

Análise da influência de diferentes estratégias de posicionamento GNSS na modelagem de trajetória de RPA com aplicações fotogramétricas

Analysis of the influence of different GNSS positioning strategies on RPA trajectory modeling with photogrammetric applications

Patrick Otto Busch*, Tiago Lima Rodrigues**, Leonardo Ercolin Filho***

*Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná, patrickotto@ufpr.br

**Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná, tiagorodrigues@ufpr.br

***Centro de Pesquisas Aplicadas em Geoinformação, Universidade Federal do Paraná, leonardo.ercolin@ufpr.br

<http://dx.doi.org/10.5380/raega.v59i0.91235>

Resumo

O posicionamento geodésico de RPAs (do inglês *Remotely Piloted Aircraft*) via Sistema Global de Navegação por Satélite tem ganhado relevância com a utilização de métodos de posicionamento RTK (do inglês *Real Time Kinematic*) e o PPK (do inglês *Post Processed Kinematic*), uma vez que propõe uma redução de tempo e custo no apoio fotogramétrico em campo. Desde que as observáveis sejam gravadas, a solução pode ser pós processada, independente de extensão de linha de base (LB) e de recepção de sinal de correção da base via link de rádio. Neste contexto, a empresa Guandalini Posicionamento vem desenvolvendo uma solução denominada GPPK (Guandalini PPK), o qual faz uso de um receptor GNSS (L1 ou L1/L2 GPS, GLONASS) embarcado e um sistema foto sensor para a identificação do exato instante de aquisição das imagens. Neste trabalho, utilizando-se o GPPK, analisou-se a influência de diferentes estratégias de processamento GNSS PPK, no contexto de levantamentos aerofotogramétricos. Mediante análises estatísticas as trajetórias obtidas por cada estratégia puderam ser consideradas estatisticamente iguais. Apesar disso, a partir da análise de acurácia dos resultados obtidos com base em pontos de verificação, tem-se que a utilização de LB curta apresenta melhores resultados do que LB longa, possivelmente devido ao tempo de ocupação e a restrição dos receptores Emlid (que compõe o GPPK) em trabalhar apenas com a observável L2C. Além disso, a inclusão da portadora L2 em LB curta não influenciou de forma significativa a exatidão, assim como o aumento da frequência de aquisição das observáveis.

Palavras-chave:

Aerofotogrametria, Processamento, Ajuste.

Abstract

The geodetic positioning of RPAs (Remotely Piloted Aircraft) via the Global Navigation Satellite System has gained relevance with the use of RTK (Real Time Kinematic) and PPK (Post Processed Kinematic) positioning methods, since it proposes a reduction of time and cost of photogrammetric support in the field. As long as the observables are recorded, the solution can be post-processed, independent of baseline length (LB) and baseline correction signal reception via radio link. In this context, the company Guandalini Posicionamento has been developing a solution called GPPK (Guandalini PPK), which makes use of an on-board GNSS receiver (L1 or L1/L2 GPS, GLONASS) and a photo sensor system to identify the exact moment of acquisition of the images. In this work, using GPPK, the influence of different GNSS PPK processing strategies was analyzed in the context of aerial photogrammetric surveys. Through statistical analysis, the trajectories obtained by each strategy could be considered statistically equal. Despite this, based on the accuracy analysis of the results obtained based on checkpoints, it can be seen that the use of short LB presents better results than long LB, possibly due to occupation time and restriction of Emlid receivers (which makes up the GPPK) in working only with the L2C observable. Furthermore, the inclusion of the L2 carrier in short LB did not significantly influence the accuracy, as well as the increase in the acquisition frequency of the observables.

Keywords:

Aerial photogrammetry, Processing, Adjustment.

