

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
COLÉGIO POLITÉCNICO DA UFSM
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM GEOMÁTICA

Vitor Hugo de Almeida Junior

**DESENVOLVIMENTO DE APLICATIVO DE DISPOSITIVO MÓVEL
PARA AJUSTAMENTO DE COORDENADAS GEOGRÁFICAS**

Santa Maria, RS
2020

Vitor Hugo de Almeida Junior

**DESENVOLVIMENTO DE APLICATIVO DE DISPOSITIVO MÓVEL PARA
AJUSTAMENTO DE COORDENADAS GEOGRÁFICAS**

Monografia apresentada ao curso de Especialização em Geomática, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Especialista em Geomática.**

Orientador: Prof. Dr. Enio Giotto

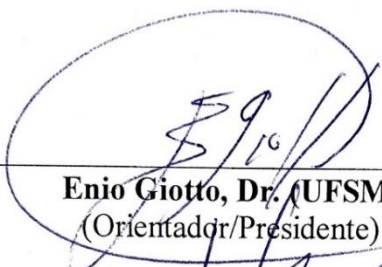
Santa Maria, RS
2020

Vitor Hugo de Almeida Junior

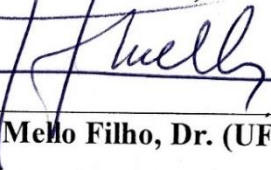
**DESENVOLVIMENTO DE APLICATIVO DE DISPOSITIVO MÓVEL PARA
AJUSTAMENTO DE COORDENADAS GEOGRÁFICAS**

Monografia apresentada ao curso de Especialização em Geomática, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Especialista em Geomática.**

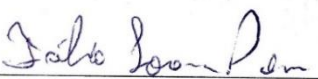
Aprovado em 28 de janeiro de 2020:



Enio Giotto, Dr. (UFSM)
(Orientador/Presidente)



José Américo de Melo Filho, Dr. (UFSM)



Fábio Soares Pires, Me. (UFSM)

Santa Maria, RS
2020

AGRADECIMENTOS

Esta etapa finalizada em minha vida acadêmica, que culminam nessa monografia, não se deve a esforço próprio, pois é resultado de um esforço conjunto de pessoas imprescindíveis, que de várias formas colaboraram em minha caminhada até aqui.

Primeiramente agradeço aos meus pais Carla e Vitor, que desde sempre me deram incondicional amor e apoio de todas as formas para quaisquer que fossem minhas escolhas, jamais deixando que nada me faltasse.

À minha família, em especial ao meu irmão Cassiano e as minhas primas Jaqueline e Michelle, que foram a parte da minha família mais presente em minha vida, dando-me apoio direta ou indiretamente.

À minha namorada Daiana, que foi uma grande amiga e apoiadora em todos os momentos.

Aos meus amigos, minha família de outras famílias, que me faltariam linhas para citar todos seus nomes e o quanto tenho a agradecer a cada um. Cada um deles sabe o quão especial são para mim e quão sou grato por suas presenças em minha vida.

Aos meus professores, em especial ao meu orientador, professor Enio Giotto, pelas orientações e conhecimentos passados a mim, além das inúmeras oportunidades acadêmicas e profissionais que me concedeu.

Aos colegas de laboratório, Fábio, Quelen e Heitor que foram grandes colegas e amigos.

RESUMO

DESENVOLVIMENTO DE APLICATIVO DE DISPOSITIVO MÓVEL PARA AJUSTAMENTO DE COORDENADAS GEOGRÁFICAS

AUTOR: Vitor Hugo de Almeida Junior

ORIENTADOR: Prof. Dr. Enio Giotto

Dispositivos móveis, como smartphones e tablets, estão difundidos globalmente em meio a sociedade, atingindo uma extensa gama de usuários devido a sua multifuncionalidade e constante evolução tecnológica. Uma das principais aplicações destes dispositivos é a geolocalização por meio do receptor GNSS. Embora a evolução tecnológica de receptores GNSS em dispositivos móveis tenha sido exponencial, uma de suas principais limitações reside na acurácia posicional destes receptores. Estima-se que a acurácia posicional média de smartphones e tablets esteja entre 3 a 10 metros, dependendo de fatores ambientais e de seus próprios *hardwares* e *softwares*. O presente trabalho buscou aprimorar a acurácia de posicionamentos estáticos pelo uso das propriedades estatísticas inerentes as observações GNSS, aplicando a técnica de ajustamento de observações geodésicas por meio de um aplicativo desenvolvido para dispositivo móvel. O aplicativo foi desenvolvido em plataforma Android com capacidade de armazenar informações sobre marcos geodésicos, coletar coordenadas geográficas e aplicar a técnica de ajustamento de observações geodésicas pelo método paramétrico. Para testar o aplicativo, foram realizados levantamentos de pontos por posicionamento estático sobre 10 marcos geodésicos no *campus* da UFRGS. Em cada levantamento era posicionado o smartphone sobre um marco de referência, e os nove marcos restantes eram utilizados como parâmetros do ajustamento. Os levantamentos consistiram em observar 2000 coordenadas geográficas sobre cada ponto, utilizando cerca de 40 a 50 minutos para cada levantamento. Como resultados do teste do aplicativo, obteve-se melhorias consideráveis na acurácia do posicionamento após a aplicação do ajustamento sobre as coordenadas observadas, obtendo-se acurácia centimétrica em dois casos ideais do, com 66,6 e 92,6 centímetros de diferença posicional em relação à referência. Além disso, outros quatro pontos apresentaram acurácia melhor que 1,78 metros. Porém, os quatro pontos restantes apresentaram acurácia posicional pior que 2,2 metros, alcançando até 5,39m. Todavia, partir da distribuição das observações no espaço, percebeu-se a presença de desvios posicionais decorrentes da presença exagerada de erros sistemáticos, principalmente multicaminho, devido a existência de edificações e vegetação nas proximidades dos marcos. Ressalta-se que a acurácia das observações foi prejudicada, mas a precisão foi boa, pois as observações foram apenas deslocadas em relação a referência devido aos erros sistemáticos. Nas distribuições em que presença de erros sistemáticos foi baixa e a precisão das observações foi boa, o ajustamento melhorou consideravelmente a acurácia posicional. Por outro lado, o ajustamento apresentou melhorias maiores que 49% na acurácia em todos levantamentos ao comparar as coordenadas ajustadas com o erro médio (RMSE) das observações, chegando até a 81%. Portanto, o ajustamento aprimorou consideravelmente a acurácia do posicionamento, chegando à qualidade centimétrica quando a presença de erros sistemáticos não deteriorou a distribuição estatística e espacial das observações em torno da referência. Ademais, o ajustamento apresentou qualidade posicional melhor que o RMSE das observações, oferecendo um posicionamento mais acurado que a média do conjunto de observações de cada ponto.

Palavras-chave: Android. Posicionamento. GNSS. Acurácia.

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF MOBILE DEVICE APP FOR GEOGRAPHIC COORDINATES ADJUSTMENT

AUTHOR: Vitor Hugo de Almeida Junior

ADVISOR: Prof. Dr. Enio Giotto

Mobile devices, as smartphones and tablets, are widespread worldwide in society reaching a wide range of users due to its multifunctionality and constant technological evolution. One of the main applications of those devices is the geolocation by GNSS receiver in mobile devices. Although the technological evolution of GNSS receivers in mobile devices has been exponential, one of its main limitations is the positional accuracy of these receivers. The average of positional accuracy of smartphones and tablets is estimated between 3 to 10 meters, depending on environmental factors and their hardware and software. Thus, this work aims to improve the static positioning accuracy by using statistical properties of GNSS observations, applying the technique of geodetic observations adjustment in an app developed for mobile devices. The app was developed on the Android platform with the capacity to store information about geodetic marks, to collect geographic coordinates and apply the technique of geodetic observations adjustment by the parametric method. To test the app, was realized point surveys by static positioning over geodetic marks, using this mark as a comparing reference, and the last nine marks were used how adjustment parameters. On the surveys was obtained 2000 geographic coordinates over each point using about 40 to 50 minutes for each point survey. As results on app tests, improvements on positioning accuracy were acquired after applying the adjustment on the geographic coordinates observed, getting sub-metric accuracy in two ideal cases with 66,6 and 92,6 centimeters as the positional difference from the reference mark. Furthermore, the other four points shoed accuracy better than 1,78 meters. Nevertheless, the last four points showed positional accuracy worse than 2,2 meters, reaching out 5,39 meters. However, since the spatial distribution of the observations, was percept spatial deviations from exceeded systematic errors, mainly from multipath, due to the existence of edification and vegetation in the neighborhood of the marks. It should be highlighted that the accuracy of observations was impaired, but the precision was good because the observations were just displaced from the reference due to systematic errors. In the distribution that the existence of the errors was low and the precision was good, the adjustment improved considerably the positional accuracy of the point. On the other hand, the adjustment improved over 49% the positional accuracy in all points when compare the adjusted coordinates to mean error of the observation (RMSE), reaching out 81%. Thus, the adjustment was improved considerably the accuracy of the positioning, reaching out to sub-metric quality when the systematic error was not harmed the statistical and spatial distribution of observations errors. Besides that, the adjustment showed positional quality better than the observations RMSE, offering a more accurate positioning than the average of the set of observations of each point.

Keywords: Android. Posiotioning. GNSS. Accuracy.

LISTA DE ABREVIATURAS

API	Application Programming Interface
ART	Android Runtime
CV	Coefficiente de Variação
DRMS	Distance Root Mean Square
FGDC	Comitê Federal de Dados Geográficos
GLONASS	Global Orbiting Navigation Satellite System
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
HAL	Hardware Abstraction Layer
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDE	Integrated Development Environment
IU	Interface de Usuário
ITRF	International Terrestrial Reference Frame
MMQ	Método dos Mínimos Quadrados
MVC	Matriz Variância-Covariância
NMEA	National Marine Electronics Association
RBMC	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo
RMSE	Root Mean Square Error
RTK	Real Time Kinematic
SDK	Software Development Toolkit
SGBD	Sistema Gerenciador de Bancos de Dados
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
UF	Unidade Federativa
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UTM	Universal Transversa de Mercator
WGS 84	World Geodetic System 1984
XML	Extensible Markup Language

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Arranjo da constelação GPS.	18
Figura 2 – Acurácia e precisão.	22
Figura 3 – Arquitetura do sistema operacional Android.	32
Figura 4 – Tela inicial do aplicativo.	34
Figura 5 – Tela de cadastro e edição de estações base.	35
Figura 6 – Atividades para o ajustamento de observações. (a) Tela de seleção dos marcos geodésicos que serão parâmetros do ajustamento; (b) Tela de rastreamento das observações e armazenamento do arquivo das coordenadas ajustadas.	36
Figura 7 – Ilustração do smartphone Motorola G7 Power utilizado no estudo.	38
Figura 8 – Mapa imagem dos marcos geodésicos da UFRGS selecionados para a realização do trabalho, localizados no Campus do Vale da UFRGS, no município de Porto Alegre/RS.	39
Figura 9 – Dispersão espacial das observações em torno do marco de referência dentro dos raios de 1, 2, 5 e 10 metros.	47
Figura 10 – Frequência das diferenças de distância horizontal entre o marco de referência e as observações.	48
Figura 11 – Visão superior dos marcos 008A e 008B.	49
Figura 12 – Visão superior do marco 006B.	51
Figura 13 – Vista superior do marco 018A.	52
Figura 14 – Vista superior do marco 005B.	53
Figura 15 – Vista superior do marco 010A.	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relação de marcos geodésicos utilizados no estudados e suas respectivas coordenadas geográficas e UTM.	40
Tabela 2 – Coordenadas obtidas pelos ajustamento realizado no aplicativo, diferenças do ajustamento em relação ao marco de referência e acurácia média das observações dos levantamentos	45
Tabela 3 – RMSE das observações coletadas em cada marco.	56
Tabela 4 – Diferenças métricas e percentuais entre o ajustamento (Ajust.) e o erro médio das observações (RMSE) a 95% de confiança (RMSE95) e a 68% de confiança (RMSE68).	56

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Fontes e efeitos dos erros envolvidos.....	20
---	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVO GERAL	15
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
1.3	JUSTIFICATIVA	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	GEODÉSIA CELESTE	16
2.1.1	Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS)	17
2.1.1.1	<i>GPS</i>	17
2.1.1.2	<i>GLONASS</i>	18
2.2	AJUSTAMENTO DE OBSERVAÇÕES GEODÉSICAS	18
2.2.1	Teoria dos Erros	19
2.2.1.1	<i>Tipos de erros em observações GNSS</i>	20
2.2.1.2	<i>Acurácia e precisão</i>	21
2.2.2	Método dos Mínimos Quadrados	22
2.2.3	Método dos Parâmetros	23
2.2.3.1	<i>Equações de observação</i>	23
2.2.3.2	<i>Equações Normais</i>	24
2.2.3.3	<i>Matriz Variância-Covariância (MVC)</i>	25
2.3	SISTEMAS DE REFERÊNCIA E SISTEMAS DE COORDENADAS	26
2.3.1	Sistema de coordenadas geográficas	28
2.3.2	Sistema de coordenadas cartesianas	28
2.3.3	Sistema de coordenadas planas UTM	28
2.3.4	Transformação de coordenadas geográficas para cartesiana	29
2.4	SENTENÇA NMEA	30
2.5	MARCO GEODÉSICO	30
2.6	ANDROID	31
2.6.1	Estrutura do Android	31
2.6.2	Java	33
2.6.3	XML	33
2.6.4	SQLite	33
3	MATERIAIS E METODOLOGIA	34
3.1	DESENVOLVIMENTO DO APLICATIVO ANDROID C7-CDA	34
3.1.1	Front-end	34
3.1.2	Back-end	36
3.2	DISPOSITIVO MÓVEL UTILIZADO NOS TESTES	37
3.3	LOCAL DO ESTUDO	38
3.4	COLETA DAS OBSERVAÇÕES	40
3.5	MEDIDAS ESTATÍSTICAS	42
3.5.1	Coefficiente de variação	42
3.5.2	Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE)	43
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
5	CONCLUSÃO	59
	REFERÊNCIAS	62

1 INTRODUÇÃO

A necessidade inerente a natureza humana de posicionamento e navegação no espaço ao longo de sua história foi sendo suprida por diferentes métodos de localização. Em 1970 surgiu a solução definitiva com a proposta do sistema estadunidense NAVSTAR-GPS (*Global Positioning System*) que revolucionou muitas atividades que dependiam de determinações de posições. Aos poucos surgiram outros sistemas de posicionamento como o russo GLONASS (*Global Orbiting Navigation Satellite System*) e, de forma geral, estes sistemas vêm sendo chamados de GNSS (*Global Navigation Satellite System*) (MONICO, 2008).

Os sistemas GNSS já são consolidados dentro de diversas atividades. Neste sentido, Monico (2008) classifica os receptores GNSS entre duas comunidades usuárias: militares e civis. Além disso, o autor classifica os receptores também de acordo com a aplicação como receptor de navegação, receptor geodésico, estação de referência, receptor para SIG (Sistema de Informações Geográficas), entre outros.

As diferentes aplicações demandam de diferentes níveis de precisão e acurácia. Estas diferenças implicam nos custos dos equipamentos receptores devido ao conjunto de *hardwares* e *softwares* necessários para obter a acurácia ou precisão para o posicionamento de uma dada aplicação. Desta forma, a obtenção de localização como acurácia a nível centimétrico ou milimétrico dependem de performances de receptores de alto custo, em geral.

Em contrapartida, vários estudos e tecnologias vêm sendo desenvolvidas no que tange ao aprimoramento do posicionamento GNSS como, por exemplo, os parâmetros ambientais que afetam os sinais GNSS, ou ainda a inserção de novas constelações GNSS. Essas pesquisas vêm aprimorando cada vez mais receptores GNSS no sentido de redução de custos, bem como dimensões dos receptores GNSS, de forma a ter-se receptores GNSS em smartphones (ROMERO-ANDRADE et al., 2019). Desta forma, na última década, houve um amplo crescimento de pesquisas e aplicações em GNSS de baixo custo devido ao potencial de dispositivos móveis, como smartphones (ZANG et al., 2019).

Atualmente, dispositivos móveis como smartphones e tablets são quase universais no cotidiano das pessoas. Dados informados por Statista (2019) mostram que em 2018 eram mais 2,9 bilhões de usuários de smartphones em todo o mundo, aumentando 400 milhões de usuários em relação a 2016. Em consonância a isso, os dispositivos móveis trouxeram acessibilidade ao GNSS que permitiu o desenvolvimento de uma extensa gama de aplicações. Assim, um dos

principais usos de smartphones tem sido a localização de usuários para posicionamento, rastreamento e navegação. Um exemplo disto é o aplicativo Google Maps ranqueado entre os 10 aplicativos de dispositivos móveis mais populares no mundo (SPECHT et al., 2019).

