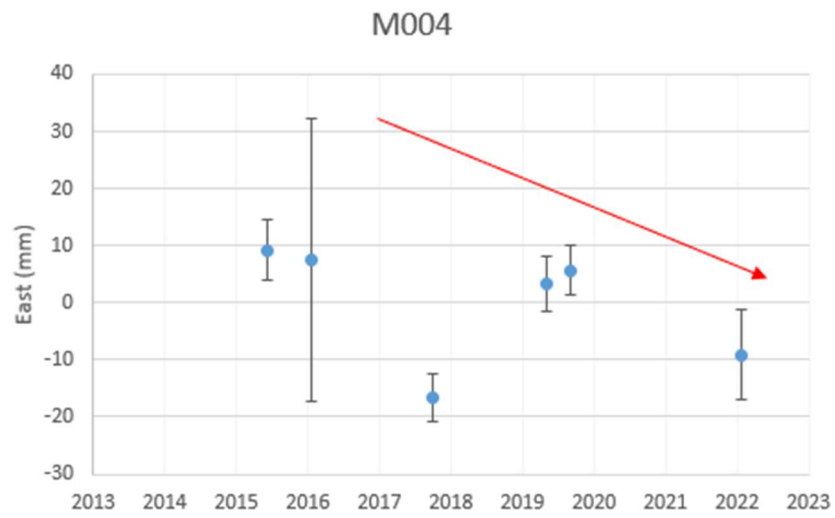
FONTE: O Autor (2022).

QUADRO 3 - ESTATÍSTICAS PONTO M004

ESTATÍSTICA	E(mm)	N(mm)	U(mm)
Máximo	9,2396	51,9507	38,3595
Mínimo	-16,6386	-37,3856	-25,2316
Amplitude	25,8781	89,3362	63,5911

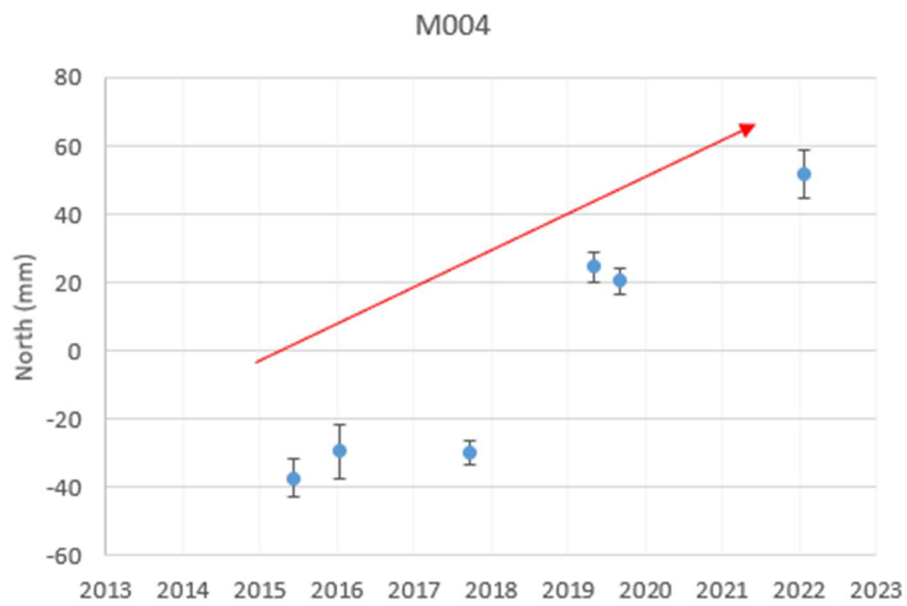
FONTE: O Autor (2022).

GRÁFICO 1 - EAST M004



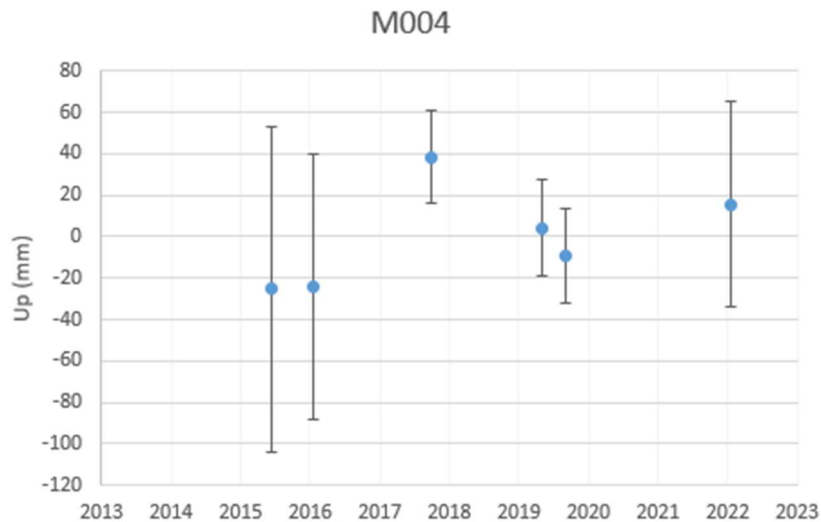
FONTE: O Autor (2022).

GRÁFICO 2 - NORTH M004



FONTE: O Autor (2022).

GRÁFICO 3 - UP M004



FONTE: O Autor (2022).

Analisando o GRÁFICO 1 e o GRÁFICO 2 é possível notar a tendência de deslocamento para NW do ponto m004, com uma predominância maior para N, com uma amplitude de 89,33 mm.

Na componente altimétrica U (GRÁFICO 3), observa-se uma ascendência do ponto, porém é possível identificar uma espécie de movimento senoidal, como uma função oscilatória. Esse fenômeno na componente altimétrica é encontrado também em outros pontos o que pode indicar que se trata de um movimento sazonal.

No QUADRO 4 são apresentados os valores de deslocamento normalizados para o ponto M013. Os valores de máximo, mínimo e amplitude para este ponto podem ser observados no QUADRO 5.

QUADRO 4 - SÉRIE TEMPORAL PONTO M013

DATA	E(mm)	N(mm)	U(mm)	σE (mm)	σN (mm)	σU (mm)
17/11/2014	29,8917	-10,9045	11,2826	4,3900	5,9800	26,5700
02/02/2015	50,6140	2,9375	6,0199	11,2200	11,1700	42,2700
14/04/2015	37,2898	-21,6459	-46,7863	7,3700	7,4200	41,5200
08/06/2015	30,6333	-29,1664	63,7804	6,0900	5,0700	25,4900
20/02/2017	12,5130	-3,8252	-6,8082	8,9200	7,5900	37,6100
03/05/2019	-30,4457	12,3819	7,2219	3,8000	3,4500	14,9800
02/09/2019	-41,1116	26,8294	4,0212	3,4800	3,6400	19,8000
08/07/2022	-89,3846	23,3933	-38,7314	9,7700	10,4100	60,6700

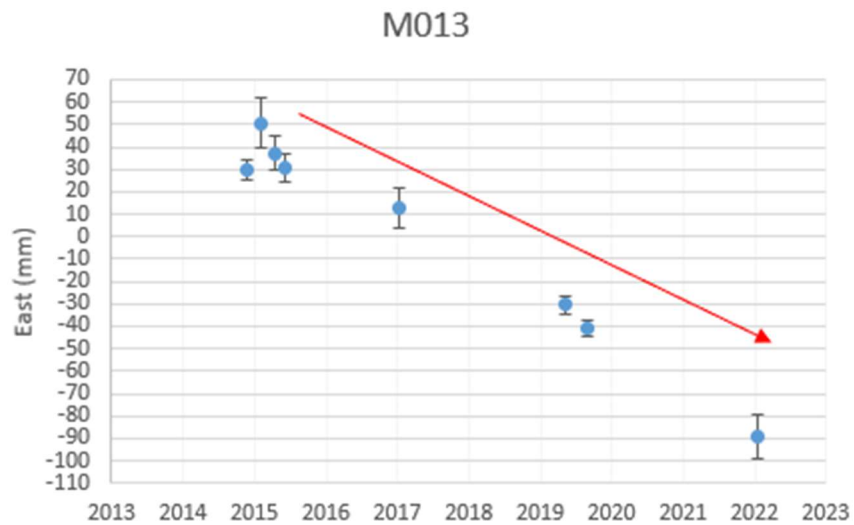
FONTE: O Autor (2022).