I. INTRODUÇÃO

Muitas vezes os RPAs (do inglês *Remotely Piloted Aircraft*) são utilizados para fins recreativos, porém, o uso profissional tem crescido bastante. A utilização desse tipo de equipamento tem sido bastante difundida em diferentes áreas e com diferentes finalidades, como em Colomina e Molina (2014), Nex (2022) e Osco et al. (2021), em parte por sua facilidade de uso, como também por vezes objetivando um melhor custo-benefício e um ganho no tempo dispensado para a aquisição dos produtos finais. Especificamente no caso de levantamentos aerofotogramétricos, nos últimos anos houve muito avanço e cada vez mais uso, como em Colomina e Molina (2014), Nex et al. (2022) e Osco et al. (2021). Neste contexto, a utilização do GNSS (*Global Navigation Satellite System*) com INS (*Inertial Navigation System*) proporciona um incremento nos processos, pois possibilita a obtenção da posição do centro perspectivo (CP) da câmera no instante de tomada das fotos (desde que se disponha dos valores de lever-arms) e a orientação da aeronave (ERCOLIN FILHO, 2017).

No entanto, tradicionalmente, como pode ser visto em Espinhosa (2006), Vidal (2013), Viana (2017), Silva (2018), Lopes (2019), Garcia (2019), Pedreira et al. (2020), Amorim (2020), Garcia (2020), dentre outros, tem-se um receptor GNSS ou GPS (*Global Positioning System*) de navegação a bordo da RPA, fornecendo o posicionamento absoluto instantaneamente. Isto é, sem gravação de dados em um arquivo de observáveis para

pós processamento, sem capacidade de receber e processar correções diferenciais e sem possibilidade de posicionamento relativo cinemático em tempo real (RTK). Isso proporciona uma precisão de posicionamento da ordem de grandeza métrica (SEBEER, 2003), uma vez que é realizado o posicionamento por ponto simples (PPS), utilizando-se a pseudodistância proveniente do código civil das portadoras L1 GPS ou GLONASS.

Dada esta questão, a busca por melhores níveis de precisões fez surgir possibilidades de uso do método RTK, realizando a correção do posicionamento da aeronave, em tempo real, utilizando uma base de referência. Como exemplo, tem-se o eBee RTK da Sensefly PT (ROZE, 2014), o DJI MATRICE 300 RTK (DJI, 2022), o DJI Phantom 4 RTK (DJI, 2021), dentre outros. Porém, é conhecido que o uso do RTK possui algumas limitações tais como o alcance do link de rádio que transmite as correções da estação base, nos casos em que a estação base não puder se localizar próxima à região de levantamento, bem como condições ambientais que proporcionem obstruções (árvores, edificações, desniveis acentuados, etc.) (BARBOSA et al., 2010). No caso do NTRIP (do inglês *Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*) tem-se a questão da disponibilidade e da qualidade de sinal de telefonia móvel (3G ou 4G) (GUANDALINI, 2012).

Considerando que uma vez que as observáveis da base e do *rover* sejam gravadas no instante do levantamento, o posicionamento pode ser obtido com solução pós-processada. Com isso, pode-se ter a aplicação de correções mais complexas, a independência de extensão em LB (Linha de Base) e a independência de recepção de sinais da(s) estação(ões) base (LEICK, 2004). Assim, tem-se a possibilidade de um posicionamento com maior precisão e acurácia, e, consequentemente, valores de posição mais acurados para os CPs das câmeras nos momentos de tomadas das imagens. Como exemplos de trabalhos desenvolvidos utilizando receptor GNSS geodésico embarcado em RPA, com pós-processamento do posicionamento para estimativa de trajetórias RPAs, pode-se citar Dinkov e Kitev (2020) e Ercolin Filho et al. (2020).

Cabe mencionar que as melhorias no levantamento fotogramétrico ocorrem tanto no georreferenciamento direto como no georreferenciamento indireto, sendo que neste último a diminuição da quantidade de pontos de controle no terreno apresenta-se como vantagem em relação ao caso tradicional, como apontado em Famiglietti (2021).

Diante do exposto, e levando-se em consideração que as pesquisas até então desenvolvidas nesse âmbito não investigaram a influência de diferentes estratégias de processamento GNSS no provimento de trajetória do RPA para o processamento e geração de produtos fotogramétricos, o presente trabalho se propõe a investigar tais aspectos.