Conforme apresentado na literatura, a precisão e a acurácia do posicionamento por GNSS de dispositivos móveis, como smartphones e tablets, não possuem grandezas unânimes. Seyyedhasani et al. (2016) apontam uma acurácia planimétrica de 3 a 5 metros em seu trabalho; Dabove (2014) demonstram a precisão das componentes planialtimétricas separadamente em diferentes situações, apontando precisões de 2,6 metros para a longitude, 2,5 metros para a latitude e 4,5 na altura em situações de áreas abertas, e 4,5m, 4,7m e 5m de precisão na latitude, longitude e altura respectivamente na zona urbana.

Specht et al. (2019) testou diferentes dispositivos Samsung em modo cinemático em uma embarcação e apresentou diferentes precisões, com erros médios quadráticos de distância (DRMS, *Distance Root Mean Square*) das componentes planimétricas que apresentaram precisões de 2,61m a 5,27m, destacando o fato do modelo mais atual obter a pior precisão. Szot et al. (2019) também testou os diferentes modelos smartphones Samsung, mas para posicionamento estático e com campanhas de coletas de observações de 12 horas e de 24 horas, obtendo DRMS mínimo de 1,35m e máximo de 7,95m para 12 horas de observações e 1,02m e 6,84m para 24 horas, sendo que as piores precisões também ficaram com os modelos mais novos.

Tomaščík et al. (2017) abordou o posicionamento em áreas com impedâncias florestais ao sinal GNSS, mostrando que o posicionamento sob ou próximo a árvores pode acarretar em precisão 2 a 6 vezes pior do que em condições de posicionamento sem impedimento. Lopes (2019) testou o posicionamento de diferentes modelos de smartphones em locais de pastagem e de florestas e salientou que as precisões nestes dois casos ficam entre 3 e 10 metros de precisão.

Contudo, os erros posicionais estão atrelados não somente com as variáveis ambientais, mas também a variáveis como *hardware*, *software* e aplicativo usados para coleta (LOPES, 2019), bem como o sistema operacional (VON WATZDORF e MICHAHELLES, 2010; BAUER, 2013) e ruídos aleatórios inerentes ao GNSS, como o multicaminho (PESYNA, HEATH e HUMPHREYS, 2014).

A precisão atualmente apresentada pelos receptores GNSS de smartphones e tablets é, em muitos casos, suficiente para atender demandas da sociedade civil. Porém, algumas

atividades precisam de maior refinamento posicional – principalmente para uso técnico – e, assim, estes receptores tornam-se descartáveis para estas aplicações.

Neste sentido, pesquisadores vêm buscando explorar métodos para aprimorar a precisão posicional de observações GNSS em smartphones e tablets. Pesyna, Heath e Humphreys (2014) foram um dos primeiros a atingir precisões centimétricas com receptores GNSS em smartphones. Para isso os autores utilizaram o sinal do GNSS do smartphone redirecionado para um receptor externo com melhor qualidade para realizarem o posicionamento a partir da fase da onda portadora relativa. Resultados como estes vêm sendo reproduzidos principalmente após 2016, quando a Google anunciou que a partir da versão 7 (Nougat) do Android seriam disponibilizadas as medidas brutas GNSS como pseudodistância e fase da onda portadora (MALKOS, 2016). Com estas informações adicionais, pesquisadores vêm conseguindo aprimorar o posicionamento para níveis centimétricos ou decimétricos com técnicas como RTK (*Real Time Kinematic*), filtros e PPP (Posicionamento por Ponto Preciso) (DABOVE et al., 2019; DABOVE e DI PIETRA, 2019; GILL et al., 2017; ROMERO-ANDRADE et al., 2019; ZHANG et al., 2019).

Estes referidos métodos de melhorias nas coordenadas obtidas dependem de receptores externos – mesmo que de baixo custo – ou de dispositivos com Android versão 7 (Nougat), no mínimo. Assim, nem sempre os métodos se tornam usuais ou acessíveis a toda comunidade usuária. A alternativa encontrada por este trabalho, para tentar aprimorar a qualidade do posicionamento estático com dispositivos móveis, reside na utilização das propriedades estatísticas inerentes as observações GNSS, utilizando-se do ajustamento de observações geodésicas pelo método dos mínimos quadrados (MMQ).

O ajustamento de observações mostra-se propício para esta aplicação devido a oferecer uma solução única para problemas onde o número de observações é superabundante, além de estimar a qualidade da solução (DALMOLIN, 2002). A solução deste sistema é o valor que torne mínima a soma dos quadrados dos desvios pelo modelo matemático do MMQ (GEMAEL, 1994).

O ajustamento permite obter soluções únicas para as observações GNSS que são inerentemente eivadas de erros aleatórios, os quais reduzem a qualidade da observação. Tais erros, entretanto, demonstram certa regularidade, apresentando-se, em geral, com distribuição de frequência normal (GEMAEL, 1994). Admitindo-se que receptores GNSS de qualquer modelo de smartphones e tablets permitem a coleta superabundante de observações e que estas estão eivadas apenas de erros de natureza aleatória, o presente trabalho busca aprimorar a

acurácia do posicionamento estático por GNSS de dispositivos móveis, aplicando-se o método paramétrico do ajustamento de observações geodésicas

1.1 OBJETIVO GERAL

Proporcionar melhoria na qualidade posicional de localização obtida por receptores GNSS de dispositivos móveis, facilitando e auxiliando trabalhos de verificação e levantamento de coordenadas geográficas a campo.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenvolver aplicativo móvel com interface de usuário com implementação do modelo matemático de modelo paramétrico de ajustamento de observações;
- Testar aplicativo em marcos geodésicos de coordenadas conhecidas;
- Entender o comportamento das observações levantadas e os erros envolvidos;
- Avaliar a qualidade da acurácia horizontal obtida pelo aplicativo.

1.3 JUSTIFICATIVA

Dispositivos móveis estão muito difundidos em meio a sociedade contemporânea devido a sua facilidade de uso, multifuncionalidades e acessibilidade. Os dispositivos móveis, como smartphones e tablets, tornaram-se essenciais no cotidiano da sociedade e, devido a sua popularidade, estão em constante evolução tecnológica. Estes dispositivos possuem potencial que vai além de questões cotidianas, como o apoio em áreas técnicas de modo prático e acessível, principalmente no que tange aos custos equipamento. Isto porque receptores GNSS de alta acurácia possuem alto custo quando comparados a smartphones e tablets, sendo um dos principais limitantes de levantamentos de alta precisão.

Logo, torna-se relevante o estudo da capacidade de smartphones e tablets atuarem em trabalhos técnicos na área de geomática e em áreas ou atividades que se utilizem do posicionamento de alta acurácia, de modo a constatar suas limitações e potencialidades. Por esta razão, torna-se válido desenvolver um aplicativo para dispositivo móvel no intuito de aprimorar a acurácia do posicionamento por GNSS por meio das propriedades estatísticas inerentes as observações GNSS, aplicando a técnica de ajustamento de observações geodésicas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 GEODÉSIA CELESTE

Conforme Gemael e Andrade (2004, p. 11):

O objetivo último da Geodésia é a determinação da forma e das dimensões do nosso planeta. Em se tratando de um corpo limitado por uma superfície irregular, tal determinação exige, por razões práticas e econômicas, o levantamento de pontos escolhidos sobre essa superfície.

Ainda segundo os mesmos autores, a revolução estrutural para ditar novos rumos a Geodésia teve início junto a “era espacial” e a vulgarização dos computadores, que trouxeram aplicações e desenvolvimento a curto prazo, não se atendo somente a Geodésia. As aplicações geodésicas dos satélites artificiais e técnicas espaciais conexas podem ser chamadas de **Geodésia Celeste**. Gemael e Andrade (2004, p. 221) salientam que, com esse advento,

Ocorreu uma revolução em dois aspectos da Geodésia tradicional: a velocidade nos levantamentos, de um lado, alterando profundamente os parâmetros de planejamento, considerados consolidados, e a precisão, de outro, que atingiu níveis que tornaram necessárias revisões até em conceitos teóricos.

A geodésia celeste, ou geodésia por satélite, compreende as técnicas observacionais e computacionais que permitem a solução de problemas geodésicos pelo uso de medições precisas de satélites, como, por exemplo, a determinação posicional em três dimensão (latitude, longitude e altitude) a nível global, regional ou local, ou ainda a determinação do campo de gravidade da Terra. (SEEBER, 2003). Desta forma, a geodésia por satélite relaciona-se diretamente com outros campos da geodésia como Geodésia Astronômica, Geodésia Matemática, Geodésia Física e Geodésia de Observações Terrestres (SEEBER, 2003).

A geodésia celeste já comprovou sua eficiência em diversos estudos, grandes potencialidades e perspectivas se abrem aos geodestas e atualmente a geodésia celeste possui avanços significativos com o incremento de constelações GNSS (*Global Navigation Satellite System*) como o NAVSTAR-GPS e o GLONASS. Seeber (2003) apontou que os resultados obtidos por geodésia por satélite são usados cada vez mais em outras disciplinas como geofísica, navegação e oceanografia, por exemplo.

2.1.1 Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS)

O GNSS (Sistema Global de Navegação por Satélite, *Global Navigation Sattelite System*) é o conjunto de sistemas de navegação por satélite existentes como o sistema estadunidense GPS (*Global Positioning System*), o russo GLONASS (*Global Orbitting Navigation Sattelite System*) e o europeu Galileo, além de outros sistemas que estão sendo implementados ou desenvolvidos. Esses sistemas têm sido chamados GNSS desde 1991, na 10ª Conferência de Navegação Aérea, quando foi reconhecido o GNSS com fonte primária para a navegação aérea (MONICO, 2008).

O GPS foi concebido primariamente como um sistema de navegação. O fundamento da navegação por satélite é baseado observável pseudodistância entre o usuário e, no mínimo, quatro satélites para solucionar as quatro incógnitas existentes no sistema (latitude, longitude, altitude e tempo). A partir de coordenadas conhecidas dos satélites, as coordenadas, velocidade e tempo do usuário podem ser determinados. A incógnita tempo é resolvido devido a não sincronização entre o relógio do receptor e o relógio dos satélites (SEEBER, 2003). Para posicionamento de melhor qualidade, além das pseudodistância, faz-se também usos das medidas de fase da onda portadora (MONICO, 2008).

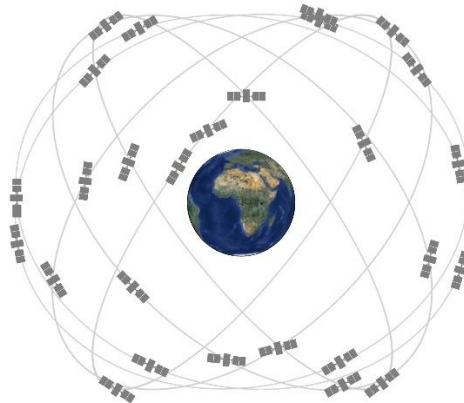
Atualmente, os receptores GNSS possuem a capacidade de receber sinal dos satélites dos diferentes sistemas, o que melhorou exponencialmente a qualidade do posicionamento por satélite, devido a maior disponibilidade de satélites em qualquer ponto da superfície terrestre.

2.1.1.1 GPS

O GNSS foi concebido em 1970 quando este tipo de sistema de navegação por satélite começou com o sistema estadunidense NAVSTAR – GPS (*Global Positioning System*) ou apenas GPS. O GPS é um sistema com intuito inicial de uso militar, mas que foi posteriormente expandido para uso civil, declarado operacional em 1985, com 24 satélites em órbita. Em junho de 2007 este número havia aumentado para trinta satélites. Atualmente, a constelação GPS conta com 31 satélites operacionais, sendo um do bloco IIA, onze do bloco IIR, sete do bloco IIR-M e doze do bloco IIF (GPS, 2019; MONICO, 2008; SEEBER, 2003).

Os satélites da constelação GPS estão arranjados em seis órbitas igualmente espaçadas ao redor da Terra, cada uma ocupada por quatro satélites (Figura 1). Este arranjo permite usuários visualizarem no mínimo quatro satélites em qualquer ponto do planeta (GPS, 2019).

Figura 1 – Arranjo da constelação GPS.



Fonte: GPS (2019).

O GPS consiste em três segmentos principais: Espacial, Controle e Usuários. O segmento espacial está ligado com a constelação dos satélites e seus sinais, o de controle monitora e faz a devida manutenção do sistema e o de usuários é abrangente e segue ampliando. (MONICO, 2008).

2.1.1.2 GLONASS

O sistema russo GLONASS é um sistema de navegação com intuito militar, mas que foi expandida para a comunidade civil. O GLONASS foi concebido em 1970, mas declarado totalmente operacional apenas em 1995 com uma constelação de 24 satélites. No fim de 2006, este número havia reduzido para apenas 10 satélites. Atualmente, o sistema conta com uma constelação de 22 satélites operacionais, oferecendo cobertura global (GLONASS, 2019; MONICO, 2008).

Assim como o GPS, o GLONASS também é composto pelos três segmentos – espacial, controle e usuário – sendo que o segmento de usuário é um pouco menor (MONICO, 2008).

2.2 AJUSTAMENTO DE OBSERVAÇÕES GEODÉSICAS

Gemael (1994) salienta que medições ou observações feitas pelo homem possuem inevitavelmente a presença de erros que podem ocorrer tanto por falha humana quanto por falha do equipamento de medição, além de condições ambientais desfavoráveis. Estes erros podem

ser classificados em três grupos: erros grosseiros, erros sistemáticos e erros acidentais ou aleatórios.

Os erros grosseiros e sistemáticos são erros que podem e devem ser evitados de modo que não adultere o verdadeiro valor da observação. Entretanto, os erros de natureza aleatória não são possíveis de serem previstos, os quais o ajustamento busca amenizar. Desse modo, Gemael (1994, p. 15) diz que:

A partir de observações redundantes sujeitas a flutuações probabilísticas e de uma estimativa de sua precisão, o **ajustamento** tem por objetivo:

- i) estimar, mediante a aplicação de modelos matemáticos adequados e do Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), um valor único para cada incógnita do problema;
- ii) estimar a precisão de tais incógnitas e a eventual correlação entre elas.

Assim, o ajustamento objetiva a solução única para problemas em que o número de observações é superabundante e o sistema de equações lineares é inconsistente, além de estimar a qualidade da solução. Este conceito está relacionado com o fato de que as observações estão sempre afetadas de erros, ou seja, em n repetições de uma medida, as n observações não serão idênticas, mas estarão dispersos em uma região ou intervalo. Logo, as observações possuem flutuações probabilísticas ou aleatórias inerentes a elas (DALMOLIN, 2002).

Monico (2008) diz que o ajustamento de observações pelo MMQ pode ser efetuado de três formas: pelo método das equações de observação (paramétrico); pelo método das equações de condição (condicionado); ou pelo método combinado. O autor salienta ainda que em processamento de dados GNSS, em geral, se adota o método paramétrico, o qual será adotado neste trabalho.

2.2.1 Teoria dos Erros

A estimativa dada pelo ajustamento de observações está relacionada a impossibilidade de obtenção do valor verdadeiro de uma medição devido as observações estarem atreladas a erros inevitáveis. Os erros de medições podem ser definidos como (GEMAEL, 1994):

- Erros grosseiros: conduzidos por falibilidade humana como falhas de digitação e utilização do equipamento de modo errado;
- Erros sistemáticos: consiste em erros cometidos pelo usuário ou equipamento que ocorrem em determinado momento da medição e que persistem ao longo da mesma, prejudicando todas as medições posteriores. Este tipo de erro é cumulativo, ou seja, tende a se acumular ao longo da medição;

- Erros acidentais ou aleatórios: são causados por motivos desconhecidos ou não controláveis, mas ao contrário dos erros sistemáticos, não tendem a ser cumulativos. Estes erros são determinantes pelas flutuações randômicas com respeito a uma média, inerentes as medições (DALMOLIN, 2002).

Gemael (1994) demonstra, entretanto, que os erros de natureza aleatória revelam certa regularidade à medida que o número de observações aumenta. Estudos teóricos apontam que, embora os erros sejam aleatórios, estes possuem tendência de ser distribuídos de forma normal ao redor de uma média.

2.2.1.1 Tipos de erros em observações GNSS

As observações GNSS estão sujeitas a diversos tipos de erros de natureza sistemática. O quadro a seguir (Quadro 1) mostra algumas fontes e efeitos dos erros sistemáticos envolvidos em observações GNSS:

Quadro 1 – Fontes e efeitos dos erros envolvidos em observações GNSS.