QUADRO 5 - ESTATÍSTICAS PONTO M013

ESTATÍSTICA	E(mm)	N(mm)	U(mm)
Máximo	50,6140	26,8294	63,7804
Mínimo	-89,3846	-29,1664	-46,7863
Amplitude	139,9986	55,9958	110,5667

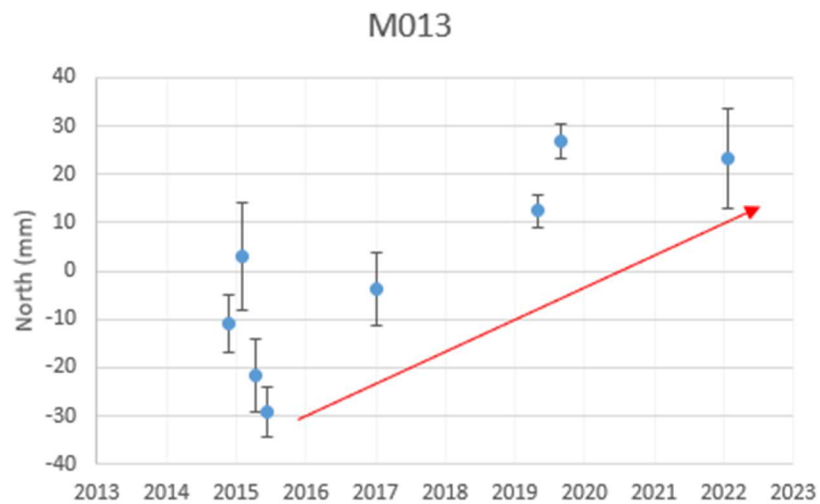
FONTE: O Autor (2022).

GRÁFICO 4 - EAST M013



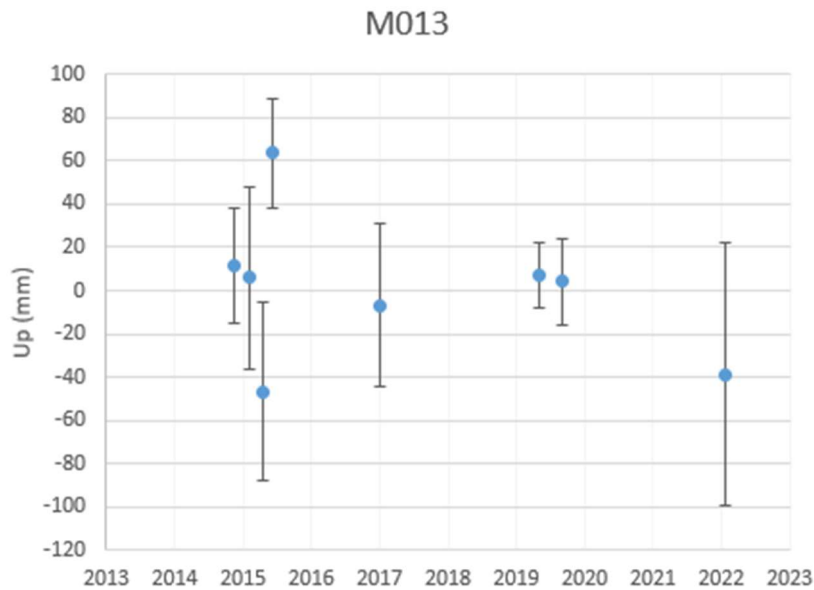
FONTE: O Autor (2022).

GRÁFICO 5 - NORTH M013



FONTE: O Autor (2022).

GRÁFICO 6 - UP M013



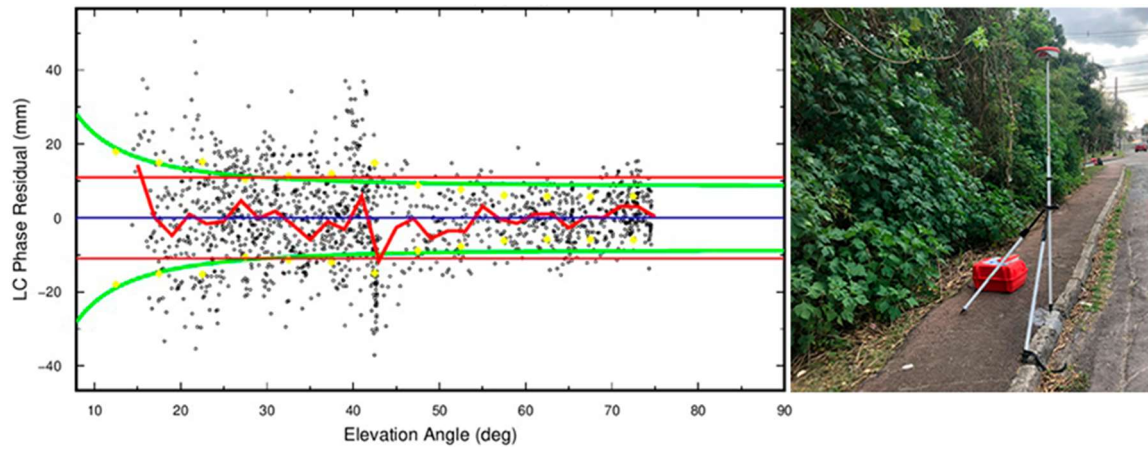
FONTE: O Autor (2022).

No GRÁFICO 4 é possível observar uma amplitude de aproximadamente 14 cm na componente E do ponto M013, em direção ao Rio Guabirota, com o valor máximo de 50,61 mm na campanha de fevereiro de 2015 e o mínimo de -89,39 mm na última campanha (QUADRO 4).

Na componente altimétrica vê-se uma tendência de subsidência do ponto. Apesar da amplitude de 110,57 mm (QUADRO 5) o mesmo movimento senoidal identificado no ponto M004 é aqui também verificado, o que indica que a altitude do ponto varia sazonalmente dentro de um determinado intervalo de aproximadamente 11 centímetros.

Entretanto, é possível observar um erro de aproximadamente 6 centímetros na determinação da coordenada altimétrica do ponto M013. Analisando a média dos resíduos obtidos com a solução LC (livre de Ionosfera) do ponto M013 (GRÁFICO 7), é possível verificar que as observações, principalmente abaixo de 45° de elevação, apresentaram resíduos elevados. Esses resíduos se devem muito a presença densa de vegetação a oeste do ponto M013 resultando em quebras de continuidades do sinal e efeitos de multicaminho em consequência das reflexões da superfície próxima, resultando na menor precisão da determinação da coordenada desse ponto.

GRÁFICO 7 - MÉDIA DOS RESÍDUOS PONTO M013



FONTE: O Autor (2022).

Os valores de deslocamento normalizados para o ponto M015 podem ser visualizados no QUADRO 6 e os valores de máximo, mínimo e amplitude no QUADRO 7.

QUADRO 6 - SÉRIE TEMPORAL PONTO M015

DATA	E(mm)	N(mm)	U(mm)	σ E(mm)	σ N(mm)	σ U(mm)
17/11/2014	42,1546	-24,4838	-68,1646	8,7800	7,7700	42,4300
02/02/2015	-13,4944	-0,6917	106,1065	10,2800	11,2400	61,8700
08/06/2015	4,2882	-28,2336	11,4103	6,2600	6,3700	40,8200
03/05/2019	-0,2827	11,3891	-52,0059	5,1400	5,1000	21,4300
02/09/2019	-5,4937	17,6837	-56,1619	6,0900	6,0800	36,9500
08/07/2022	-27,1720	24,3364	58,8156	13,1200	14,2300	15,6990

FONTE: O Autor (2022).