Neste contexto, foram definidos experimentos baseados na utilização do método PPK, com a utilização de diferentes portadoras (L1 e L1/L2), considerando e desconsiderando a correção dos centros de fases da antena GNSS embarcada. Além disso, foram utilizadas diferentes estações base, com extensões de LB longa e curta, e diferentes frequências de aquisição de observáveis. Neste trabalho, para situar o leitor, o conceito de LB longa será relacionado à comprimentos maiores que 15 km, segundo os princípios de Monico (2007). As variáveis utilizadas nas estratégias se justificam pelos diferentes cenários que os usuários podem ter na realidade de campo.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

Área de teste e definição dos experimentos

Foram definidos experimentos baseados na utilização do método PPK, com a utilização de diferentes portadoras e bases posicionadas em linhas de base curta e longa, às taxas de frequência de aquisição das observáveis de 0,2, 1 e 15 segundos. O intervalo de 0,2 s foi definido empiricamente para analisar o cenário em que o receptor da base consiga gravar dados neste intervalo. Ao todo foram realizados 10 experimentos, organizados conforme apresentado na Tabela 1. Para linhas de base curtas, as observáveis GPS e GLONASS foram utilizadas, primeiramente somente L1 e posteriormente L1 e L2 juntas, sem combinação linear. Para linhas de base longas, a observável livre de ionosfera (LI) foi utilizada.

Para aquisição dos dados foram utilizados os Kits GPPK1 e GPPK2 da empresa Guandalini Posicionamento, embarcados no RPA Phantom 4 Advanced da DJI. Os kits são compostos por receptor GNSS geodésico, antena multi-GNSS adaptada e um foto sensor que, acoplado ao led da RPA, fazem a correlação entre o instante de tomada da foto e suas coordenadas.

Tabela 1 - Experimentos de trajetória e suas características

Experimento	Método	Configurações		
		Intervalo	Extensão de LB	Portadoras
1	PPK	0,2 s	Curta	L1
2	PPK	1 s	Curta	L1
3	PPK	15 s	Curta	L1
4	PPK	0,2 s	Curta	L1 e L2
5	PPK	1 s	Curta	L1 e L2
6	PPK	15 s	Curta	L1 e L2
7	PPK	0,2 s	Longa (330km)	L1/L2 (LI)
8	PPK	1 s	Longa (330km)	L1/L2 (LI)
9	PPK	15 s	Longa (330km)	L1/L2 (LI)
10	PPK	15 s	Longa (115km)	L1/L2 (LI)

Fonte: O autor (2022).

Para o desenvolvimento do trabalho, foi selecionada uma área de estudo localizada no complexo de Educação Física do campus Centro Politécnico da UFPR, conforme indicado em vermelho na Figura 1. A área contém edificações, solo exposto, vegetação e outros elementos naturais e artificiais, e não apresenta declividade acentuada em termos de relevo.



Figura 1-Área de estudo e LB curta. (elaborado pelos autores)

Considerando os experimentos com intervalos de processamentos de 1 e 15 s, as estações RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo) UFPR e POLI foram utilizadas para as configurações de LB curta e longa, respectivamente. A extensão de LB adotando-se como estação base a estação UFPR, é menor que 900 m. Por outro lado, a extensão de LB adotando-se como estação base a estação POLI, é de cerca de 329 km (Figura 2). Por outro lado, considerando os experimentos com intervalo de processamento de 0,2 s foi utilizado o receptor Reach RS2 da Emlid, tanto para base curta (~57 m) quanto longa (~329 km). Foi utilizada ainda a estação SCAQ da RBMC para experimento de uma LB de aproximadamente 115 km à um intervalo de 15 s das observações, conforme indicado na Figura 2. Isso com o objetivo de se ter uma segunda análise de LB longas. Cabe ressaltar que para esta estação a frequência de 1 s não está disponível aos usuários.