Fontes	Erros
Satélite	Erro da órbita Erro do relógio Relatividade
Propagação do Sinal	Refração troposférica Refração ionosférica Perda de ciclos Multicaminho ou sinais refletidos Rotação da Terra
Receptor/Antena	Erro do relógio Centro de fase da antena
Estação	Erro nas coordenadas Multicaminho ou sinais refletidos Pressão da atmosfera

Fonte: adaptado de Monico (2008).

No presente trabalho, podem ser destacados principalmente os erros relacionados ao multicaminho e a refração troposférica, além dos erros inerentes ao equipamento/receptor e antena.

O multicaminho é uma das principais fontes de erros na propagação do sinal, que consiste na recepção de sinais de sinais refletidos em superfícies próximas ao receptor e da onda que chega diretamente ao receptor, deteriorando a qualidade do posicionamento (MONICO, 2008).

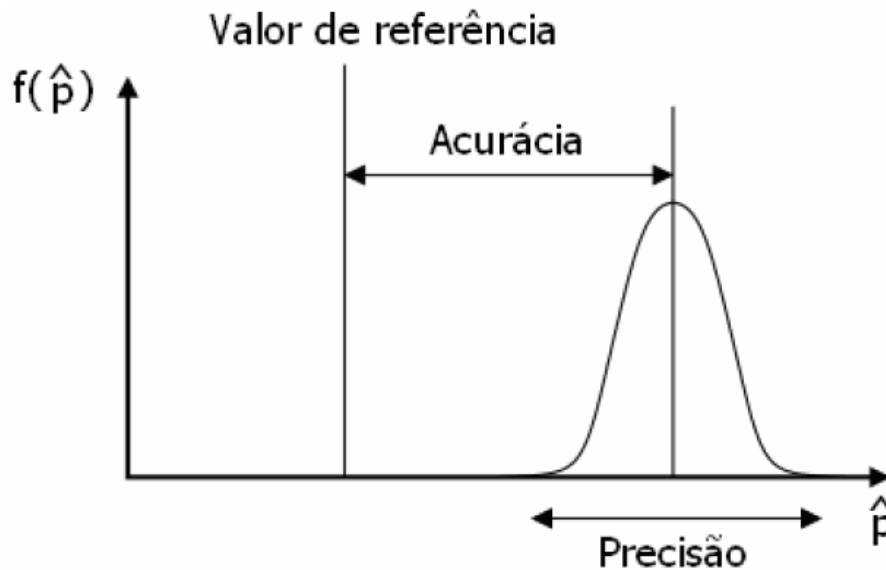
Já a refração troposférica consiste em efeitos que afetam a propagação do sinal, sendo dependentes da massa gasosa que se concentra nas baixas camadas da atmosfera terrestre. A intensidade dos efeitos relacionados a refração troposféricas pode variar de poucos metros até 30 metros. Os efeitos dependem de fatores como a densidade da atmosfera, condições atmosféricas, frequência da onda e ângulo de elevação do satélite. Destes efeitos podem ser citados três efeitos principais que são a atenuação atmosférica, a cintilação troposférica e o atraso troposférico (MONICO, 2008).

2.2.1.2 Acurácia e precisão

O valor verdadeiro de uma observação ou medida é um conceito abstrato, devido a possibilidade da presença de erros de natureza aleatória, sistemática ou grosseira. O que se pode dispor é uma observação de qualidade superior para considerar como referência e determinar a qualidade da observação em relação a esta referência. Nesse sentido acurácia e precisão são dois conceitos comumente utilizados para indicar a qualidade de uma observação e que, por vezes, são confundidos (MONICO et al., 2009).

Monico et al. (2009) apresentam uma revisão destes dois termos – acurácia e precisão – baseados em diferentes autores, principalmente em Mikhail e Ackermann (1976). Os autores apontam que a acurácia se refere ao grau de proximidade do valor medido em relação ao valor de referência desta medida. Já a precisão expressa o grau de consistência da observação com a sua média, sendo diretamente relacionada à dispersão da distribuição das observações. Os autores salientam ainda que “a precisão pode ser definida como o grau de conformidade entre as séries de observações da mesma variável aleatória, e que a dispersão da distribuição de probabilidade é um indicador da precisão” (MONICO et al., 2009, p. 471). Estes conceitos podem ser compreendidos de forma simplificada na figura abaixo.

Figura 2 – Acurácia e precisão.



Fonte: Monico et al. (2009).

Estes termos podem ser abordados também em relação a presença de erros. Na precisão se consideram apenas erros de natureza aleatória, enquanto que na acurácia se inclui também erros sistemáticos, os quais afetam a estimativa como uma tendência constante. Desta forma, como envolve erros aleatórios e sistemáticos, o termo acurácia agrega a medida de precisão (MONICO et al., 2009).

Uma medida de acurácia é o erro médio quadrático (EMQ). Para a discriminação entre erros aleatórios e sistemáticos é necessário utilizar parâmetros independentes de tendência e precisão (incerteza) (MONICO et al., 2009).

2.2.2 Método dos Mínimos Quadrados

Como é apresentado em Dalmolin (2002), o MMQ é consiste em estimar variáveis estocásticas X e seus parâmetros de distribuição Σ_x , a partir de amostras L observadas com precisão Σ_L . Na resolução deste problema estarão envolvidos três espaços: (i) o espaço das observações; (ii) o espaço do modelo matemático; e (iii) o espaço dos parâmetros incógnitos. O modelo funcional então inter-relaciona estes espaços e constitui um sistema de equações lineares inconsistentes, devido as flutuações aleatórias das observações. O MMQ torna o sistema consistente a partir da estimativa de uma solução única que torne mínima a soma dos quadrados dos resíduos.

Assim, para um dado valor final (L) e um valor médio (L_b), tem-se o resíduo V .

$$V = L - L_b \quad (1)$$

Se conhecido os resíduos, pode-se corrigir as observações:

$$L = L_b + V \quad (2)$$

Obtendo-se um sistema:

$$AX = L_b + V \quad (3)$$

Assim, o princípio do MMQ estabelece que a soma dos quadrados dos resíduos seja mínima:

$$\Phi = V^T + V \cong \min \quad (4)$$

Tais resíduos são “valores, a priori desconhecidos, que somados às observações produzem o valor escolhido x” (GEMAEL, 1994, p.12). O MMQ tem como fundamento o ajuste de uma estimativa confiável na impossibilidade de se obter um valor verdadeiro X, de forma que a estimativa apresente a soma mínima dos quadrados dos resíduos. (GEMAEL, 1994).

2.2.3 Método dos Parâmetros

O modelo paramétrico de ajustamento de observações se processa quando os valores observados ajustados podem ser expressos explicitamente como função dos parâmetros ajustados (SCHUNEMAN, 2005).

A modelagem matemática a seguir apresentada é derivada dos trabalhos de Dalmolin (2004), Gemael (1994) e Schunemann (2005). A formulação é dada em linguagem matricial.

2.2.3.1 Equações de observação

Seja L_b o vetor dos valores observados, V o vetor dos resíduos e L_a vetor dos observados ajustados:

$$L_a = L_b + V \quad (5)$$

E sejam X_o o vetor cujas componentes são os valores aproximados dos parâmetros, X o vetor correção e X_a o vetor dos parâmetros ajustados, então:

$$X_a = X_o + X \quad (6)$$

Quando os valores observados ajustados podem ser expressos explicitamente como uma função dos parâmetros ajustados, isto é, quando se verifica o modelo matemático:

$$L_a = f(X_a) \quad (7)$$

Dizemos que o ajustamento se processa pelo **método paramétrico**.

Substituindo o primeiro membro pela Equação 5 e linearizando segundo a fórmula de Taylor temos:

$$L_b + V = F(X_o + X) = F(X_o) + \left. \frac{\partial F}{\partial X_a} \right|_{X_a=X_o} X \quad (8)$$

Designando a função dos parâmetros aproximados por L_o :

$$L_o = f(X_o) \quad (9)$$

e a matriz das derivadas parciais por A :

$$A = \left. \frac{\partial F}{\partial X_a} \right|_{X_o} \quad (10)$$

a Equação 8 se escreve:

$$V = AX + L_o - L_b \quad (11)$$

Assim, fazendo:

$$L = L_o - L_b \quad (12)$$

obtemos o modelo matemático linearizado do modelo dos parâmetros:

$${}_nV_1 = {}_nA_u + {}_uX_1 + {}_nL_1 \quad (13)$$

em que n é o número de equações de observações.

Schunemann (2005) destaca que nos casos em que o modelo matemático é linear, não há necessidade de recorrer ao processo de linearização. Assim, tem-se apenas a matriz dos coeficientes das equações de observação ao invés da matriz das derivadas parciais, ambas denotadas por A .

2.2.3.2 Equações Normais

Minimizando a forma quadrática fundamental obtemos sucessivamente:

$$\Phi = V^T P V = (AX + L)^T P (AX + L) = \min \quad (14)$$

$$\Phi = X^T A^T P A X + 2X^T A^T P L + L^T P L = \min \quad (15)$$

Igualando a zero a derivada primeira em relação a X temos:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial X} = 2A^T P A X + 2A^T P L = 0 \quad (16)$$

$$A^T P A X + A^T P L = 0 \quad (17)$$

$$X = -(A^T P A)^{-1} A^T P L \quad (18)$$

Considerando-se:

$$N = A^T P A \quad (19)$$

$$U = A^T P L \quad (20)$$

que resulta

$$NX + U = 0 \quad (21)$$

A Equação 21 ou a 17 representa um sistema de U equações normais cuja solução é dada pelo vetor:

$$X = -N^{-1}U \quad (22)$$

e cujas componentes convertem os parâmetros aproximados em ajustados:

$$X_a = X_o + X \quad (23)$$

2.2.3.3 Matriz Variância-Covariância (MVC)

Gemael (1994) diz que antes do ajustamento é necessário estimar a precisão das medidas para compor a matriz variância-covariância dos valores observados (Σ_{L_b}) e, a partir desta e da variância da unidade de peso *a priori* σ_o^2 , chegar à matriz dos pesos:

$$P = \sigma_o^2 \Sigma_{L_b}^{-1} \quad (24)$$

Após o ajustamento podemos estimar a variância da unidade de peso (variância *a posteriori*) e a matriz variância-covariância das variáveis aleatórias envolvidas no processo: X , X_a , V , L_a .

As equações da matriz variância-covariância das correções (Σ_x) é dada introduzindo a Equação 20 na Equação 22, tendo assim

$$X = -N^{-1}U = -N^{-1}A^T P L = -N^{-1}A^T P (L_o - L_b) \quad (25)$$

$$X = -N^{-1}A^T P L_o + N^{-1}A^T P L_b \quad (26)$$

Aplicando a lei da propagação das covariâncias:

$$\Sigma_x = G \Sigma_{L_b} G^T \quad (27)$$

em que

$$G = N^{-1}A^T P \quad (28)$$

e, por serem P e N^{-1} matrizes simétricas:

$$G^T = P^T A (N^{-1})^T = P A N^{-1} \quad (29)$$

Substituindo na Equação 27:

$$\Sigma_X = N^{-1}A^T P \Sigma_{L_b} P A N^{-1} \quad (30)$$

Considerando ainda que:

$$\Sigma_{L_b} = \sigma_o^2 P^{-1} \quad (31)$$

então resultará na equação para a **MVC das correções**:

$$\Sigma_X = \sigma_o^2 N^{-1} \quad (32)$$

A **MVC dos parâmetros** será dada a partir da equação

$$X_a = X_o + X \quad (33)$$

em que o vetor X_o é constante, assim:

$$\Sigma_{X_a} = \Sigma_X = \sigma_o^2 N^{-1} \quad (34)$$

A MVC dos valores observados ajustados será dada pela equação inicial

$$L_a = L_b + V = L_b + AX + L = L_b + AX + L_o - L_b \quad (35)$$

$$L_a = AX + L_o \quad (36)$$

Aplicando a lei de propagação tem-se

$$\Sigma_{L_a} = A \Sigma_X A^T \quad (37)$$

$$\Sigma_{L_a} = \sigma_o^2 N^{-1} A^T \quad (38)$$

E, por fim, a **MVC dos resíduos** é dada por

$$V = L_a - L_b \quad (39)$$

$$\Sigma_V = \Sigma_{L_a} - \Sigma_{L_b} \quad (40)$$

$$\Sigma_V = \sigma_o^2 (A N^{-1} A^T - P^{-1}) \quad (41)$$

2.3 SISTEMAS DE REFERÊNCIA E SISTEMAS DE COORDENADAS

Os sistemas de coordenadas são indispensáveis na representação da posição de pontos sobre a superfície terrestre, independente do modelo de representação. Estes sistemas foram propostos para que fosse possível determinar a localização precisa de pontos na superfície terrestre (CARVALHO e ARAÚJO, 2011). Os sistemas de coordenadas mais usadas em mapeamento são os sistemas de coordenadas geográficas, as planas e as cartesianas (DRONENG, 2017).

Nos sistemas GNSS, as posições são determinadas em coordenadas cartesianas retangulares (x, y, z) tendo como origem o centro de massa da Terra e, posteriormente, converte-as em coordenadas com referência ao elipsoide, expressas por latitude, longitude e altura elipsoidal (SEBEM, 2010).

Sistemas de referência ou Referenciais em Geodésia são figuras geométricas posicionadas no espaço que representam a superfície da terra, permitindo que cada ponto dessa mesma superfície tenha um único terno de coordenadas (x, y, z) (DRONENG, 2017). Um referencial ideal seria aquele que possuísse uma origem inercial. O sistema geocêntrico, entretanto, possui aceleração em seu movimento de rotação ao redor do Sol, o que o torna um sistema quase-inercial (MONICO, 2008).

No posicionamento por satélites, os sistemas de referência adotados são, em geral, globais e geocêntricos, tendo em vista que o movimento dos satélites ocorre ao redor do centro de massa da Terra. As estações terrestres são, normalmente, representadas em um sistema fixo à Terra (sistema terrestre). Já o movimento do satélite é descrito no sistema de coordenadas equatoriais (sistema celeste) (MONICO, 2008).

O sistema de referência geocêntrico associado ao GPS é o WGS 84 (*World Geodetic System*), com origem no centro de massa da Terra. O elipsoide de referência é o WGS 84, um elipsoide de revolução geocêntrico (MONICO, 2008). Neste trabalho serão abordados os sistemas de coordenadas cartesiano, geográfico e plano (projeção UTM), todos com referenciados ao WGS 84.

Já no Brasil, o sistema de referência oficial, adotado desde 25 de fevereiro de 2015, é o SIRGAS 2000 (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas). O SIRGAS 2000 corresponde a segunda campanha de densificação do ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*) do SIRGAS. Até esta campanha, a sigla SIRGAS significava Sistema de Referência Geocêntrica para a América do Sul e após a segunda campanha passou a cobrir todo continente americano, passando a chamar-se Sistema de Referência Geocêntrica para as Américas (MONICO, 2008; IBGE, 2015).

Anteriormente, no Brasil, os sistemas de referência geodésicos eram o Córrego Alegre e o SAD69, utilizados concomitantemente. O Córrego Alegre era utilizado no Sistema Cartográfico Nacional e o SAD69 no Sistema Geodésico Brasileiro. Atualmente o sistema de referência foi unificado com o SIRGAS 2000 (IBGE, 2015; IBGE, 2008)

2.3.1 Sistema de coordenadas geográficas

Neste sistema a Terra é dividida em círculos chamados Paralelos e em elipses que passam pelos polos terrestres (perpendiculares aos paralelos) chamados Meridianos. Cada ponto na Terra tem um par de coordenadas geodésicas definidas por Latitude e Longitude. (SEBEM, 2010). Assim, a latitude é a distância em graus de qualquer ponto da superfície terrestre até a linha do Equador, podendo de 0° até 90° norte ou 90° sul; e a longitude é definida como a distância em graus de qualquer ponto da superfície terrestre até o meridiano de Greenwich, variando de 0° até 180° leste ou 180° oeste (CARVALHO e ARAÚJO, 2011).

2.3.2 Sistema de coordenadas cartesianas

O sistema de coordenadas cartesianas é baseado na superfície plana, nela posições são medidas usando coordenadas (x, y) a partir de um ponto de origem (CARVALHO e ARAÚJO, 2011). Se um sistema de coordenadas cartesianas está associado a

Para um sistema geocêntrico, como é o sistema de referência deste trabalho, as coordenadas cartesianas são coordenadas referenciadas a três eixos ortogonais com origem no centro de massa da terra, sendo o eixo Z orientado na direção do Polo Terrestre Convencional, o eixo X na direção média do meridiano de Greenwich e o eixo Y de modo a tornar o sistema dextrogiro (INCRA, 2013).