QUADRO 7 - ESTATÍSTICAS PONTO M015

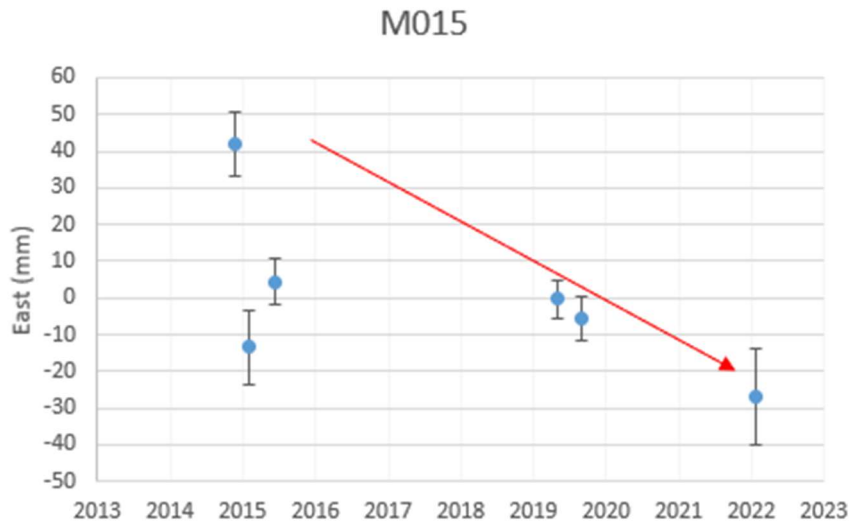
ESTATÍSTICA	E(mm)	N(mm)	U(mm)
Máximo	42,1546	24,3364	106,1065
Mínimo	-27,1720	-28,2336	-68,1646
Amplitude	69,3266	52,5701	174,2711

FONTE: O Autor (2022).

Os vetores de tendência do movimento em relação a *East*, *North* e *Up* podem ser observados nos gráficos 8, 9 e 10, respectivamente. Mediante uma análise do GRÁFICO 8 e do GRÁFICO 9 conclui-se que há um deslocamento do ponto M015 para noroeste. No QUADRO 7 pode-se observar uma amplitude de aproximadamente

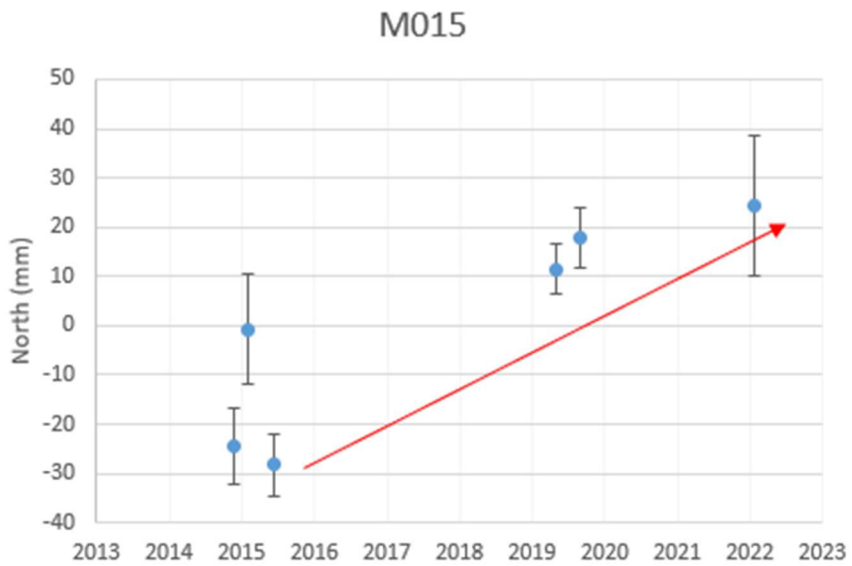
7 centímetros na componente E, com o valor máximo na primeira campanha (ano 2014) e o valor mínimo (ano 2022).

GRÁFICO 8 - EAST M015



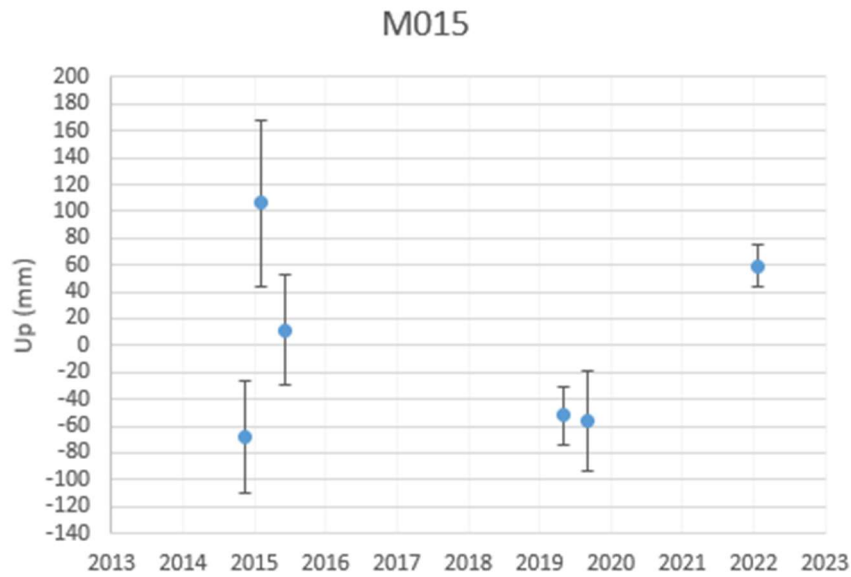
FONTE: O Autor (2022).

GRÁFICO 9 - NORTH M01



FONTE: O Autor (2022).

GRÁFICO 10 - UP M015



FONTE: O Autor (2022).

A amplitude para a componente altimétrica foi de 174,27 milímetros sendo o valor máximo identificado na campanha de fevereiro de 2015 e o mínimo em novembro de 2014. Num intervalo inferior a 3 meses a cota altimétrica do ponto elevou-se aproximadamente 17 centímetros, mas se manteve oscilando dentro desse intervalo nas demais campanhas.

Os quadros 8 e 9 apresentam os resultados para o ponto M016, indicam, respectivamente, os valores para a série temporal ao longo das campanhas e os valores de máximo, mínimo e a amplitude.

QUADRO 8 - SÉRIE TEMPORAL PONTO M016

ANO	E(mm)	N(mm)	U(mm)	σE (mm)	σN (mm)	σU (mm)
17/11/2014	30,2422	-16,8282	35,4419	5,3600	5,0300	27,4400
02/02/2015	41,1352	-8,5967	96,0547	12,3800	10,1700	40,3500
14/04/2015	29,4852	6,3895	27,3762	7,7200	7,8200	41,8300
08/06/2015	35,4488	-26,6602	-1,7855	8,6500	7,1400	29,3400
02/05/2016	10,4244	-22,6308	-8,3954	4,4600	4,3600	25,1000
22/09/2017	-9,8213	0,5679	9,9656	3,5100	3,3800	18,0200
03/05/2019	-36,8039	10,4497	-33,6612	3,0500	3,0700	12,5800
02/09/2019	-26,7655	12,6850	-52,9692	3,1300	3,2000	17,4100
01/07/2022	-73,3451	44,6237	-72,0271	5,5900	5,7800	28,1700

FONTE: O Autor (2022).