2.3.3 Sistema de coordenadas planas UTM

O sistema de coordenadas UTM (Universal Transversa de Mercator) é um sistema de coordenadas cartesianas plano, usando-se coordenadas x e y a partir de um ponto de origem (CARVALHO e ARAÚJO, 2011). No sistema UTM, o eixo x é denominado E (*East*) e o eixo y é denominado N (*North*). Conforme Cintra (2003), as especificações deste sistema são:

- É uma projeção cilíndrica, conforme, com uma rotação de 90° do eixo do cilindro, contido no plano do equador (transversa). Esta configuração resulta numa tangência entre o cilindro e a esfera ao longo de um meridiano;
- Adoção de 60 cilindros de eixo transversal, obtidos através da rotação do mesmo plano no equador de forma que cada cilindro cubra a longitude de 6° – sendo que cada cilindro terá um meridiano central e serão 3° de amplitude para cada lado. Os fusos são numerados de 1 a 60, a partir do antimeridiano de Greenwich.

- Cada fuso UTM está subdividido zonas. As zonas UTM estão dispostas no sentido das latitudes e cada zona UTM possui 4° de latitude (CARVALHO e ARAÚJO, 2011);
- Em latitude os fusos são limitados a 80°N e 80°S;
- Na representação plana, obtida pela abertura e planificação do cilindro, a origem das coordenadas – em cada fuso – será no cruzamento entre meridiano central e o equador;
- O eixo N terá origem no equador e começará em 0 km para norte e 10.000 km para sul. Ambos terão a amplitude de 10.000 km;
- O eixo E terá origem no meridiano central do fuso com 500 km, decrescendo para oeste e aumentando para leste.

2.3.4 Transformação de coordenadas geográficas para cartesianas

O cálculo é baseado em IBGE (1989). As notações iniciais são:

- φ – latitude geodésica;
- λ – longitude geodésica;
- h – altura elipsoidal;
- X, Y, Z – coordenadas cartesianas
- N – raio de curvatura do primeiro vertical

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}} \quad (42)$$

onde a , b são o semi-eixo maior e menor do elipsoide, e é a excentricidade do elipsoide e f é o achatamento, sendo que

$$e^2 = f(2 - f) \quad (43)$$

Para o WGS 84:

- $a = 6378160$ m;
- $f = 1/298,257223563$;

Desta forma, a transformação de coordenadas geográficas para cartesianas é dada:

$$X = (N + h) \cos \varphi \cos \lambda \quad (44)$$

$$Y = (N + h) \cos \varphi \sin \lambda \quad (45)$$

$$Z = [N(1 - e^2) + h] \sin \varphi \quad (46)$$

2.4 SENTENÇA NMEA

Conforme El-Rabbany (2002) NMEA é um acrônimo *National Marine Electronics Association* e trata-se de linhas de dados em formato ASCII, transmitido a uma taxa de 4800 bps, de um emissor para um receptor, dos quais o emissor é um dispositivo que envia dados para outros dispositivos, como, por exemplo, um aparelho GPS; e um receptor é um dispositivo que recebe os dados de outro dispositivo, como um computador com receptor de GPS na interface.

As linhas de dados NMEA podem incluir informações sobre a posição, datum, profundidade da água, entre outras variáveis. O dado é enviado em forma de sentença em que cada uma inicia com o símbolo de dólar (\$). O símbolo de dólar é seguido por cinco caracteres com campo endereçado, sendo identificações sobre o emissor (os primeiros dois caracteres), o tipo de dado e uma linha com sucessivos campos (os últimos três campos) (EL-RABBANY, 2002)

Uma das principais sentenças NMEA utilizadas em GNSS é GGA que corresponde aos dados GPS ajustados. Esta sentença representa as informações de tempo, posição e informações GNSS relacionadas. A sentença GGA é estruturada pelos seguintes termos (EL-RABBANY, 2002; BADDELEY, 2001):

- \$GPGGA: início da sentença, em que GP corresponde ao identificador do transmissor de informações, que no caso é o GPS;
- Tempo da posição no sistema UTC;
- Latitude (Norte/Sul);
- Longitude (Oeste/Leste);
- Número de satélites usados;
- HDOP (*Horizontal Dilution Of Precision*);
- Altura;
- Entre outras informações.

2.5 MARCO GEODÉSICO

A NBR 14166 define (IBGE, 1989):

- **Marco geodésico:** ponto geodésico planimétrico da Rede de Referência Cadastral implantado e materializado no terreno;

- **Marco geodésico de precisão:** Marco geodésico obtido por poligonação, triangulação, trilateração, dupla irradiação, rastreamento de satélites do sistema GPS-NAVSTAR no método diferencial ou outro método geodésico que vier a ser desenvolvido, com a finalidade de transportar o apoio geodésico básico do Sistema Geodésico Brasileiro - SGB - às proximidades e/ou ao interior da área municipal.

2.6 ANDROID

O Android é um sistema operacional móvel baseado numa versão modificada do Linux, gratuito e de código aberto, liberado sob a Licença Apache de código aberto (LEE, 2011). É uma plataforma de desenvolvimento para aplicativos móveis, com uma interface visual rica, com diversas aplicações já instaladas e um ambiente de desenvolvimento bastante poderoso, inovador e flexível (LECHETA, 2010).

O Android foi construído de forma básica de modo a permitir que o desenvolvedor explore ao máximo os recursos disponíveis para criar aplicativos à sua maneira. Para o desenvolvimento destes são disponibilizadas ferramentas e APIs pelo Android SDK (*Software Development Kit*) que por sua vez utiliza-se de uma IDE (*Integrated Development Environment*), que é o ambiente de desenvolvimento integrado, utilizando-se das linguagens Java e XML (VIANA; PONTES, 2012).

2.6.1 Estrutura do Android

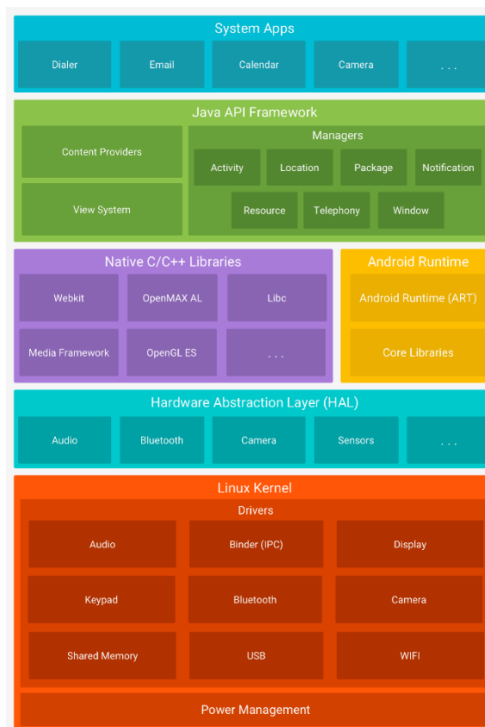
Conforme é apresentado no site oficial (ANDROID DEVELOPERS, 2019a), o sistema operacional Android é uma pilha de software com base em Linux de código aberto criada para diversos dispositivos e fatores de forma. A estrutura da plataforma pode ser dividida da seguinte forma:

- **Kernel do Linux (*Linux Kernel*):** é a fundação da plataforma. Usar um kernel do Linux permite que o Android aproveite os recursos de segurança principais e que os fabricantes dos dispositivos desenvolvam drivers de hardware para um kernel conhecido;
- **Camada de abstração de hardware (*Hardware Abstraction Layer, HAL*):** fornece interfaces padrão que expõem as capacidades de hardware do dispositivo para a estrutura da Java API de maior nível. A HAL consiste em módulos de biblioteca, que implementam uma interface para um tipo específico de componente de hardware;

- **Android Runtime (ART):** O ART é projetado para executar várias máquinas virtuais em dispositivos de baixa memória executando arquivos DEX, um formato de bytecode projetado especialmente para Android, otimizado para oferecer consumo mínimo de memória. Para Android versão 5.0 ou mais recentes, o aplicativo executa o próprio processo com uma instância própria do ART. Abaixo desta versão, o Dalvik era o tempo de execução do Android;
- **Bibliotecas C/C++ nativas:** Vários componentes e serviços principais do sistema Android, como ART e HAL, são implementados em código nativo que exige bibliotecas nativas programadas em C e C++. A plataforma Android fornece as Java Framework APIs para expor a funcionalidade de algumas dessas bibliotecas nativas aos aplicativos;
- **Estrutura da JAVA API:** O conjunto completo de recursos do SO Android está disponível pelas APIs programadas na linguagem Java. Essas APIs formam os blocos de programação que você precisa para criar os aplicativos Android simplificando a reutilização de componentes e serviços de sistema modulares e principais;
- **Aplicativos do Sistema (*Application System*):** Os aplicativos do sistema funcionam como aplicativos para os usuários e fornecem capacidades principais que os desenvolvedores podem acessar pelos próprios aplicativos.

De forma simples, a arquitetura da plataforma pode ser visualizada na Figura 3.

Figura 3 – Arquitetura do sistema operacional Android.



Fonte: Android Developers (2019a).

2.6.2 Java

Java é uma linguagem de programação orientada a objetos desenvolvida pela Sun Microsystems utilizada no desenvolvimento de projetos. É considerada uma linguagem robusta que roda em vários tipos de plataformas. Existem vários tipos de IDEs (*Integrated Development Environment*) que utilizam linguagem Java como padrão (SANTOS, 2004).

Em Android, Java é uma das linguagens de programação para escrever o *back-end* de aplicativos, além de Kotlin e C++ (ANDROID DEVELOPERS, 2019b).

2.6.3 XML

Conforme W3schools (2019) XML (*Extensible Markup Language*) é uma linguagem de marcação extensível projetado para armazenar e transportar dados. O XML é bastante simples, sendo auto descritivo e formada por *tags* que estruturam o corpo do documento. Uma das suas vantagens é não possuir *tags* pré-definidas e podem ser definidas pelo usuário.

Em Android, os elementos da IU (Interface de Usuário) são declarados em XML. O Android fornece um vocabulário XML direto que corresponde às classes e subclasses de visualização. Ao declarar a IU no XML, é possível separar a apresentação do seu aplicativo do código que controla o comportamento dele (ANDROID DEVELOPERS, 2019c).

2.6.4 SQLite

Conforme SQLite (2017) o SQLite é uma ferramenta de banco de dados SQL adaptável, *open source*, multiplataforma que lê e escreve os dados diretamente em arquivos no disco. O SQLite não possui processo de servidor separado, pois ele é o próprio servidor. É um banco de dados completo, suportando múltiplas tabelas, índices, *triggers* e *views*.

O SQLite vem sendo cada vez mais utilizado em aplicações visto sua praticidade de ser multiplataforma, depender pouca memória, ser compatível com sistemas 32bits e 64bits, suportar quantia considerável de dados, etc.

Segundo Réquia (2013, p. 29) “uma coisa importante é que o SQLite está disponível no sistema operacional Android, sem necessitar de qualquer alteração”. Para isso, utiliza-se de um arquivo diretamente no disco no formato .db ou .db3.

3 MATERIAIS E METODOLOGIA

3.1 DESENVOLVIMENTO DO APLICATIVO ANDROID C7-CDA

O aplicativo móvel C7-CDA foi desenvolvido em plataforma Android, devido ao caráter gratuito e *open source* da plataforma, além de possibilitar o acesso aos vários recursos dos dispositivos, tanto de *hardware* como *software*. A IDE (*Integrated Development Environment*) utilizada foi o Android Studio v. 3.5.2 – ambiente de desenvolvimento oficial do Android – utilizando-se das linguagens Java, para o *back-end*, e XML (*Extensible Markup Language*), para a interface de usuário (*front-end*).

3.1.1 Front-end

O *front-end* foi desenvolvido de forma simples e objetiva. As funções expostas na interface de usuário são divididas pelas atividades relacionadas as estações base (marcos geodésicos) e as atividades relacionadas ao ajustamento. Estas opções são apresentadas na tela inicial do aplicativo juntamente com a opção Info, na qual são apresentadas as informações relacionadas as entidades e membros envolvidos no desenvolvimento do aplicativo (Figura 4). Estão expostos também o nome do aplicativo (C7 CDA) e nome do projeto (CR Campeiro 7) ao qual o aplicativo está atrelado.

Figura 4 – Tela inicial do aplicativo.



Fonte: Acervo do autor.

Das atividades relacionadas as estações base, desenvolveu-se a interface de usuário para cadastro e edição de marcos geodésicos que servirão como parâmetro de ajustamento. A interface desenvolvida em XML para este propósito pode ser visualizado na Figura 5. Nesta interface é possível realizar a edição de estações existentes e inserção de novas estações. Os campos editáveis são referentes ao código da estação base, nome, entidade responsável, unidade federativa (UF), município e coordenadas geográficas (latitude, longitude e altitude) em formato sexagesimal. A partir das coordenadas geográficas, as coordenadas cartesianas e UTM são calculadas automaticamente.

Figura 5 – Tela de cadastro e edição de estações base.

Cadastro de Estação Base

Cadastrar/Atualizar

Lista de Estações Base
(Projeto - Código da estação base)

002A
005A
005B
006A
006B
008A
008B
010A
010B
018A
018B

Voltar

Cadastro de Estação Base

Atualizar existente

Base: 005A

Código:

Nome:

Entidade:

UF: Município:

Coordenadas Geográficas da Estação

Latitude: ° ' "

Longitude: ° ' "

Altitude: Ok

Coordenadas Decimais
Latitude: -30.068722
Longitude: -51.12165

Coordenadas Cartesianas
x: 3467571.111
y: -4300732.253
z: -3177014.429

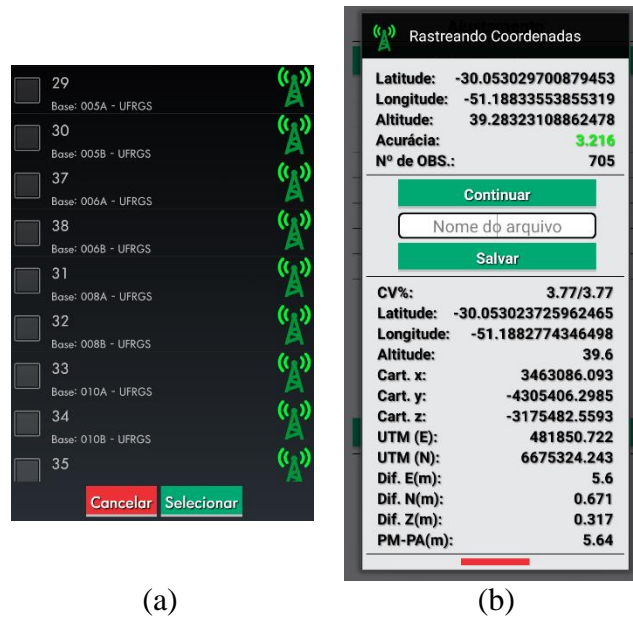
Coordenadas UTM
N: 6673593.429
E: 488275.227

Voltar
Excluir
Atualizar

Fonte: Acervo do autor.

Já as atividades relacionadas ao ajustamento de observações foram dispostas, em sequência, a interface de seleção das estações bases (Figura 6a), que serão utilizadas como parâmetro de ajustamento do levantamento em questão, e a interface para iniciar a coleta das observações, que serão utilizadas no ajustamento, e ao final do rastreamento a coleta é finalizada e o arquivo contendo as coordenadas ajustadas é gerado e armazenado (Figura 6b). Na tela da Figura 6b também estarão presentes variáveis como coordenadas de cada observação, coeficiente de variação e diferenças nas componentes planialtimétricas (x, y, z) (Figura 6).

Figura 6 – Atividades para o ajustamento de observações. (a) Tela de seleção dos marcos geodésicos que serão parâmetros do ajustamento; (b) Tela de rastreo das observações e armazenamento do arquivo das coordenadas ajustadas



Fonte: Acervo do autor.

3.1.2 Back-end

A aplicação foi desenvolvida em Java, trabalhando-se dessa forma com a programação orientada a objetos. Conforme foi feito com a interface, as classes Java também foram desenvolvidas para executar as duas atividades básicas do aplicativo: cadastrar as estações bases e realizar o ajustamento a partir da coleta e processamento de observações geodésicas.

Para o cadastro das estações, criou-se uma classe com extensão da classe *SQLiteOpenHelper* – classe Android nativa auxiliar – para criar o banco de dados SQLite na memória interna do dispositivo que armazena as informações de cada estação base cadastrada. A classe é então instanciada na classe que contém as rotinas de cadastro e edição de estações base existentes.

Na edição das estações base, a rotina apenas irá chamar a estação base selecionada e, ao final, irá modificar no banco de dados os dados da referida estação e, se necessário, irá recalculá-las para a estação. Para o cadastro, serão inseridas as informações alfanuméricas e as coordenadas geográficas da estação, a partir das quais serão calculadas as coordenadas decimais, cartesianas e UTM.

Foi implementada uma classe responsável pela coleta, armazenamento e ajustamento das observações obtidas pelo receptor GNSS do smartphone. Ao ser verificado que o GPS do

smartphone está recebendo sinal, a classe inicia a coleta e armazenamento das localizações. A partir desta verificação, a coleta de observações ocorre a cada vez que as coordenadas recebidas pelo smartphone são atualizadas, obtidas pelo método Android *onGpsLocationChanged*. Cada coordenada recebida é armazenada em um vetor para cada uma de suas componentes (latitude, longitude, altitude elipsoidal) em coordenadas geográficas, além de ser contabilizado o número de observações recebidas. As coordenadas são obtidas através da leitura de mensagens NMEA recebidas pelo GNSS do dispositivo móvel. Cabe ressaltar que as coordenadas só são armazenadas quando a acurácia do smartphone, obtidas pelo método Android *getAccuracy*, for menor que 5 metros.

Ao armazenar as coordenadas, algumas operações que precedem o ajustamento são efetuadas já, como a transformação de coordenadas geodésicas para cartesiana e as somas e somas quadráticas dos componentes planialtimétricas (latitude, longitude, altitude elipsoidal).

Ao obter-se 2000 observações – máximo de observações estabelecido – ou então se a coleta é parada, é iniciado o processo de ajustamento das observações. Foram utilizadas 2000 observações como limiar de coleta para que, pela latência de coleta, o levantamento dure em torno de 40 minutos – sendo tempo o suficiente para o aplicativo observar diferentes configurações das constelações GNSS e também para que o aplicativo possa ter uma *flag* de parada para que o vetor de informações não fique demasiadamente grande.

Na função de ajustamento são calculadas medidas de dispersão como variância, desvio padrão, coeficiente de variação e erro padrão para cada componente planialtimétrica, e posteriormente os sistemas matriciais envolvidos no ajustamento. Ao final do processo são obtidas as coordenadas ajustadas do ponto levantado. Além disso, é efetuado o cálculo do ponto médio, dado pela razão entre a soma das coordenadas e o número de observações.

3.2 DISPOSITIVO MÓVEL UTILIZADO NOS TESTES

O dispositivo móvel utilizado nos testes do aplicativo foi o smartphone Moto G7 Power, da marca Motorola e modelo XT 1955-1 (Figura 7), com sistema operacional Android versão 9 (Pie). O smartphone, com tela de 6,2 polegadas, possui dois processadores quad-core de 1,8 GHz cada, memória RAM LPDDR3 de 3GB e memória interna de 32 GB.

O dispositivo possui, entre outros sensores, receptor GNSS com capacidade de recepção de sinais NAVSTAR-GPS, GLONASS e BeiDou, além de pode ser utilizado no modo A-GPS (*Assisted-GPS*), também chamado de modo “GPS+Redes”.

Figura 7 – Ilustração do smartphone Motorola G7 Power utilizado no estudo.



Fonte: <https://www.motorola.com.br/moto-g7-power/p>. Acesso em: 16 de mar. de 2020.

3.3 LOCAL DO ESTUDO

O estudo foi realizado no Campus do Vale da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), no município de Porto Alegre/RS (Figura 8). Este local foi escolhido devido à grande disponibilidade de marcos geodésicos. Estes marcos são de responsabilidade da SUINFRA (Superintendência de Infraestrutura) da UFRGS e a documentação sobre estes pode ser obtida abertamente em Suinfra (2019).

Figura 8 – Mapa imagem dos marcos geodésicos da UFRGS selecionados para a realização do trabalho, localizados no Campus do Vale da UFRGS, no município de Porto Alegre/RS.



Fonte: Acervo do autor.

Dos marcos com documentação disponível, escolheu-se 10 marcos geodésicos da rede da UFRGS, codificados como 005A, 005B, 006A, 006B, 008A, 008B, 010A, 010B, 018A e 018B. A tabela a seguir expõe as informações da posição geográfica de cada marco (Tabela 1).

Tabela 1 – Relação de marcos geodésicos utilizados no estudados e suas respectivas coordenadas geográficas e UTM.

Marco	Coordenadas Geográficas (Decimais)		Coordenadas UTM (Fuso 22 Sul)		Altura Geométrica (m)
	Latitude	Longitude	E (m)	N (m)	
005A	-30,068722	-51,121650	488.275,2271	6.673.593,4171	90,936
005B	-30,068373	-51,121406	488.298,7030	6.673.6321146	92,686
006A	-30,070605	-51,118464	488.582,5139	6.673.385,0854	70,535
006B	-30,071155	-51,118768	488.553,2779	6.673.324,1098	68,579
008A	-30,071738	-51,119735	488.460,1471	6.673.259,4107	68,672
008B	-30,071340	-51,119877	488.446,4152	6.673.303,4985	68,146
010A	-30,074133	-51,119820	488.452,2331	6.672.994,0135	67,698
010B	-30,073650	-51,120970	488.341,3440	6.673.047,4178	67,292
018A	-30,073690	-51,124220	488.028,0809	6.673.042,6262	45,852
018B	-30,074111	-51,123436	488.103,6943	6.672.996,0750	44,735

Fonte: adaptado de Suinra (2019).

Os marcos foram selecionados de modo a formar um polígono com linhas-base curtas entre cada um dos vértices – menor que 20 km – já que o aplicativo não trabalha com correções, como ionosférica (MONICO, 2008). Além disso, selecionou-se marcos ao redor do campus de forma que contivessem diversas configurações no seu entorno, de modo a verificar a influência da vizinhança dos vértices na qualidade do ajustamento pelo aplicativo, e que também, sobretudo, estivessem em bom estado de conservação.

Conforme as descrições contidas na documentação, o levantamento de cada marco foi realizado por rastreios de cerca de 40 minutos sobre os pontos utilizando o equipamento GTR-A BT. Os levantamentos foram realizados no ano de 2016, implantando marcos do tipo Tronco Piramidal. O Datum utilizado foi o SIRGAS2000 e o elipsoide de referência o GRS80. Além disso, tiveram como base de referência da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo) a base POAL.

3.4 COLETA DAS OBSERVAÇÕES

A coleta das observações foi realizada pelo aplicativo, sendo realizada sobre marcos geodésicos de coordenadas conhecidas. Os marcos geodésicos consistiram nos marcos da UFRGS, localizados no Campus do Vale. Foram selecionados 9 marcos codificados como 005A, 005B, 006A, 006B, 008A, 008B, 010A, 010B e 018A. Os marcos foram selecionados de

modo a configurar um polígono, sendo que o 008A, 008B e 010B ficam inseridos no interior deste polígono.

Os marcos geodésicos foram selecionados como estações base para servir de parâmetro no ajustamento. A cada coleta efetuada sobre um marco, utilizava-se todos os outros marcos como estação base para o ajustamento, com exceção daquele que estivesse sendo levantado.

No momento das coletas, foram tomadas notas de algumas especificações como o horário de início e fim das coletas, para controlar o tempo de coleta necessário, a condição climática no momento, para averiguar a ocorrência de condições desfavoráveis, principalmente quanto a ocorrência acentuada de nuvens, e o entorno do ponto, no que diz respeito a obstruções que possam afetar os sinais GNSS.

Antes de iniciar a coleta das observações, o modo de localização do smartphone era definido como “Apenas GPS”, o qual utiliza-se apenas de observações provenientes de satélites GNSS. Outro modo de localização é o A-GPS (*Assisted-GPS*), o qual consiste no uso de efemérides GNSS preditas transmitidas por redes de telefonia para reduzir a área de pesquisa do sinal GNSS e então melhorar a precisão da coleta de observações (TOMAŠTÍK et al., 2017). Djuknic e Richton (2001) salientam que este sistema beneficia as zonas urbanas, pois a rede de telefonia é densa, entretanto para zonas rurais, onde as estações são escassas, o sistema não é tão efetivo. Além disso, Tomaščík et al. (2017) aponta que a versão do sistema operacional também afeta na aquisição de observações A-GPS. Desta forma, preferiu-se pela utilização apenas do sensor GNSS do dispositivo para que se tenha independência, seja da melhoria ou deterioração do sinal causado pelo A-GPS.

Para iniciar as coletas, o smartphone era posicionado sobre o marco geodésico, na horizontal, aproximando o centro do smartphone junto ao centro do marco geodésico. Esta metodologia foi tomada devido ao fato de não se ter conhecimento da localização do centro de fase da antena GNSS dentro do smartphone. Além disso, cabe salientar que, devido as altas temperaturas diárias ocorridas nos dias em que foram realizados os levantamentos, foi utilizado uma estrutura simples de plástico que cobrisse o smartphone para que o mesmo não sofresse superaquecimento, impossibilitando que o equipamento se desligasse – procedimento padrão dos smartphones ao superaquecer – ou que danificasse o *hardware* do aparelho. A estrutura utilizada foi escolhida de modo a não deteriorar ou impedir a recepção correta das ondas GNSS pelo dispositivo.

Ao iniciar, as observações eram coletadas com a latência um segundo, conforme fora programado no aplicativo. Ressalta-se que as observações só eram obtidas caso a condição de

que a acurácia posicional do dispositivo no momento, dada pelo *getAccuracy*, fosse melhor que 5 metros fosse satisfeita.

A coleta das observações durava até o momento em que o número de observações chegasse a dois mil. Nesse momento, um arquivo contendo informações da coleta e do ajustamento era armazenado na memória interna do dispositivo móvel e era encerrada a coleta.

3.5 MEDIDAS ESTATÍSTICAS

As medidas estatísticas neste trabalho foram voltadas à análise da acurácia a partir da dispersão das medidas em cada levantamento, comumente usadas em navegação e geodésia. Ao estar avaliando-se a acurácia do ajustamento, também estará sendo avaliada a precisão (MONICO et al., 2009). Assim, as estatísticas utilizadas para avaliar a dispersão dos levantamentos e a acurácia obtida pelo ajustamento serão apresentadas nas seções abaixo.

3.5.1 Coeficiente de variação

Conforme Moretin e Bussab (2010) o desvio padrão nem sempre é uma medida resistente pois pode ser afetado pela magnitude dos dados. Para isso, o coeficiente de variação (CV) é mais eficiente para avaliar a variabilidade e permitir melhor comparação entre conjuntos de dados distintos. O coeficiente de variação é dado pela razão entre o desvio padrão (σ) e a média da amostra (\bar{X}) (Equação 47)

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{X}} \quad (47)$$

O desvio padrão é dado pela raiz quadrada do média do quadrado dos desvios, conforme é exposto na Equação x (MORETIN e BUSSAB, 2010):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n}} \quad (48)$$

onde X_i é a i -ésima observação e n é o número total de observações.

3.5.2 Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE)

O FGDC (Comitê Federal de Dados Geográficos) dos Estados Unidos determina o RMSE (*Root Mean Square Error*), ou Raiz do Erro Médio Quadrático, como estimador de acurácia posicional. Conforme o FGDC (1998) a precisão é reportada em distância como intervalo de confiança de 95%, ou seja, 95% das observações terão um erro posicional em relação a verdadeira posição igual ao valor obtido pelo RMSE. Assim, o RMSE reflete todas as incertezas.

O RMSE será dado pela raiz quadrada do conjunto de diferenças quadráticas entre os valores das coordenadas do conjunto de dados e de valores de referência para determinado levantamento (FGDC, 1998). Desta forma, foi utilizado como parâmetro o próprio valor verdadeiro de cada marco levantado no estudo, expostos na Tabela 1.

O cálculo do RMSE, de acurácia horizontal de 95%, é dado então pela Equação 49 (FGDC, 1998; LOPES, 2019):

$$RMSE_{95} = 1,7308 \times RMSE_{68} \quad (49)$$

onde $RMSE_{68}$ é o RMSE com intervalo de confiança de 68% de acurácia horizontal, dado pela raiz quadrada da soma dos quadrados do RMSE das componentes posicionais horizontais:

$$RMSE_{68} = \sqrt{RMSE_x^2 + RMSE_y^2} \quad (50)$$

em que o $RMSE_x$ e $RMSE_y$ são calculadas separadamente pelas equações 51 e 52 respectivamente:

$$RMSE_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_r)^2}{n}} \quad (51)$$

$$RMSE_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y_r)^2}{n}} \quad (52)$$

onde:

- X_i, Y_i são as i -ésimas coordenadas horizontais observadas, em latitude e longitude;
- X_r, Y_r são as coordenadas horizontais de referência, em latitude e longitude;
- n é o número total de observações.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O aplicativo foi finalizado e testado a partir de levantamentos, apresentando funcionamento satisfatório na realização dos objetivos propostos de cadastro e armazenamento de estações base, coleta de observações geodésicas e aplicação da técnica de ajustamento nas observações. Os resultados dos levantamentos e ajustamentos serão descritos abaixo.

Os levantamentos foram realizados nos dias 23, 24 e 30 de novembro de 2019, no turno da tarde, entre as 15 e as 18 horas aproximadamente. As condições climáticas nos referidos dias tiveram com ocorrência de céu aberto ou sol entre nuvens. Devido à proximidade entre os marcos geodésicos, foram levantados quatro marcos em cada um dos dois primeiros dias e os dois últimos marcos no último dia. A mesma metodologia foi aplicada no levantamento de observações em todos os marcos, utilizando cerca de 40 a 50 minutos para obter 2000 observações de coordenadas sobre cada marco de referência utilizando o aplicativo.

A partir das observações levantadas em cada marco geodésico, utilizando-se da metodologia apresentada, obteve-se as coordenadas do ponto ajustado pelo aplicativo expostas na Tabela 2. Nessa tabela são apresentadas também as diferenças entre os pontos ajustados e os respectivos marcos geodésicos de referência e acurácia média do levantamento do ponto – dado pelo método Android *getAccuracy*. As discrepâncias entre as coordenadas de referências e ajustadas são apresentadas nas componentes horizontais individualmente e na distância euclidiana. Para fins de comparação, são utilizadas coordenadas métricas UTM com as componentes horizontais latitude e longitude representadas por N (Norte) e E (Leste), respectivamente.

Tabela 2 – Coordenadas obtidas pelo ajustamento realizado no aplicativo, diferenças do ajustamento em relação ao marco de referência e acurácia média das observações dos levantamentos

Marcos Geodésicos	Coordenadas Ajustadas		Diferenças			Acurácia Média (m)
	E (m)	N (m)	E (m)	N (m)	Distância Horizontal (m)	
005A	488.277,006	6.673.593,533	1,779	0,116	1,7827	3,219
005B	488.299,145	6.673.631,617	0,442	0,498	0,6655	3,302
006A	488.581,978	6.673.383,488	0,536	1,597	1,6849	3,252
006B	488.551,099	6.673.324,421	2,179	0,311	2,2010	3,598
008A	488.464,912	6.673.256,962	4,765	2,449	5,3573	3,645
008B	488.448,269	6.673.298,434	1,854	5,065	5,3932	3,359
010A	488.452,402	6.672.993,103	0,169	0,910	0,9260	3,979
010B	488.341,190	6.673.049,129	0,154	1,711	1,7182	3,253
018A	488.031,013	6.673.042,357	2,932	0,269	2,9444	3,234
018B	488.104,533	6.672.995,244	0,839	0,831	1,1807	3,261

Fonte: Acervo do autor.

No montante das discrepâncias do ajustamento em relação as coordenadas de referência, as componentes horizontais E e N apresentaram uma média nas diferenças de 1,565m e 1,376m, respectivamente, e o erro médio da distância foi de 2,385m. Já acurácia média de todos os levantamentos foi de 3,41 metros. A acurácia média apresentada na Tabela 2 refere-se a média de todas as acurácias do levantamento obtidas pelo método Android *getAccuracy*, que estima o valor radial de probabilidade, com 68% de confiança, de que o valor correto da localização esteja dentro deste raio em torno da observação (ANDROID DEVELOPERS, 2019d).