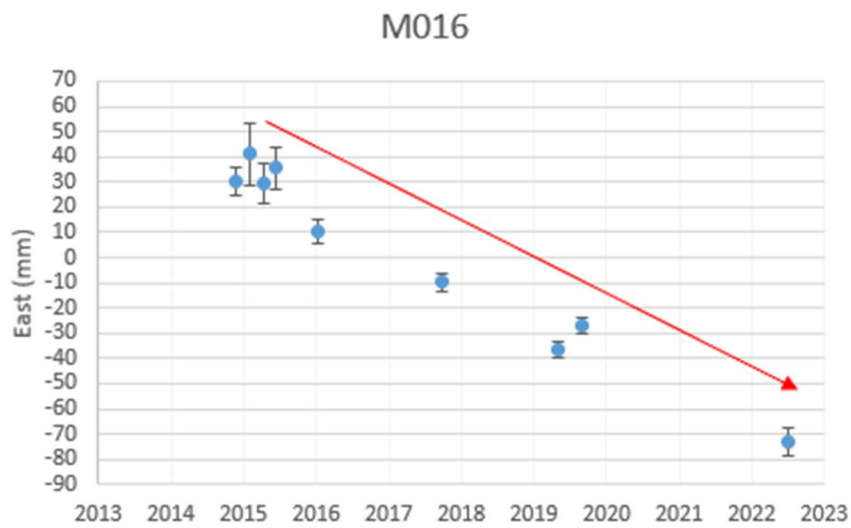
QUADRO 9 - ESTATÍSTICAS PONTO M016

ESTATÍSTICA	E(mm)	N(mm)	U(mm)
Máximo	41,1352	44,6237	96,0547
Mínimo	-73,3451	-26,6602	-72,0271
Amplitude	114,4803	71,2839	168,0818

FONTE: O Autor (2022).

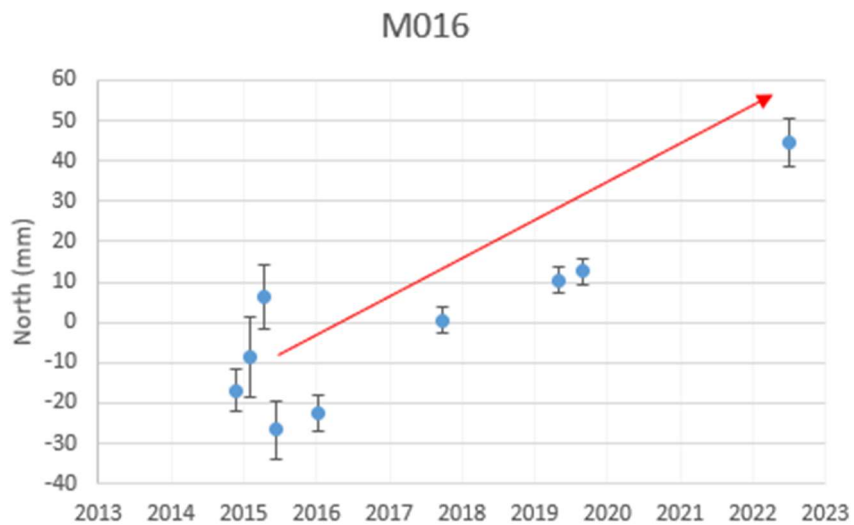
Os gráficos 11, 12 e 13 se referem aos vetores de tendência do movimento em relação a *East*, *North* e *Up* para este ponto (M016), respectivamente.

GRÁFICO 11 - EAST M016



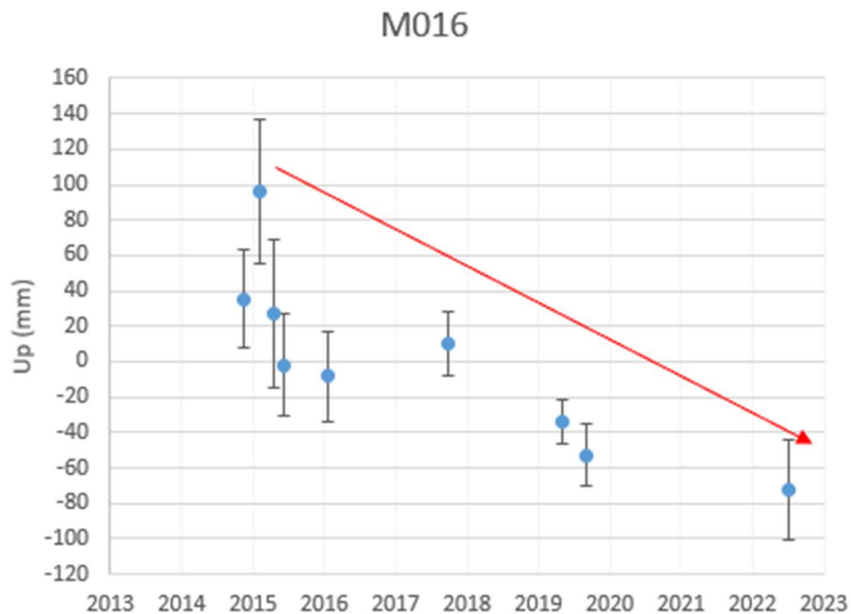
FONTE: O Autor (2022).

GRÁFICO 12 - NORTH M016



FONTE: O Autor (2022).

GRÁFICO 13 - UP M016



FONTE: O Autor (2022).

Verifica-se a tendência de deslocamento deste ponto para noroeste, principalmente a partir da campanha de 2016, com uma amplitude de aproximadamente 11,5 centímetros na componente E, e 7,1 centímetros na componente N.

O ponto M016 apresenta uma subsidência mais acentuada, principalmente a partir da campanha de 2018, onde o movimento senoidal característico é inobservado. Considerando todas as campanhas realizadas e aqui apresentadas, o ponto M016 variou mais de 16 centímetros na componente U.

4.4 ANÁLISE DE DESLOCAMENTOS DOS PONTOS

As velocidades absolutas, em cada uma das componentes, estimadas de deslocamento dos pontos podem ser observadas na TABELA 7. Destaca-se que por se tratarem de velocidades absolutas elas representam somente o comportamento do ponto observado, não de toda a área de estudo.

As maiores velocidades observadas na componente E foram no ponto M013 e M018 com magnitude de 17,86 e 16,18 mm/a, respectivamente. Na componente N

as maiores velocidades foram detectadas nos pontos M004 (14,33 mm/a) e M005 (13,28 mm/a). Na componente altimétrica o ponto M016 foi o que apresentou uma velocidade com magnitude de aproximadamente 16 mm/a, velocidade 3 vezes maior que a observada no ponto M004, tendo esse ponto apresentado a segunda maior velocidade nessa componente (TABELA 7).