Desta forma, percebe-se que a discrepância média da distância horizontal atende ao raio estimado de acurácia dado pelo Android. Entretanto, a média entre as medidas não representa de forma correta o conjunto dos levantamentos, pois observa-se na Tabela 2 que os levantamentos apresentam grande variabilidade, tanto nas discrepâncias das componentes horizontais, individualmente, como na distância horizontal. Isto pode ser evidenciado nos coeficientes de variação (CV) destas variáveis, visto que o CV das componentes horizontais E e N foi de 89,01% e 103,181%, e na distância foi de 67,68%.

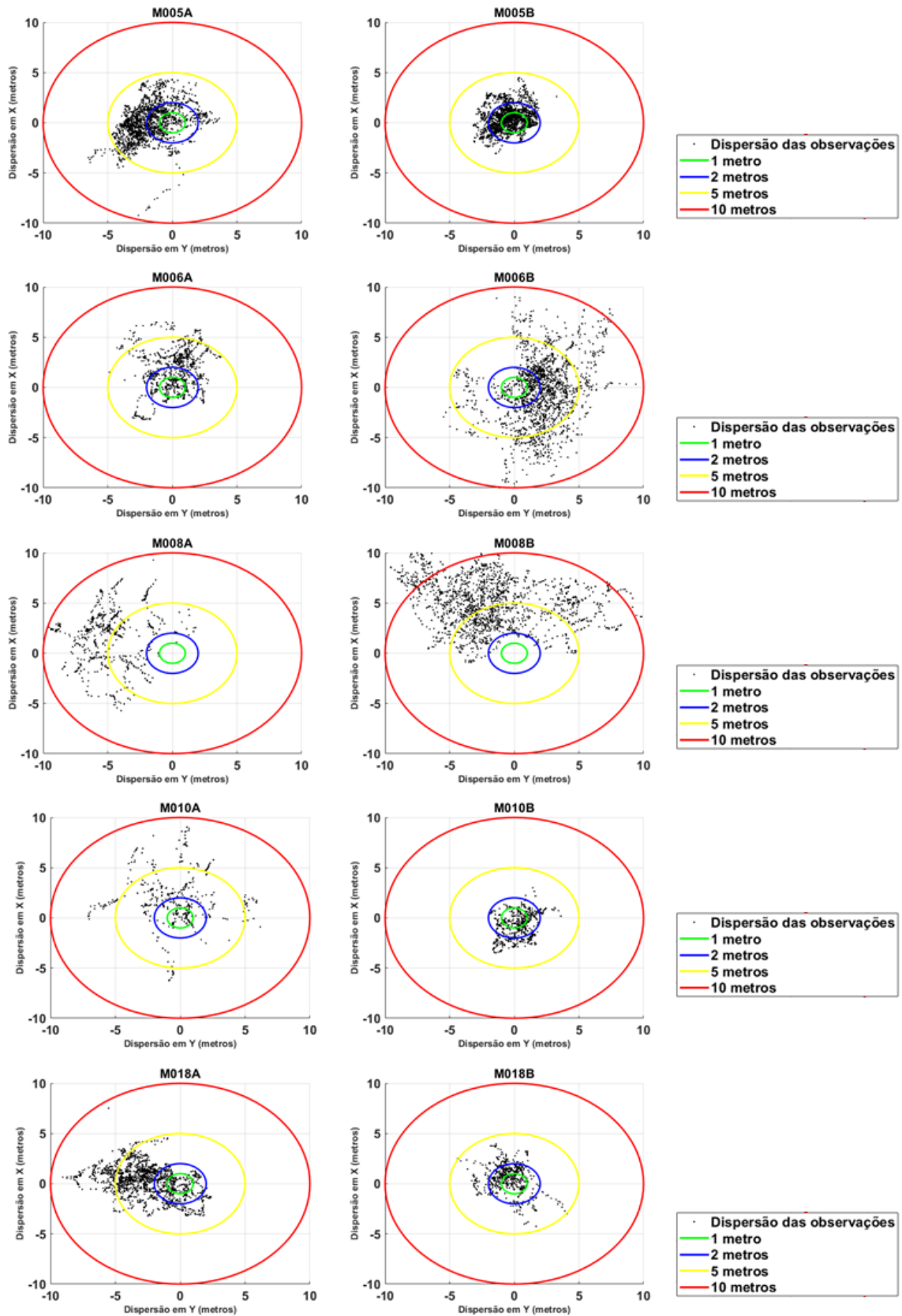
A alta variabilidade entre os diferentes levantamentos pode ser explicada pelos diferentes ambientes em cada um dos levantamentos. Devido distribuírem-se em meio a um ambiente urbanizado, os marcos geodésicos localizam-se, em geral, próximos de obstáculos

que podem interferir no sinal GNSS, como vegetação e prédios, possibilitando condições críticas de erros em posicionamento. Ao possibilitar condições críticas ao posicionamento, como multicaminho e condições atmosféricas adversas, a suposição de distribuição normal das observações pode não ser válida (LUO, MAYER e HECK, 2011). De acordo com Pesyna, Heath e Humphreys (2014) a baixa supressão do multicaminho, juntamente com o padrão de ganho irregular da antena, são os principais fatores de erro em observações GNSS realizadas por dispositivos de baixo custo. Dessa forma, em alguns marcos geodésicos, a interferência do sinal GNSS foi excessiva de modo que o ajustamento foi prejudicado substancialmente, apresentando resultados piores do que a própria acurácia do aplicativo apontava.

Os marcos 008A e 008B são dois exemplos de condição crítica de interferência. Conforme pode ser brevemente visualizado na Figura 8, ambos os marcos estão localizados sob vegetação fechada, com condições muito pequenas ou nulas de visualização do satélite sem interferências da vegetação, dependendo do azimute de visada do satélite. Desta forma, a distribuição espacial das observações é prejudicada e a frequência de erros de maior ordem torna-se constante, conforme pode ser visto na Figura 9 e Figura 10. Na Figura 9 é apresentada a dispersão espacial em relação ao marco de referência de cada um dos pontos observados de cada levantamento e na Figura 10 é mostrado o histograma de frequência dos erros, em distância horizontal euclidiana das observações em relação ao marco de referência. Ambas figuras foram plotadas e calculadas no *software* MatLab®.

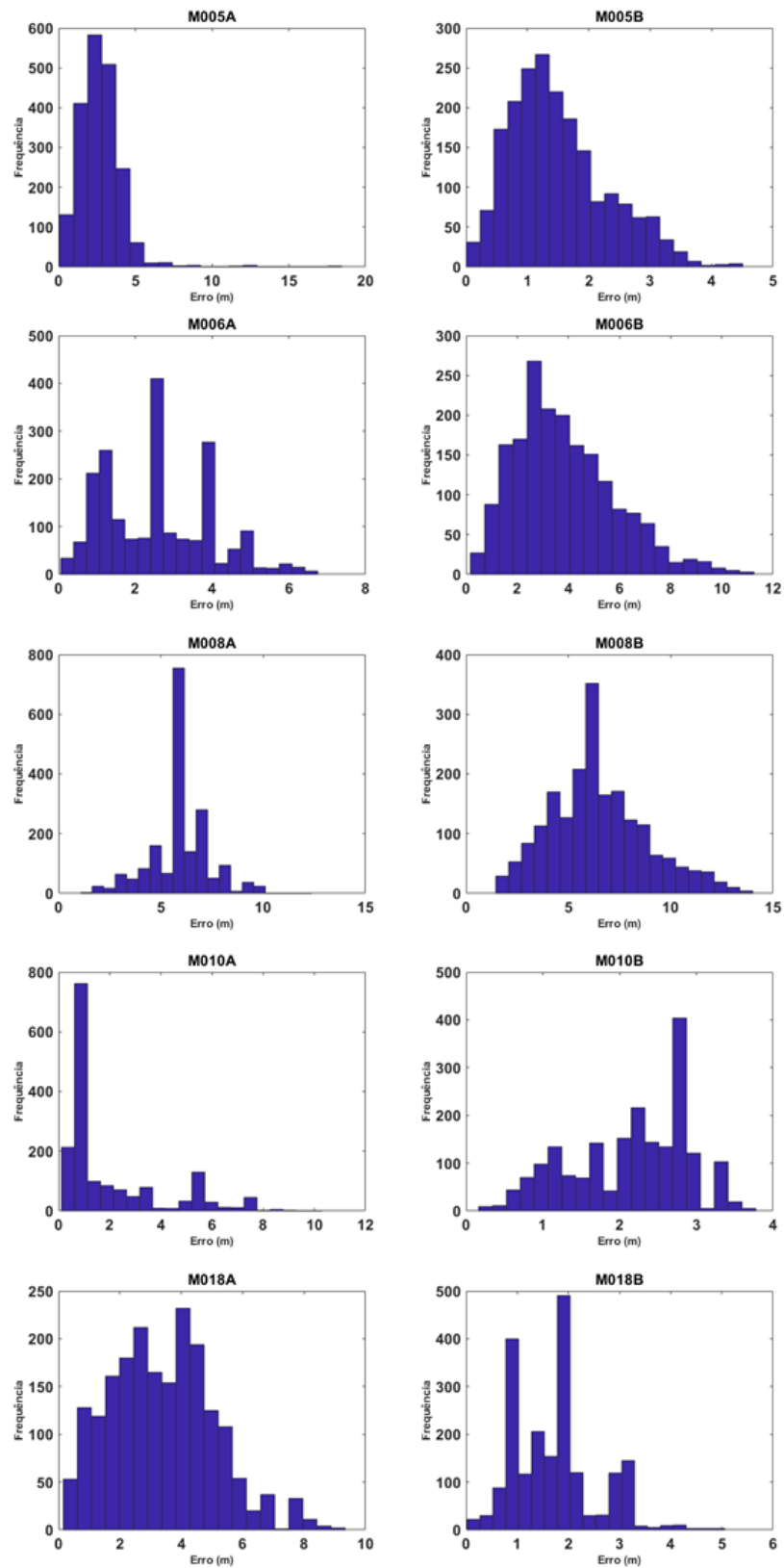
Ao relacionar as informações da Tabela 2 com a Figura 9 e a Figura 10, percebe-se que os levantamentos com as piores dispersões no espaço estão relacionados aos marcos geodésicos com mais obstáculos no seu entorno. Visualmente, nota-se os marcos 006B, 008A, 008B e 018A com as piores dispersões em torno do ponto de referência e, ao comparar com os dados da Tabela 2, é possível averiguar que estes marcos tiveram as maiores discrepâncias em relação a referência, todos com mais de 2 metros de distância.

Figura 9 – Dispersão espacial das observações em torno do marco de referência dentro dos raios de 1, 2, 5 e 10 metros.



Fonte: Acervo do autor.

Figura 10 – Frequência das diferenças de distância horizontal entre o marco de referência e as observações.

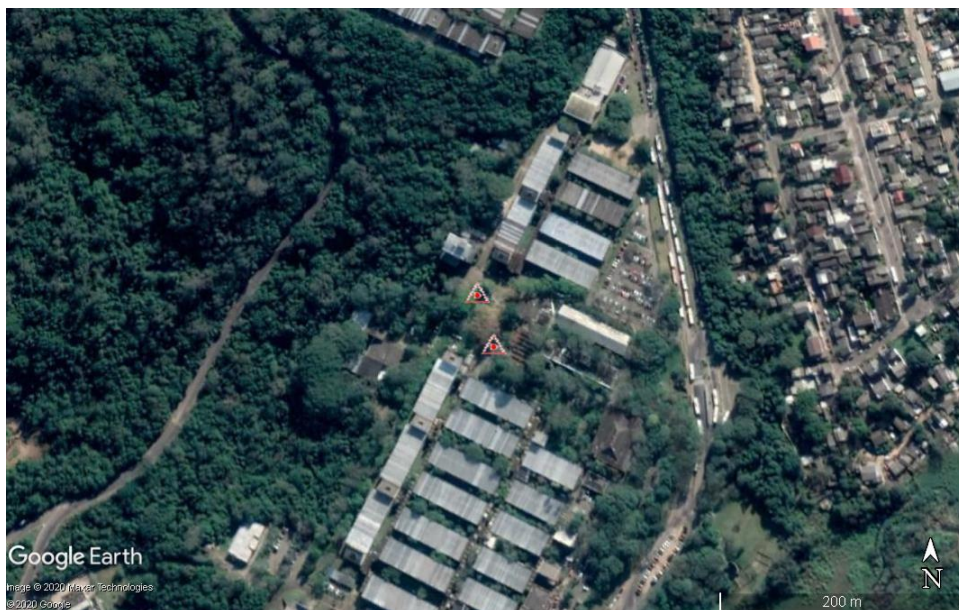


Fonte: Acervo do autor.

Os marcos 008A e 008B, citados anteriormente, apresentaram as piores acurácias de posicionamento com 5,3573 e 5,3932 metros respectivamente, sendo ambos maiores que a acurácia média dada pelo Android, que foi de 3,645 metros para 008A e 3,359 metros para 008B. O marco 008A apresentou a distribuição das suas observações dispersas com grande variabilidade espacial, com o maior conjunto de suas observações localizadas entre 5 e 10 metros de distância do ponto de referência, como poder ser visualizado na Figura 10. Já no 008B, a dispersão das observações foi maior e seu histograma apresentou frequência de erros distribuídas majoritariamente entre 5 e 10 metros, mas a amplitude do histograma de erros atingiu até quase 15 metros.

Assim, a maior densidade de erros na região dos 5 metros raio possibilitou a tendência do ajustamento para esta região, prejudicando a acurácia do ajuste. A variabilidade pode ser explicada pela grande interferência do sinal causada pela vegetação que cobrem os marcos geodésicos (Figura 9) em praticamente toda sua visada vertical, além de possuir alguns prédios na vizinhanças que podem potencializar o multicaminho, como mostra a Figura 11.

Figura 11 – Visão superior dos marcos 008A e 008B.



Fonte: Google Earth Pro (2019)

Como mostrou Tomaščík et al. (2017), a presença de vegetação no entorno do levantamento pode piorar a acurácia do posicionamento de 2 a 6 vezes, que corrobora a distribuição espacial das observações dos levantamentos em 008A e 008B, os quais apresentam um grande número de observações que estão afastadas mais de 5 metros da referência e atingindo quase 15 metros em alguns casos. A tendência causada pelo grande número de

observações deslocadas da referência prejudicou a acurácia do ajuste. Por outro lado, percebe-se que nos dois marcos – 008A e 008B – as observações são precisas, pois estão dispersas espacialmente de forma agrupada em torno de um valor médio, formando uma curva normal ao redor desta média. Deste modo, as medidas são precisas, mas a presença exagerada e constante de erros sistemáticos desloca a média da distribuição dos erros para valores altos, afetando a acurácia do ajustamento, visto que as observações possuem tendência para valores afastados da referência.

O levantamento no marco geodésico 006B também se destaca pela alta variabilidade espacial em torno da coordenada de referência (Figura 9). Da mesma forma, na Tabela 2 nota-se que o ajustamento das coordenadas observadas no marco 006B apresentou uma das piores acurácias, com um erro na distância horizontal de 2,201 metros, mas ainda assim foi melhor que o valor estimado pelo *getAccuracy*, que apontava um erro de 3,598 metros. Muito embora a diferença latitudinal (eixo Y), tenha sido baixa, com 0,311 metros, a discrepância longitudinal foi 2,179 metros, deteriorando a qualidade da acurácia do ajustamento.

Ao visualizar a frequência do erro da distância horizontal em relação a referência na Figura 10, é possível averiguar que a distribuição dos erros do 006B possui uma assimetria positiva, com tendência para os menores erros. Mas os erros distribuem-se principalmente entre os 2 e 6 metros e o histograma possui amplitude grande, entre 0 a 12 metros.

Assim, no marco 006B as observações também são precisas, pois as medidas estão agrupadas principalmente em torno de um valor de maior frequência. Entretanto, o alongamento da cauda da curva para valores altos de erro acentuou a tendência para estes valores, fazendo assim com que as observações possuíssem baixa acurácia. Percebe-se então que as observações sofreram interferência de modo que se deslocaram de forma exagerada das coordenadas corretas, prejudicando o ajustamento. Os valores altos de erro em relação a referência podem ser explicados pelo fato de que o marco 006B possui grande proximidade com prédios a leste e prédios um pouco mais distantes a sul (Figura 12), possibilitando a ocorrência do multicaminho.

Figura 12 – Visão superior do marco 006B.