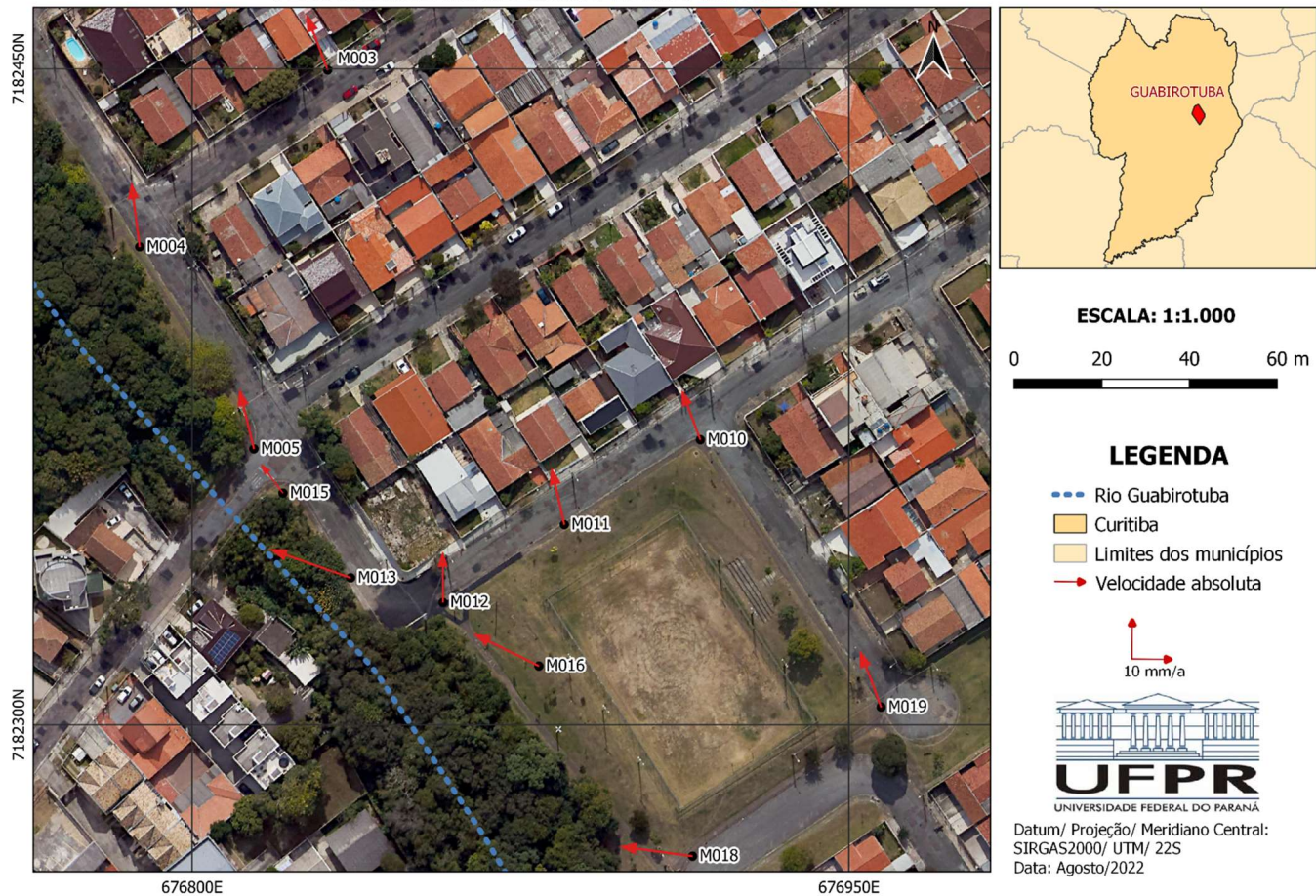
TABELA 7 - VELOCIDADE ABSOLUTA DOS PONTOS

PONTO	East		North		Up	
	Velocidade (mm/a)	Sigma (mm/a)	Velocidade (mm/a)	Sigma (mm/a)	Velocidade (mm/a)	Sigma (mm/a)
M003	-4,67	0,57	12,28	0,92	-0,71	0,004
M004	-1,85	0,19	14,33	0,92	5,1	0,26
M005	-3,25	0,19	13,28	0,94	2,24	0,04
M010	-4,15	0,63	11,03	0,94	-0,18	0,005
M011	-2,86	0,54	12,6	0,98	-0,08	0,001
M012	-0,07	0,001	11,21	0,86	-3,55	0,3
M013	-17,86	0,98	6,3	0,7	-4,4	0,12
M015	-4,91	0,4	6,48	0,78	-1,11	0,002
M016	-14,54	0,97	7,19	0,76	-15,9	0,7
M018	-16,18	0,58	2,12	0,016	3,01	0,19
M019	-4,7	0,69	12,74	0,98	-1,46	0,07

FONTE: O Autor (2022)

Nota-se que todos os pontos estão se deslocando em NW, o que fica mais evidente com a análise da FIGURA 16 que indica os vetores de velocidades horizontais (em vermelho) obtidos para cada ponto.

FIGURA 16 - VELOCIDADE HORIZONTAL DOS PONTOS
VELOCIDADE HORIZONTAL DOS PONTOS



FONTE: O Autor (2022).

Os pontos variam gradativamente entre 8 e 19 mm/a, à medida que se deslocam para NW. O ponto que apresentou o maior vetor resultante de velocidade foi o ponto M013 (18,94 mm/a) no sentido NW, em direção ao Rio Guabirota. Já a menor velocidade é observada no local M015 (8,13 mm/a). O sítio M012 foi o único que apresentou um comportamento diferente dos demais com um deslocamento direcionado a norte.

Apesar de se tratar de velocidades absolutas, é possível notar que pela distribuição dos pontos na área e o comportamento comum de deslocamento na direção NW, pode-se concluir que a região como um todo tende a se deslocar nesse sentido.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante das análises realizadas, foi possível identificar deslocamentos locais de superfície com o monitoramento através do uso de medições repetidas de GPS com sessões de curta duração, entre 1 a 4 horas.

Quanto à análise das séries temporais e deslocamentos dos pontos, notou-se que os resultados obtidos são satisfatórios, entretanto na determinação das altitudes elipsoidais houveram pontos com uma imprecisão de até 6 centímetros (M013), embora em alguns locais tenham sido observadas precisões próximas a 1 centímetro (M005 e M015).

Em relação aos dados planimétricos, a precisão da maioria dos pontos se encontra na casa do milímetro e o posicionamento GPS ajudou a indicar, com uma pequena margem de erro, a dimensão e o sentido de deslocamento dos pontos.

Por fim, pela dimensão dos deslocamentos encontrados e os indícios observados em campo, pode-se classificar o movimento de massa local como rastejo, no entanto, é necessário obter maiores informações e/ou dados para obter uma conclusão precisa e detalhada do tipo de movimento. A velocidade do movimento pode ser definida como muito lenta, considerando que o ponto M013, que apresentou o maior deslocamento, representa apenas 18,94 mm/a.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Na sequência deste trabalho surgiram alguns aspectos que se mostram interessantes para uma abordagem mais detalhada. Em seguida, são indicados aqueles que poderão vir a ser alvos de futura investigação:

- Avaliar e identificar os motivos que levam a instabilidade do solo local empregando estudos mais aprofundados na região através de conhecimentos de outras áreas da Geociência;
- Dar continuidade às campanhas de rastreamento GPS juntamente com a aplicação de outras técnicas topográficas, geodésicas e de sensoriamento remoto;
- Empregar o mesmo equipamento para o posicionamento de cada ponto;

- Como os movimentos detectados aparentam ser sazonais, recomenda-se que em trabalhos futuros os levantamentos sejam realizados nos mesmos períodos do ano.

REFERÊNCIAS

- ACRE SURVEYING SOLUTIONS. **GPS Referência Leica GX1230**. Disponível em: <<https://grupoacre.com.pt/catalogo-productos/gps-referencia-gx1230-2/>>. Acesso em: 31 jul. 2022.
- ALTAMIMI, Zuheir; MÉTIVIER, Laurent; COLLILIEUX, Xavier. ITRF2008 plate motion model. **Journal of geophysical research: solid earth**, v. 117, n. B7, 2012.
- ALTAMIMI, Zuheir et al. ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions. **Journal of geophysical research: solid earth**, v. 121, n. 8, p. 6109-6131, 2016.
- ALVES, Daniele Barroca Marra; DE ABREU, Pedro Augusto Giraldez; SOUZA, Jéssica Saldanha. GNSS: status, modelagem atmosférica e métodos de posicionamento. **Revista Brasileira de Geomática**, v. 1, n. 1, p. 2-7, 2013.
- AMAGUA, Christian Gonzalo Pilapanta *et al.* **Analysis of local surface displacement using repeated GPS measurements: a case study of the Guabirota area, Curitiba, Brazil**. 2022
- AMAGUA, Christian Gonzalo Pilapanta *et al.* **ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN DE SEÑALES DE RUIDO EN SERIES TEMPORALES GPS Y SU INFLUENCIA EN LA DETERMINACIÓN DE VELOCIDADES**. Brasil, 2019. Slide. Disponível em: https://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol24/26_Pilapanta_et_al_2019_Noise_GPS_signals.pdf. Acesso em: 22 ago. 2022.
- AMAGUA, C.G. P. **Avaliação do impacto do efeito de carga por pressão atmosférica em posicionamento GPS de alta precisão nas regiões do equador continental e da Amazônia brasileira**. Dissertação de mestrado. UFPR, 2018.
- AMARAL, R. do; GUTJAHR, M. R. **Desastres Naturais**. São Paulo: IG/SMA, 2011.
- AUGUSTO FILHO, O. 1992. Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica. In: **Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas**, 1, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: ABMS/ABGE/PUCRJ, 1992, v.2, p.721-733
- AVOUAC, Jean-Philippe; TAPPONNIER, Paul. Kinematic model of active deformation in central Asia. **Geophysical Research Letters**, v. 20, n. 10, p. 895-898, 1993.
- BALDOVINO, Jair A. et al. Effects of lime addition on geotechnical properties of sedimentary soil in Curitiba, Brazil. **Journal of rock mechanics and geotechnical engineering**, v. 10, n. 1, p. 188-194, 2018.
- BETTINELLI, Pierre et al. Plate motion of India and interseismic strain in the Nepal Himalaya from GPS and DORIS measurements. **Journal of Geodesy**, v. 80, n. 8, p. 567-589, 2006.

BIAN, He-fang et al. Monitoring large-area mining subsidence by GNSS based on IGS stations. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, v. 24, n. 2, p. 514-519, 2014.

BILHAM, Roger; LARSON, Kristine; FREYMUELLER, Jeffrey. GPS measurements of present-day convergence across the Nepal Himalaya. **Nature**, v. 386, n. 6620, p. 61-64, 1997.

BISPO, Polyanna Da Conceicao et al. Análise da suscetibilidade aos movimentos de massa em São Sebastião-SP com o uso de métodos de inferência especial. **Revista Geociências**, v. 30, n. 3, p. 467-478, 2011.

BLEWITT, Geoffrey; LAVALLÉE, David. Effect of annual signals on geodetic velocity. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 107, n. B7, p. ETG 9-1-ETG 9-11, 2002.

BRUNNER, F. K., HARTINGER, H, RICHTER, B., Continuous Monitoring of Landslides using GPS: A progress report; Geophysical Aspects of Mass Movements, Austrian Academy of Sciences, Vienna; pp 75-87, 2000.

CERRI, LE da S. Riscos geológicos urbanos. **Ciências da Terra e Meio Ambiente: Diálogo para (inter) ações no Planeta. São Leopoldo: Ed. UNISINOS**, p. 49-73, 1999.

CARVALHO, Alessandro Salles; POZ, William Rodrigo Dal; LAROCCA, Ana Paula Camargo. Compatibilização de referenciais de coordenadas e velocidades com estimativa de precisão. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 21, p. 590-609, 2015.

CHORLEY, R. **Geomorphology**. London: Methuen & CO. Ltd., 1984.

CINA, Alberto; PIRAS, Marco. Performance of low-cost GNSS receiver for landslides monitoring: test and results. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, v. 6, n. 5-7, p. 497-514, 2015.

CORREIA, ANTÔNIO HENRIQUE; MARTINS, RONALD ALEXANDRE. Fundamentos de Cartografia e GPS. **Universidade de Brasília. Instituto de Geociências. Curso de Especialização em Geoprocessamento**, 2008.

CUNHA, M.A. (Org.). OCUPAÇÃO DE ENCOSTAS. **São Paulo. Instituto de Pesquisas Tecnológicas**. 1991.

DA SILVA, Welvis Furtado et al. AVALIAÇÃO DA ÁREA DE RISCO HABITADA E INDICAÇÃO DE SOLUÇÕES PARA OS DISTRITOS DE SHANGRILLÁ E VILA FORMOSA EM ANÁPOLIS, 2016.

DE PAULO RAMOS, Marcony; DAL POZ, William Rodrigo; CARVALHO, Alessandro Salles. Propagação de Incertezas no Processo de Compatibilização de Referenciais e Época de Coordenadas GNSS. **Rev. Bras. Cartogr**, v. 74, n. 2, 2022.

GHILANI, C. D., WOLF, P.R. **Elementary surveying: an introduction to geomatics. 13th ed.** New Jersey: Pearson, 2012.

HIPER SR: Avançado, ultracompacto e produtivo. Disponível em: <https://www.topconpositioning.com/br/gnss-and-network-solutions/integrated-gnss-receivers/hiper-sr>. Acesso em: 14 ago. 2022.

JIANG, Zaisen et al. GPS constrained coseismic source and slip distribution of the 2013 Mw6.6 Lushan, China, earthquake, and its tectonic implications. **Geophysical Research Letters**, v. 41, n. 2, p. 407-413, 2014.

HE, PengChao et al. Rheological structure of lithosphere in northern Tibet inferred from postseismic deformation modeling of the 2001 M W 7.8 Kokoxili earthquake. **Chinese Journal of Geophysics**, v. 61, n. 2, p. 531-544, 2018.

HERRING, T. A. et al. Introduction to gamit/globk. **Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts**, 2010.

HERRING, T.A. KING, R.W. FLOYD, M.A. and MCCLUSKY, S.C. GAMIT. Reference Manual. **Massachusetts Institute of Technology**, 2018.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Recomendações para Levantamentos Relativos Estáticos – GPS**. 2008.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Manual do Usuário - versão Maio de 2020 (IBGE-PPP). 2020. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101677.pdf>. Acesso em: 06 de jul. 2022.

INTERNATIONAL GNSS SERVICE (IGS). **ITRF2020 is available online**. 2022. Disponível em: <https://lists.igs.org/pipermail/igsmail/2022/008187.html>. Acesso em: 06 de jul. 2022.

LEICA GEOSYSTEMS AG - PART OF [HEXAGON](https://www.hexagon.com). **Antena GNSS compacta Leica AS10**. Disponível em: <<https://leica-geosystems.com/pt-br/products/gnss-reference-networks/antennas/leica-as10>>. Acesso em: 31 jul. 2022.

LEICK, A. **GPS Satellite Surveying. 3. ed.** Hoboken; New Jersey: John Wiley eSons, 2004.

LI, Yu. Analysis of GAMIT/GLOBK in high-precision GNSS data processing for crustal deformation. **Earthquake Research Advances**, v. 1, n. 3, p. 100028, 2021.

MACHADO, Denise Alessandra Monteiro et al. Proveniência de sedimentos da Bacia de Curitiba por estudos de minerais pesados. **Brazilian Journal of Geology**, v. 42, n. 3, p. 563-572, 2012.

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

NADAL, C. **TRANSFORMAÇÃO DE COORDENADAS GEODÉSICAS EM TOPOGRÁFICAS E VICE-VERSA.** - Sistemas de Referência e Tempo em Geodésia. Notas de Aula.

NATIONAL GEODETIC SURVEY. **Transitioning from IGS14 to IGB14.** 2020.

Disponível em:

https://geodesy.noaa.gov/CORS/news/igb14/transitioning_to_igb14.shtml. Acesso em: 06 de jul. 2022.

PETIT, G.; LUZUM, B. IERS Conventions (2010). IERS Technical Note; No. 36. **Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie,** 2010.

PRECISION GEOSYSTEMS. **Leica ATX900 GNSS SmartAntenna paired with WinCE GPS900 Data Controller.** Disponível em: <<https://www.precision-geosystems.com/product/leica-atx900-gnss-smartantenna-paired-with-wince-gps900-data-controller/?v=f24485ae434a>>. Acesso em: 31 jul. 2022.