Fonte: Google Earth Pro (2019)

Por último, o ajustamento sobre o marco geodésico 018A apresentou o terceiro pior desempenho entre os marcos levantados, com erro horizontal para a referência de 2,944 metros, pouco abaixo da acurácia média deste levantamento que foi de 3,234 metros. Observa-se, na Figura 9, que a dispersão espacial das observações não possui variabilidade tão acentuada no eixo Y, mas o no eixo X há uma grande amplitude de variabilidade, com muitas observações entre 2 e 5 metros. Na Tabela 2 averigua-se este fato, pois a maior diferença do ponto ajustado está justamente na componente horizontal E, que corresponde ao eixo X, com 2,932 metros de erro, enquanto que na componente N, eixo Y, o erro foi de apenas 0,269 metros. Além disso, na Figura 10, percebe-se que os erros estão bem distribuídos no histograma, mas estão adensados principalmente entre 2 e 6 metros, com *outliers* maiores que 8 metros.

Quanto a precisão, no marco 018A as observações são relativamente precisas, mas ao contrário dos anteriores, a curva dos erros é achatada sendo que há presença de muitos erros com alta frequência. Neste caso, como a maioria dos erros estão na faixa de 2 a 5 metros, a tendência ocorre para essa faixa. Então, a precisão e acurácia do 018A são baixas devido à alta dispersão de erros e o afastamento da tendência em relação ao zero.

Esperava-se obter bons resultados no ajustamento de coordenadas sobre o marco geodésico 018A, pois seu entorno conta com um espaço aberto relativamente amplo quando comparado com os outros marcos. As coordenadas de latitude apresentaram boa aproximação, entretanto, a qualidade das observações foi deteriorada pelos erros nas longitudes observadas.

Nas proximidades do marco 018A, os principais obstáculos que poderiam vir a afetar a qualidade da observação são as vegetações arbóreas a sul, norte e oeste, com distância de 10 a 15 metros, e a presença de fiação elétrica de alta voltagem acima do marco (Figura 13).

Figura 13 – Vista superior do marco 018A.



Fonte: Google Earth Pro (2019).

Por outro lado, com exceção dos resultados dos quatro levantamentos descritos acima, o ajustamento foi eficaz, apresentando melhoria substancial na acurácia do posicionamento com acurácia melhor que 2 metros em todos os seis casos restantes. Além disso, os ajustamentos das coordenadas sobre os marcos 005B e 010A apresentaram acurácia centimétrica.

O ajustamento do marco 005B apresentou discrepância de 66,5 centímetros de distância em relação ao marco de referência, expressando grande melhoria em relação ao posicionamento convencional pelo smartphone, principalmente pelo fato de que a acurácia média deste levantamento foi de 3,302 metros. A qualidade do ajustamento deve-se a boa variabilidade espacial das observações em relação a referência, como pode ser visto na Figura 9, em que as observações levantadas sobre o marco 005B estão dispersas em todo o entorno do ponto central, com pouca ou nenhuma interferência do sinal GNSS na coleta das observações.

Na distribuição das frequências dos erros, observa-se a formação de uma curva normal de assimetria positiva (Figura 10), na qual os erros estão agrupados nos baixos valores entre zero e 3 metros. Além disso, sobretudo, salienta-se quanto a curva normal do histograma erros, essencial no ajustamento, apontando para uma coleta de observações eivada apenas de erros

aleatórios (GEMAEL, 1994). Destaca-se ainda que as observações sobre o 005B possuem boa precisão, visto que a maior parte das medidas estão dispersas ao redor de um valor de maior frequência e a tendência do histograma ocorre para valores baixos, de zero a 4 metros aproximadamente, apresentando boa acurácia tanto para as observações quanto para o ajustamento.

Conforme apresenta-se o histograma de erros, não há ocorrência de erros de natureza sistemática como o multicaminho devido à normalidade dos erros. Entretanto, avaliando-se o entorno do marco geodésico, percebe-se que a existe possibilidade de ocorrência de multicaminho devido à presença de um prédio a leste do marco e vegetação a sul. A norte e a oeste não há impedâncias à recepção do sinal GNSS (Figura 14).

Figura 14 – Vista superior do marco 005B.



Fonte: Google Earth Pro (2019).

Outro ajustamento que apresentou acurácia centímetrica foi do marco 010A com diferença de distância horizontal em relação a referência de 92,6 centímetros, muito superior a acurácia média deste levantamento que foi de 3,979, sendo a pior acurácia média dada pelo *getAccuracy* entre todos os levantamentos realizados. Ao observar-se a distribuição espacial das observações (Figura 9), nota-se que existe grande variabilidade espacial das observações, com muitas delas variando mais de 2 metros em relação a referência nos dois eixos cartesianos. Todavia, a variação ocorre em praticamente todo entorno do ponto de referência, sem um viés específico.

Ao avaliar-se a dispersão dos erros (Figura 10), percebe-se que o histograma expõe alta frequência nos baixos erros, entre zero e 4 metros, e alguns *outliers* entre 5 e 8 metros. Excetuando a presença dos *outliers*, a precisão deste levantamento foi ótima, visto que a os valores de erros estão agrupados em uma faixa muito estreita ao redor de um valor, de aproximadamente um metro, de alta frequência. A acurácia também foi muito boa devido a tendência aos baixos valores no histograma de erros. Dessa forma, foi possível realizar o ajustamento das coordenadas de forma a obter acurácia centimétrica.

Como foi visto, a presença de *outliers* é dispersa ao redor do ponto de referência 010A, inferindo a presença de erros sistemáticos. Tais erros podem ser explicados pelo fato do marco geodésico 010A ter presença de prédios em sua proximidade a norte, sudeste e sudoeste, mas também possui grande campo de visada aberto a leste e a sul (Figura 15).

Figura 15 – Vista superior do marco 010A.



Fonte: Google Earth Pro (2019).

Os ajustamentos sobre os marcos restantes, referentes aos marcos geodésicos 005A, 006A, 010B e 018B, também apresentaram boa eficácia na realização do ajustamento, com discrepâncias em relação ao marco abaixo de 2 metros de distância. Visando as condições dos levantamentos em zona urbanizada, a acurácia melhor que 2 metros obtida é uma melhoria com relação ao posicionamento neste tipo de ambiente (DABOVE, 2014).

O ajustamento das observações sobre o marco geodésico 018B apresentou com discrepância na distância horizontal de 1,181 metros em relação a referência e com acurácia

média de 3,261 metros. A distribuição espacial das observações é pouco variável, com adensamento no entorno do ponto de referência, com a maioria das observações dentro do raio de dois metros e com a totalidade dentro do raio de cinco metros, apresentando baixa ocorrência de erros sistemáticos nas observações e denotando boa precisão. Ao observar o histograma de frequência dos erros para o marco 018B, percebe-se que os erros estão distribuídos nos baixos valores, entre 1 e 2 metros de erro.

A baixa variabilidade das observações pode ser explicada pela localização do marco geodésico 018B. Esse foi o marco com maior campo de visada, sem impedâncias de prédios, ocorrendo apenas a presença de vegetação a aproximadamente 15 metros a sul e a norte e também presença de fiação elétrica acima do marco. Nas direções leste e oeste, o campo de visada era totalmente aberto, sendo um ambiente muito próximo ao observado no marco 018A (Figura 13).

Os ajustamentos das coordenadas levantadas sobre os marcos 005A, 006A e 010B apresentaram discrepâncias em relação as coordenadas de referência semelhantes, sendo 1,783m, 1,685m e 1,718m, respectivamente. Em relação as suas acurácias, o ajustamento apresentou grande melhoria, pois as acurácias médias dadas pelo Android foram de 3,219m, 3,252m e 3,253m. Estes três últimos marcos apresentam características semelhantes também para a distribuição espacial das observações, demonstrando boa distribuição ao redor da coordenada de referência, mas com muitos pontos entre 2 e 5 metros. Ao avaliar a frequência dos três, percebe-se que os erros nos três casos ocorrem nos baixos valores, entre zero e 5 metros. Os erros no marco 005A foram os que apresentaram maior normalidade, apontando pouca ou nenhuma presença de erros aleatórios. Já no 006A e 010B percebe-se uma distribuição com características que fogem à normalidade. Os entornos destes marcos possuem prédios nas proximidades, podendo haver a presença de erros sistemáticos nas observações coletadas, devido ao multicaminho, com exceção do 005A.

Por fim, as averiguações, tomadas anteriormente quanto a acurácia do ajustamento, foram também realizadas em relação ao RMSE (*Root Mean Square Error*). A partir do RMSE é possível avaliar a acurácia posicional do ajustamento com as próprias observações levantadas em cada marco, pois o RMSE é o estimador de acurácia posicional reportada em distância como intervalo de confiança de 95% (FGDC, 1998), visando assim averiguar qual erro médio de posicionamento das observações em relação ao marco de referência para, assim, poder comparar ao ajustamento. Os valores calculados de RMSE para cada levantamento, a 95% e a 68% de confiança, é exposto na Tabela 3.

Tabela 3 – RMSE das observações coletadas em cada marco.

Marco	RMSE(m)			
	E (m)	N (m)	68%	95%
005A	2,42174	1,97836	3,12709	5,41237
005B	1,17963	1,21655	1,69456	2,93294
006A	1,41967	2,53806	2,90813	5,03340
006B	2,90211	3,21998	4,33480	7,50267
008A	5,13971	3,32113	6,11935	10,59137
008B	4,00214	5,57271	6,86092	11,87488
010A	1,49431	2,39392	2,82203	4,88436
010B	0,96079	2,06007	2,27311	3,93429
018A	3,51654	1,38792	3,78053	6,54334
018B	1,32102	1,38006	1,91041	3,30654

Fonte: Acervo do autor.

Ao comparar os RMSE, tanto a 95% de confiança quanto a 68%, percebe-se que o erro horizontal do ajustamento (Tabela 2) foi muito menor que o erro médio das observações (Tabela 3), bem como o RMSE das componentes horizontais individuais. Para avaliar a melhoria obtida pelo ajustamento, mostra-se na Tabela 4 as diferenças entre a acurácia horizontal obtida pelo ajustamento e a acurácia horizontal média das observações dada pelo RMSE, a 95% e 68% de confiança. Os resultados da Tabela 4 são apresentados em relação a diferença métrica e a diferença percentual de melhoria obtida pelo ajustamento em relação ao próprio RMSE.

Tabela 4 – Diferenças métricas e percentuais entre o ajustamento (Ajust.) e o erro médio das observações (RMSE) a 95% de confiança (RMSE95) e a 68% de confiança (RMSE68).

Marco	Diferenças			
	RMSE68 – Ajust. (m)	RMSE68 – Ajust. (%)	RMSE95 – Ajust. (m)	RMSE95-Ajust. (%)
005A	1,3444	42,99	3,6297	67,06
005B	1,0291	60,73	2,2674	77,31
006A	1,2232	42,06	3,3485	66,53
006B	2,1338	49,22	5,3017	70,66
008A	0,7621	12,45	5,2341	49,42
008B	1,4678	21,39	6,4817	54,58
010A	1,8960	67,19	3,9583	81,04
010B	0,5549	24,41	2,2161	56,33
018A	0,8361	22,12	3,5989	55,00
018B	0,7297	38,20	2,1258	64,29

Fonte: Acervo do autor.

Desta forma, a Tabela 4 mostra, a partir das discrepâncias, que o ajustamento realizou grande melhoria na acurácia do posicionamento quando relacionada com as próprias observações que foram utilizadas no ajustamento. Muito embora as condições de ambiente, e condição estatística, não foram as ideais, o ajustamento obteve uma melhoria no posicionamento maior que 50% em relação a quase todos os RMSE a 95% de confiança, ou seja, o posicionamento obtido pelo ajustamento foi melhor que 95% das observações, com exceção apenas do levantamento realizado sobre o marco 008A, que apresentou 49,92% em relação ao RMSE95. Assim, ajustamentos que não apresentaram boa acurácia como 008A e 008B, apresentaram melhorias no posicionamento de 49,42% e 54,58%, respectivamente, em relação ao RMSE95. E também apresentaram melhoria de 12,45% e 21,39% quanto ao RMSE a 68% de confiança.

Além disso, o ajustamento apresentou melhorias na acurácia maiores que 2 metros em todos os casos em relação ao RMSE95, com a diferença mínima no marco 018B com 2,126 metros e com maior diferença no 008B com 6,482 metros de diferença. Ao RMSE a 68% de confiança, a diferença foi um pouco mais baixa, com um mínimo de 0,555 metros no 010B e máximo de 2,134 metros no marco 006B.

Portanto, em um primeiro momento, a realização do ajustamento de coordenadas geográficas demonstrou melhorias na qualidade do posicionamento nem sempre relevantes. Contudo, ao avaliar as proximidades dos marcos sobre os quais foram levantadas as observações, nota-se a possibilidade de presença de erros associados ao multicaminho, um dos principais erros sistemáticos em observações por receptores GNSS de baixo custo, como os receptores presentes em dispositivos móveis (LUO, MAYER e HECK, 2011; PESYNA, HEATH e HUMPHREYS, 2014). Cabe ressaltar também que os erros apresentados pelas distribuições espaciais com frequências não normais podem ser atribuídos ao baixo custo de antenas GNSS de receptores em dispositivos móveis, que possuem características técnicas inerentes que não permitem o posicionamento de alta acurácia, como o padrão de ganho irregular da antena (PESYNA, HEATH e HUMPHREYS, 2014), ou ainda a dificuldade de determinar-se a localização do centro de fase da antena GNSS dentro do smartphone.

A localização dos marcos é dada sob zona urbanizada, com alta presença de prédios e vegetação. Esta configuração degrada significativamente o posicionamento, seja estático ou cinemático, obtendo-se posicionamentos de acurácia piores que 4 metros nas componentes horizontais (DABOVE, 2014), além de piorar 2 a 6 vezes a qualidade do posicionamento quando há presença muito grande de vegetação no entorno (TOMAŠTÍK et al., 2017).

A presença de erros sistemáticos como o multicaminho degradam as propriedades estatísticas descritas por Gemael (1994) que salienta que as observações a serem ajustadas não podem ser eivadas de erros sistemáticos e grosseiros, apenas erros de natureza aleatória, de forma que os erros apresentados em relação a uma referência irão ter comportamento normal. Assim, a presença de erros sistemáticos faz com que a dispersão espacial das observações atinja sua distribuição para raios de distância maiores em relação a referência, criando *outliers* e prejudicando o ajustamento, como foi mostrado na Figura 9, em que percebe-se distribuição espacial anômala das observações proveniente de erros sistemáticos, comprovando-se pela Figura 10, na qual se observa o histograma dos erros na distância horizontal das observações.

Cabe ressaltar, no entanto, que os levantamentos com ajustamento de pior acurácia, com presença exagerada de ruídos sistemáticos, apresentaram boa precisão. Isto porque os erros sistemáticos somente deslocaram a média, ou tendência, das observações em relação a referência para valores mais altos. Assim, denota-se que os erros sistemáticos afetaram as observações de modo constante, deslocando as dispersões valores de erros altos, mas mantendo a frequência de erros com dispersão baixa ou média, formando curvas quase normais.

Já os ajustamentos realizados com pouca ou nenhuma presença de ruídos sistemáticos apresentaram resultados satisfatórios para o posicionamento em zona urbana, com acurácias posicionais melhores que dois metros em todos os casos, que foram os casos dos marcos 005A, 005B, 006A, 010A, 010B e 018B. Entre esses marcos, o pior resultado para o ajustamento foi o 005A com a diferença de 1,783 metros para o marco de referência. Ademais, destacam-se os marcos 005B e o 010A, que apresentaram acurácia posicional centimétrica com 66,6 e 92,6 centímetros, respectivamente.

Embora o ajustamento tenha sido realizado em muitos casos sob a presença de erros sistemáticos, o ajustamento apresentou melhoria considerável no posicionamento ao comparar-se com o próprio conjunto de observações utilizadas para o ajuste. Ao visualizar-se o RMSE, todos os ajustamentos apresentaram melhoria no posicionamento em relação ao erro médio em relação a referência do conjunto de observações, tanto com intervalo de confiança de 95% como de 68%, apontando assim que, mesmo com condições adversas, o ajustamento garante valores melhores que o conjunto de informações disponibilizado para seu cálculo. Por fim, com exceção dos marcos 008A e 008B, que possuíam interferência quase total na recepção do sinal GNSS, todos os ajustamentos apresentaram acurácia melhores que a acurácia média dada pelo Android.

5 CONCLUSÃO

Atualmente, existe a preocupação de pesquisadores quanto a precisão e acurácia do GNSS de dispositivos móveis em diferentes situações e aplicações. Não há um consenso científico para a acurácia posicional absoluta de dispositivos móveis devido à grande variedade de modelos e de antenas GNSS. Além do mais, a constante evolução tecnológica dos dispositivos móveis torna a classificação da acurácia limitada temporalmente.

A partir da literatura, é possível determinar que a acurácia posicional de smartphones e tablets oscila aproximadamente entre 3 e 10 metros, dependente de determinantes como *hardware*, *software* e configuração do ambiente próximo ao local em que se está realizando o posicionamento.