RAY, R. D., and R. M. PONTE, 2003, "Barometric tides from ECMWF operational analyses," *Ann. Geophys.*, 21(8), pp. 1897–1910, doi:10.5194/angeo-21-1897-2003.

RECKZIEGEL, Elisabete Weber. Identificação e mapeamento das áreas com perigo de movimento de massa no município de Porto Alegre, RS. 2012.

RYDER, Isabelle; BÜRGMANN, Roland; POLLITZ, Fred. Lower crustal relaxation beneath the Tibetan Plateau and Qaidam Basin following the 2001 Kokoxili earthquake. **Geophysical Journal International**, v. 187, n. 2, p. 613-630, 2011.

SÁNCHEZ, L. DREWES, H. BRUNINI, C. MACKERN, M. V. and MARTÍNEZ-DÍAZ, W. 2015. **SIRGAS Core Network Stability.** In: *Chemistry of Heterocyclic Compounds*. pp.183–191. DOI:10.1007/1345_2015_143.

SCHMID, R., STEIGENBERGER, P., GENDT, G., Ge, M., and ROTHACHER, M., 2007, "**Generation of a consistent absolute phase center correction model for GPS receiver and satellite antennas**" *J. Geod.*, 81(12), pp. 781–798, doi:10.1007/s00190-007-0148-y

SCHMITT, G., NUCKELT, A., KNÖPFLER, A., MARCU, C. Three Dimensional Plate Kinematics in Romania. International Symposium on Strong Vrancea Earthquakes and Risk Mitigation Oct. 4-6, 2007, Bucharest, Romania.

SIMÕES, D.P. ALBARICI, F.L. BORGES, P. A. F. Análise comparativa das coordenadas no sistema geodésico local e no sistema topográfico local. **Revista Brasileira de Geomática.** Curitiba, 2017.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy: foundations, methods, and applications.** Berlin: de Gruyter, 1993.

SEEBER, G., **Satellite Geodesy: Foundations, Methods, and Applications.** Berlin:Walter de Gruyter, 2003.

TANAJURA, Elmo Leonardo Xavier et al. Rede geodésica para monitoramento de processos de subsidência na planície deltaica do rio são francisco. **Geosciences= Geociências**, v. 39, n. 1, p. 77-89, 2020.

TEIXEIRA, NIEL NASCIMENTO; FERREIRA, LUIZ DANILO DAMASCENO. Estabelecimento de Redes Geodésicas Locais de Alta Precisão para o Monitoramento de Deformações da Crosta: Estudo de Caso de uma Barragem de Usina Hidrelétrica. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 11, n. 1, p. 53-70, 2005.

TOMINAGA, L. K., SANTORO, J., AMARAL, R. (ORGS). Desastres naturais: conhecer para prevenir. São Paulo: Instituto Geológico, 2009.

UNAVCO Geodetic Data Services Plan for GNSS Modernization: Data Formats and Preprocessing Tools, 2016. Disponível em:<
https://www.unavco.org/community/publications_and_reports/archived-docs/papers/GDS%20Plans%20for%20GNSS%20Modernization.pdf >. Acesso em: 20 jun. 2022.

VAN DAM, Tonie et al. Crustal displacements due to continental water loading. **Geophysical Research Letters**, v. 28, n. 4, p. 651-654, 2001.

VARNES, David J. Slope movement types and processes. **Special report**, v. 176, p. 11-33, 1978.

WANG, Min; SHEN, Zheng-Kang. Present-day crustal deformation of continental China derived from GPS and its tectonic implications. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 125, n. 2, p. e2019JB018774, 2020.

WERLICH, Renata Magda Cavalcante. Análise das alternativas de processamentos GPS para detecção de deslocamentos verticais de terra em áreas urbanizadas. 2017.

ZANUTTA, ANTONIO et al. Monitoring geodynamic activity in the Victoria Land, East Antarctica: Evidence from GNSS measurements. **Journal of Geodynamics**, v. 110, p. 31-42, 2017.

ZHANG, Guo-Min et al. Boundaries between active-tectonic blocks and strong earthquakes in China mainland. **Chinese Journal of Geophysics**, v. 48, n. 3, p. 662-671, 2005.

ZUQUETTE, Lázaro V. et al. Considerações básicas sobre a elaboração de cartas de zoneamentos de probabilidade ou possibilidade de ocorrer eventos perigosos e de riscos associados. **Geociências**, v. 14, n. 2, p. 9-39, 1995.

APÊNDICE 1 – SÉRIES TEMPORAIS

M003						
ANO	E(mm)	N(mm)	U(mm)	σE(mm)	σN(mm)	σU(mm)
2014	9,1086	-25,5404	-20,6871	6,64	6,52	35,39
2015	32,0263	-37,8759	65,5852	11,28	12,5	45,88
2016	-6,5870	-33,2160	-27,6877	7,02	6,71	52,07
2017	-7,0944	9,8448	-26,4375	6,2	6,55	40,06
2019	-2,2767	19,0983	-2,3079	4,92	4,77	22,36
2019	-4,7737	10,4934	3,9976	4,68	5,17	28,3
2022	-20,4032	57,1958	7,5374	8,33	8,68	50,24

M004						
ANO	E(mm)	N(mm)	U(mm)	σE(mm)	σN(mm)	σU(mm)
2015	9,2396	-37,3856	-25,2316	5,3800	5,4000	78,5800
2016	7,4587	-29,5925	-24,1944	24,6500	7,8000	63,7400
2017	-16,6386	-29,8744	38,3595	4,2300	3,7100	22,2900
2019	3,3567	24,4632	4,3297	4,9000	4,4900	23,6600
2019	5,6624	20,4385	-8,9825	4,3300	3,8800	23,0000
2022	-9,0788	51,9507	15,7193	8,0100	7,0600	49,7600

M005						
ANO	E(mm)	N(mm)	U(mm)	σE(mm)	σN(mm)	σU(mm)
2015	34,2182	-36,1648	-38,6539	10,2500	10,5000	50,8100
2015	-0,5945	-39,9016	-10,7998	6,3100	5,9600	30,5100
2017	-27,3642	1,7426	57,8530	16,2200	12,5800	40,9400
2017	6,0854	-13,9982	-1,9461	5,0800	4,9600	26,0100
2019	-2,8348	9,9208	-6,3530	4,9800	4,8000	22,5700
2019	2,3394	20,1972	-3,5436	5,8800	5,5600	32,9800
2022	-11,8494	58,2039	3,4435	12,9100	10,4200	10,1780

M010						
ANO	E(mm)	N(mm)	U(mm)	σE(mm)	σN(mm)	σU(mm)
2014	1,2676	-27,1154	8,8647	5,3200	4,5700	35,5100
2015	23,5588	-30,7823	-9,5339	13,8400	12,4600	50,1500
2015	12,1095	-24,6325	-1,7370	5,5800	5,3400	23,0000
2017	-6,5521	2,4626	10,1540	6,7900	6,3100	25,8600
2017	5,7651	-8,8761	-3,0730	3,1500	3,2500	16,0700
2019	-1,8992	6,0989	1,1370	2,9500	2,8900	11,9200
2019	-16,9481	23,7515	-7,1020	2,9400	3,1500	16,0000
2022	-17,3018	59,0933	1,2901	5,2000	6,1300	25,2300

M011						
ANO	E(mm)	N(mm)	U(mm)	σE(mm)	σN(mm)	σU(mm)
2014	7,1432	-32,1391	4,5489	9,6400	8,2500	44,9100
2015	-5,1635	-27,9258	11,7913	8,9200	6,2000	29,6300
2015	4,7510	-32,1208	-5,6693	4,2700	4,5800	24,5300
2016	10,8306	-17,9491	-12,0538	4,7300	5,4900	30,9500
2017	11,6458	-3,8180	5,3619	2,7000	2,7800	13,7900
2019	-3,4670	26,7527	0,5024	2,6400	2,6300	10,3200
2019	-6,6910	27,5046	-8,8266	2,7700	3,0000	15,4100
2022	-19,0490	59,6955	4,3451	4,7000	5,0500	22,0200