Ademais, o uso do posicionamento e da navegação por GNSS por dispositivos móveis tem sido amplamente utilizado por diversas áreas da sociedade, principalmente civil, devido à grande popularização dos dispositivos móveis como os smartphones e tablets. Neste sentido, o presente trabalho averiguou a possibilidade de aprimorar a qualidade da acurácia do posicionamento pelo receptor GNSS de dispositivos móveis, a partir da técnica de ajustamento de observações geodésicas, executada no aplicativo desenvolvido nesse trabalho. Procurou-se assim possibilitar melhor qualidade do posicionamento GNSS tanto para uso técnico e profissional quanto para uso civil.

Desta forma, a partir do aplicativo desenvolvido, testaram-se os ajustamentos sobre marcos geodésicos presentes no campus da UFRGS. Com base na obtenção das observações pela metodologia apresentada, obteve-se soluções únicas em cada marco geodésico de referência.

Ao realizar os testes sobre os marcos geodésicos de referência, averiguou-se que houve grande variação quanto a qualidade do ajustamento nos diferentes levantamentos, muito embora todos os ajustamentos tenham sido melhores que a acurácia média dada pelo método *getAccuracy* do Android, com exceção dos marcos 008A e 008B. As variações na qualidade dos ajustamentos podem ser atribuídas à alta variabilidade espacial das observações em torno da referência.

As variabilidades espaciais das observações podem ser relacionadas ao fato de que os levantamentos foram realizados em área urbana, sujeitos a erros sistemáticos no posicionamento, como o multicaminho. Em menor grau, a variabilidade espacial das observações pode ser também proveniente da baixa qualidade do posicionamento por antenas

GNSS de dispositivos móveis. Dessa forma, casos extremos como nos marcos 008A e 008B, que apresentaram acurácia 5,3573 metros e 5,3932 metros no ajustamento, respectivamente, podem ser explicados pela alta interferência do sinal GNSS provida pelo ambiente externo.

Nos casos de baixa acurácia do ajustamento, ressalta-se que as observações apresentaram boa precisão. Isto porque a presença de erros sistemáticos somente deslocou a distribuição das observações para valores altos de diferença em relação a referência. Assim, as observações apresentaram frequência alta em valores próximos entre si, mas tendendo para valores que distanciavam do valor correto, chegando a mais de 5 metros, afetando a acurácia tanto das observações quanto do ajustamento.

Embora os erros sistemáticos tenham sido presentes em quase todos os levantamentos, com variações de influência sobre as observações, a maioria dos ajustamentos apresentou acurácia melhor que dois metros como os marcos 005A, 006A, 010B e 018B, atingindo até acurácias centimétricas nos marcos 005B e 010A.

Salienta-se que, principalmente, os levantamentos nos marcos 005B e 010A sofreram pouca ou nenhuma ocorrência de erros de natureza sistemática. Percebeu-se que as precisões destes levantamentos foram muito boas e que ausência de erros sistemáticos manteve a distribuição com tendência próxima a referência. Essa configuração da distribuição das observações possibilitou boa precisão e boa acurácia nestes levantamentos. Logo, para o melhor desempenho do ajustamento, é necessário que se tenha levantamentos mais acurados e precisos possíveis, evitando principalmente a presença demasiada erros sistemáticos.

Já em relação a acurácia posicional das próprias observações, representadas pelo RMSE a 95% e a 68% de confiança, averiguou-se que o ajustamento apresentou acurácia no posicionamento melhor do que a média das observações em cada levantamento, com melhorias na acurácia horizontal de até 81% e sempre maior que 49% em relação ao RMSE a 95% de confiança. Já quanto ao RMSE a 68% de confiança, a melhoria máxima foi de 67,19% e a mínima foi de 12,45%. Por fim, notou-se também que mesmo nos piores casos, a melhoria em relação ao erro médio das próprias observações sempre foi relevante, demonstrando que, em relação ao conjunto de dados, o ajustamento apresentou eficiência superior 50% no posicionamento em relação ao que seria obtido no ponto levantado.

O ajustamento apresentou resultados satisfatórios na determinação do melhor posicionamento, com acurácia superior a dois metros em seis dos dez pontos levantados com o aplicativo e acurácia centimétrica em dois marcos. Entretanto, apresentou resultados piores que dois metros nos outros quatro. Isto se deve ao fato de estarem cercados, em muitos casos, de prédios e vegetação, possibilitando ocorrência exagerada de erros sistemáticos, o que

prejudicou substancialmente o ajustamento. Já nos casos em que a presença de erros sistemáticos foi pouca ou nula, as propriedades estatísticas de erros aleatórios mantiveram-se e o ajustamento atingiu resultados satisfatórios. Portanto, para a realização do ajustamento, é necessária que haja probabilidade mínima de ocorrência de erros sistemáticos por obstáculos como edificações e vegetações.

Ademais, o ajustamento apresentou acurácia posicional muito satisfatória ao compará-lo com o conjunto de observações levantadas. Em relação ao erro médio das observações (RMSE), verificou-se que o ajustamento obteve qualidade muito superior na acurácia do posicionamento. Logo, o ajustamento ofereceu qualidade posicional superior no dentro das possibilidades do levantamento.

O aplicativo apresentou resultado e funcionamento satisfatório para os objetivos estipulados de cadastro e armazenamento de estações base, coleta de observações geodésicas e aplicação da técnica de ajustamento nas observações. Ressalta-se o fato de que o aplicativo foi testado apenas com um modelo de dispositivo móvel. A literatura aponta que diferentes modelos de smartphones podem apresentar diferentes acurácias e precisões nas observações GNSS. Desta forma, torna-se válido, em trabalhos futuros, a verificação da qualidade do ajustamento de forma mais ampla, realizando testes em um maior número de modelos de dispositivos móveis.

Ademais, em trabalhos futuros relacionados ao aplicativo, é válida a averiguação de algumas outras lacunas que não foram analisadas dentro do escopo deste trabalho. Pretende-se em trabalhos futuros averiguar a acurácia vertical dada pelo ajustamento, testar o aplicativo em relação a influência de outras variáveis – a fim de verificar sua acurácia – como ambientes livres de interferência externa, HDOP (*Horizontal Dilution of Precision*) e A-GPS. Além disso, pretende-se também aprimorar a interface do aplicativo para informar indicadores estatísticos de acurácia e precisão das observações e do ajustamento ao usuário, como o RMSE.

REFERÊNCIAS

ANDROID DEVELOPERS. **Arquitetura da plataforma**. 2019a. Disponível em:<<https://developer.android.com/guide/platform?hl=pt-br>>. Acesso em: 16 de nov. de 2019.

_____. **Fundamentos de aplicativos**. 2019b. Disponível em:<https://developer.android.com/guide/components/fundamentals?hl=pt_br> . Acesso em: 17 de nov. de 2019.

_____. **Layouts**. 2019c. Disponível em:<<https://developer.android.com/guide/topics/ui/declaring-layout?hl=pt-BR.>>. Acesso em: 17 de nov. de 2019.

_____. **Location: getAccuracy()**. 2019d. Disponível em:<[https://developer.android.com/reference/android/location/Location.html#getAccuracy\(\)](https://developer.android.com/reference/android/location/Location.html#getAccuracy()>)>. Acesso em: 5 de jan. de 2020.

BADDELEY, G. **GPS – NMEA sentence information**. 2001. Disponível em:<<http://aprs.gids.nl/nmea/#gga>>. Acesso em: 10 de out. de 2018.

BAUER, C. On the (In-)Accuracy of GPS Measures of Smartphones: A Study of Running Tracking Applications. In: International Conference on Advances In Mobile Computing & Multimedia – Momm 2013, Vienna, Austria. **Anais...** . ACM Press, 2013.

CARVALHO, E. A.; ARAÚJO, P. C. **Leituras cartográficas e interpretações estatísticas I**. Natal: EDUFRN, 2. ed., 2011.

CINTRA, J. P. **Sistema UTM**. São Paulo: EPUSP, 2003, 51 p.

DABOVE, P. et al. GNSS Positioning using Android Smartphone: In: V International Conference On Geographical Information Systems Theory, Applications And Management 2019. **Anais...** Heraklion, Crete, Grécia: SCITEPRESS - Science and Technology Publications, 2019.

DABOVE, P. What are the actual performance of GNSS positioning using smartphone technology?. **Inside GNSS**, 2014.

DABOVE, P.; DI PIETRA, V. Towards high accuracy GNSS real-time positioning with smartphones. **Advances in Space Research**, [s. l.], v. 63, n. 1, p. 94–102, 2019.

DALMOLIN, Q. **Ajustamento por mínimos quadrados**. Curitiba: UFPr, 2002.

DATE, C. J. **Introdução a Sistemas de Bancos de Dados**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2003.

DJUKNIC, G. M.; RICHTON, R. E. Geolocation and assisted GPS. **Computer**, v. 34, n. 3, p. 123–125, 2001.

DRONE E ENGENHARIA - DRONENG. **O que são sistemas de referência e de coordenadas?** 2017. Disponível em: <<http://blog.droneng.com.br/geodesia-sistemas-de-referencia-e-de-coordenadas/>>. Acesso em: 16 de nov. de 2019.

ELMASRI, R.; NAVATHE, S. B. **Sistemas de Bancos de Dados**. São Paulo: Pearson Education, 2011.

EL-RABBANY, A. **Introduction to GPS: The Global Positioning System**. Norwood: Artech House, 2002.

FEDERAL GEOGRAPHIC DATA COMMITTEE – FGDC. National Standard for Spatial Data Accuracy. *In*: FGDC, **Geospatial Positioning Accuracy Standards**. Virginia: Federal Geographic Data Committee Secretariat c/o U.S. Geological Survey, 1998.

GEMAEL, C. **Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas**. Curitiba: Editora UFPR, 1994, 319 p.

GEMAEL, C.; ANDRADE, J. B. **Geodésia Celeste**. Curitiba: Editora UFPR, 2004, 389 p.

GILL, M. et al. Precise Point Positioning (PPP) using Low-Cost and Ultra-Low-Cost GNSS Receivers. *In*: 30th International Technical Meeting Of The Satellite Division Of The Institute Of Navigation (ION GNSS+ 2017). **Anais...** Portland, Oregon, 2017.

GLONASS. **GLONASS status**. 2019. Disponível em: <<https://www.glonass-iac.ru/en/GLONASS/index.php>>. Acesso em: 16 de nov. de 2019.

GPS. **GPS space segment**. 2019. Disponível em: <<https://www.gps.gov/systems/gps/space/>>. Acesso em: 16 de nov. de 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Parâmetros de transformação de sistemas geodésicos**. Resolução nº 23, de 21 de fev. de 1989, 1989.

_____. **Resolução nº 1/2015**: Define a data de término do período de transição definido na RPR 01/2005 e dá outras providências sobre a transformação entre os referenciais geodésicos adotados no Brasil. 2015. Disponível em: <ftp://geoftp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/normas/rpr_01_2015_sirgas2000.pdf>. Acesso em: 3 de mar. de 2020.

_____. **Sistemas de Referência**. 2008. Disponível em: <ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_sobre_posicionamento_geodesico/sirgas/sisref_2.pdf>. Acesso em: 3 de mar. de 2020.

INSTITUTO NACIONAL DE COLONIZAÇÃO E REFORMA AGRÁRIA – INCRA., **Norma Técnica para Georreferenciamento de Imóveis Rurais**. Brasília, 3 ed., 2013, 4 p.

LECHETA, R. R. **Google Android: Aprenda a criar aplicações para dispositivos móveis com o Android SDK**. São Paulo: Novatec, 2 ed., 2010.

LEE, W. **Introdução ao Desenvolvimento de Aplicativos para o Android**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna Ltda., 2011.

LUO, X.; MAYER, M.; HECK, B. On the probability distribution of GNSS carrier phase observations. **GPS Solutions**, v. 15, p. 369-379, 2011.

- LOPES, T. G. **Comportamento de um sistema híbrido GNSS incorporado a dispositivos móveis na obtenção de levantamentos planimétricos com fins agrícolas.** (Dissertação de Mestrado), UFSM, 78 p., 2019.
- MALKOS, S. **User Location Takes Center Stage in New Android OS: Google to Provide Raw GNSS Measurements.** *GPS World*, 2016. Disponível: <<https://www.gpsworld.com/google-to-provide-raw-gnss-measurements/>>. Acesso em: 28 de out. de 2019.
- MIKHAIL, E.; ACKERMAN, F. **Observations and Least Squares.** University Press of America, 1976. 497 p.
- MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: Descrição, fundamentos e aplicações.** São Paulo: UNESP, 2. ed., 2008.
- MONICO, J. F. G. et al. Acurácia e precisão: revendo os conceitos de forma acurada. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 15, n.3, p. 469-483, 2009.
- MORETTIN, P. A.; BUSSAB, W. de O. **Estatística básica.** São Paulo: Saraiva, 6. ed., 2010.
- PESYNA, K. M.; HEATH, R. W.; HUMPHREYS, T. E. Centimeter Positioning with a Smartphone-Quality GNSS Antenna. *In: Preprint of the 2014 ION GNSS Conference. Anais...* 2014.
- RÉQUIA, Gustavo Heydt. **Desenvolvimento de Aplicativos CR Campeiro MóBILE – Caso de teste: Sistema operacional Android.** 2013. 67p. Dissertação (Mestrado em Agricultura de Precisão) -Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2013.
- ROMERO-ANDRADE, R. et al. Comparative analysis of precise point positioning processing technique with GPS low-cost in different technologies with academic software. **Measurement**, [s. l.], v. 136, p. 337–344, 2019.
- SANTOS, R.R. **Programando em Java 2: teoria e aplicações.** Rio de Janeiro: Axcel Books, 2004.
- SCHÜNEMANN, A. L. **Ordenação dos parâmetros para ajustamento e análise da qualidade de redes geodésicas altimétricas geométricas.** (Dissertação de mestrado), 115 p., 2005.
- SEBEM, E. et. al. **Fundamentos de cartografia e Sistema de Posicionamento Global GPS.** Santa Maria: UFSM/Colégio Politécnico/Departamento de Engenharia Rural, 2010. 205 p.
- SEEBER, G. **Satellite geodesy.** New York: Walter de Gruyter, 2. ed., 2003.
- SEYYEDHASANI, H. et al. Mobile Device-Based Location Services Accuracy. **Applied Engineering in Agriculture**, [s. l.], v. 32, n. 5, p. 539–547, 2016.
- SPECHT, C. et al. Comparative analysis of positioning accuracy of GNSS receivers of Samsung Galaxy smartphones in marine dynamic measurements. **Advances in Space Research**, [s. l.], v. 63, n. 9, p. 3018–3028, 2019.

SQLITE. **About SQLite**. 2017. Disponível em: < <http://www.sqlite.org/about.html> >. Acesso em: 13 de nov. de 2019.

STATISTA. **Number of smartphone users worldwide from 2016 to 2021**. 2019. Disponível em:< <https://www.statista.com/statistics/330695/number-of-smartphone-users-worldwide/>>. Acesso em: 29 de out. de 2019.

SUPERINTENDÊNCIA DE INFRAESTRUTURA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL – SUINFRA. **Marcos Suinfra**. Disponível em: <<https://chasebox.ufrgs.br/public/f71830>>. Acesso em: 27 de maio de 2019.

SZOT, T. et al. Comparative analysis of positioning accuracy of Samsung Galaxy smartphones in stationary measurements. **PLOS ONE**, [s. l.], v. 14, n. 4, p. e0215562, 2019.

TOMAŠTÍK, J. et al. Horizontal accuracy and applicability of smartphone GNSS positioning in forests. **Forestry**, n. 90, 2017, p. 187-198.

VIANA, E. C.; PONTES, I. C. **Sistema Operacional Android: Desmistificando o desenvolvimento de aplicativos**. 2012. 120 p. Monografia (Bacharelado em Sistemas de Informação). Instituto Federal Fluminense, Campos de Goytacazes, RJ, 2012.

VON WATZDORF, S.; MICHAHELLES, F. Accuracy of positioning data on smartphones. *In: III International Workshop on Location and the Web, Anais...* 2010, 4p.

W3SCHOOLS. **XML tutorial**. 2019. Disponível em:< <https://www.w3schools.com/xml/>>. Acesso em:18 de nov. de 2019.

ZHANG, K. et al. Smart-RTK: Multi-GNSS kinematic positioning approach on android smart devices with Doppler-smoothed-code filter and constant acceleration model. **Advances in Space Research**, [s. l.], v. 64, n. 9, p. 1662–1674, 2019.