M012						
ANO	E(mm)	N(mm)	U(mm)	σE(mm)	σN(mm)	σU(mm)
2014	5,3141	-24,1303	0,4421	7,4400	6,6100	50,2800
2015	51,0979	-24,7546	26,2727	7,7500	7,2900	37,0700
2016	-69,9333	-28,3125	-19,6428	8,0000	6,0900	33,6300
2017	8,3017	20,7436	12,8945	8,2900	7,8200	36,7400
2022	5,2195	56,4539	-19,9665	7,1500	9,0500	37,8100

M013						
ANO	E(mm)	N(mm)	U(mm)	σE(mm)	σN(mm)	σU(mm)
2014	29,8917	-10,9045	11,2826	4,3900	5,9800	26,5700
2015	50,6140	2,9375	6,0199	11,2200	11,1700	42,2700
2015	37,2898	-21,6459	-46,7863	7,3700	7,4200	41,5200
2015	30,6333	-29,1664	63,7804	6,0900	5,0700	25,4900
2017	12,5130	-3,8252	-6,8082	8,9200	7,5900	37,6100
2019	-30,4457	12,3819	7,2219	3,8000	3,4500	14,9800
2019	-41,1116	26,8294	4,0212	3,4800	3,6400	19,8000
2022	-89,3846	23,3933	-38,7314	9,7700	10,4100	60,6700

M015						
ANO	E(mm)	N(mm)	U(mm)	σE(mm)	σN(mm)	σU(mm)
2014	42,1546	-24,4838	-68,1646	8,7800	7,7700	42,4300
2015	-13,4944	-0,6917	106,1065	10,2800	11,2400	61,8700
2015	4,2882	-28,2336	11,4103	6,2600	6,3700	40,8200
2019	-0,2827	11,3891	-52,0059	5,1400	5,1000	21,4300
2019	-5,4937	17,6837	-56,1619	6,0900	6,0800	36,9500
2022	-27,1720	24,3364	58,8156	13,1200	14,2300	15,6990

M016						
ANO	E(mm)	N(mm)	U(mm)	σE(mm)	σN(mm)	σU(mm)
2014	30,2422	-16,8282	35,4419	5,3600	5,0300	27,4400
2015	41,1352	-8,5967	96,0547	12,3800	10,1700	40,3500
2015	29,4852	6,3895	27,3762	7,7200	7,8200	41,8300
2015	35,4488	-26,6602	-1,7855	8,6500	7,1400	29,3400
2016	10,4244	-22,6308	-8,3954	4,4600	4,3600	25,1000
2017	-9,8213	0,5679	9,9656	3,5100	3,3800	18,0200
2019	-36,8039	10,4497	-33,6612	3,0500	3,0700	12,5800
2019	-26,7655	12,6850	-52,9692	3,1300	3,2000	17,4100
2022	-73,3451	44,6237	-72,0271	5,5900	5,7800	28,1700

M018						
ANO	E(mm)	N(mm)	U(mm)	σE(mm)	σN(mm)	σU(mm)
2014	51,4901	17,9907	-15,7853	7,2300	6,1000	27,3400
2015	29,4000	-26,6321	12,4087	10,3800	11,0300	66,6200
2015	36,9817	56,2098	-13,5624	7,1700	8,2500	40,8000
2015	50,8995	23,1627	-7,1579	5,5700	5,7600	35,8300
2016	-47,9231	-53,9808	-14,9451	5,7800	5,5900	33,0600
2017	-49,5040	-46,4558	27,7640	6,7300	6,2700	43,4400
2022	-71,3441	29,7055	11,2781	6,6400	7,3300	38,4800

M019						
ANO	E(mm)	N(mm)	U(mm)	σE(mm)	σN(mm)	σU(mm)
2014	-1,0169	-35,3196	21,6369	6,3500	5,5500	41,8100
2015	21,9896	-37,1976	-21,1463	6,8500	8,3500	27,3300
2015	14,4616	-22,4583	12,7565	6,3200	6,5500	30,4900
2016	-2,7559	-14,8665	-13,9796	7,3100	5,6600	30,1200
2017	11,3892	-3,0576	14,6072	7,3500	7,4500	39,7700
2019	-8,6350	18,6831	-2,5371	3,3400	3,2900	13,2800
2019	-10,0218	33,2428	-3,1764	3,9400	4,4300	22,6100
2022	-25,4108	60,9737	-8,1613	6,0800	7,0100	28,6700

APÊNDICE 2 – ESTATÍSTICAS DAS SÉRIES TEMPORAIS

M003			
ESTATÍSTICA	E(mm)	N(mm)	U(mm)
MÁXIMO	32,0263	57,1958	65,5852
MÍNIMO	-20,4032	-37,8759	-27,6877
AMPLITUDE	52,4294	95,0717	93,2730

M004			
ESTATÍSTICA	E(mm)	N(mm)	U(mm)
MÁXIMO	9,2396	51,9507	38,3595
MÍNIMO	-16,6386	-37,3856	-25,2316
AMPLITUDE	25,8781	89,3362	63,5911

M005			
ESTATÍSTICA	E(mm)	N(mm)	U(mm)
MÁXIMO	34,2182	58,2039	57,8530
MÍNIMO	-27,3642	-39,9016	-38,6539
AMPLITUDE	61,5824	98,1055	96,5068

M010			
ESTATÍSTICA	E(mm)	N(mm)	U(mm)
MÁXIMO	23,5588	59,0933	10,1540
MÍNIMO	-17,3018	-30,7823	-9,5339
AMPLITUDE	40,8606	89,8757	19,6878

M011			
ESTATÍSTICA	E(mm)	N(mm)	U(mm)
MÁXIMO	11,6458	59,6955	11,7913
MÍNIMO	-19,0490	-32,1391	-12,0538
AMPLITUDE	30,6949	91,8346	23,8451

M012			
ESTATÍSTICA	E(mm)	N(mm)	U(mm)
MÁXIMO	51,0979	56,4539	26,2727
MÍNIMO	-69,9333	-28,3125	-19,9665
AMPLITUDE	121,0312	84,7664	46,2392

M013			
ESTADÍSTICA	E(mm)	N(mm)	U(mm)
MÁXIMO	50,6140	26,8294	63,7804
MÍNIMO	-89,3846	-29,1664	-46,7863
AMPLITUDE	139,9986	55,9958	110,5667

M015			
ESTADÍSTICA	E(mm)	N(mm)	U(mm)
MÁXIMO	42,1546	24,3364	106,1065
MÍNIMO	-27,1720	-28,2336	-68,1646
AMPLITUDE	69,3266	52,5701	174,2711

M016			
ESTADÍSTICA	E(mm)	N(mm)	U(mm)
MÁXIMO	41,1352	44,6237	96,0547
MÍNIMO	-73,3451	-26,6602	-72,0271
AMPLITUDE	114,4803	71,2839	168,0818

M018			
ESTADÍSTICA	E(mm)	N(mm)	U(mm)
MÁXIMO	51,4901	56,2098	27,7640
MÍNIMO	-71,3441	-53,9808	-15,7853
AMPLITUDE	122,8342	110,1907	43,5493

M019			
ESTADÍSTICA	E(mm)	N(mm)	U(mm)
MÁXIMO	21,9896	60,9737	21,6369
MÍNIMO	-25,4108	-37,1976	-21,1463
AMPLITUDE	47,4004	98,1713	42,7832

APÊNDICE 3 – GRÁFICOS DAS SÉRIES TEMPORAIS