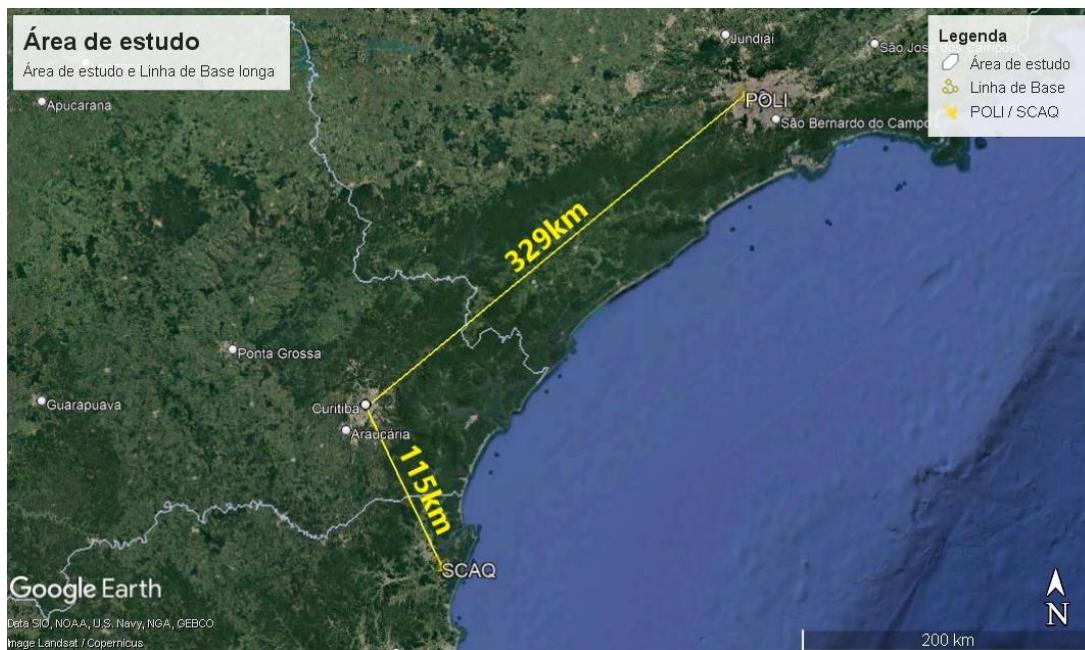


Figura 2 – Área de estudo e LB longa. (elaborado pelos autores)

Selecionada a área de estudo, o levantamento aerofotogramétrico foi realizado para obtenção dos dados necessários para a realização dos experimentos. O plano de voo foi elaborado no aplicativo Drone Deploy – Mapping for DJI (lançado em 19 de agosto de 2015 pela empresa Drone Deploy) e empregou altura de voo de 90 m, sobreposição longitudinal de 80% e lateral de 60%. Posteriormente, foram realizados dois voos, cruzados entre si, gerando um total de 111 fotos com uma distância do solo-amostra (GSD) primeira vez da sigla de aproximadamente 2,7 cm/pixel. A RPA utilizada foi a Phantom 4 Advanced da DJI, com o Kit GPPK2 da Guandalini acoplado (Figura 3).



Figura 3– PHANTOM 4 ADVANCED da DJI, com o KIT PPK2 da Guandalini acoplado e exemplo de rastreio em campo com ponto sinalizado. (elaborado pelos autores)

Ainda dentro do contexto do levantamento fotogramétrico, ao longo da área de estudo foram definidos pontos de controle e verificação. Ao todo foram demarcados 13 alvos foto identificáveis, para servirem como pontos de controle e de verificação (Figura 3b). As coordenadas desses pontos foram coletadas por posicionamento GNSS utilizando a técnica RTK via NTRIP tendo a estação UFPR da RBMC como base de referência enviando correções para o receptor Emlid Reach RS2. Os levantamentos ocorreram de acordo com as especificações, recomendações e normas gerais para levantamentos geodésicos (Resolução PR nº5 - 31/03/1993), definidas pelo IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, para elaboração de serviços de Cartografia e Topografia. Os pontos de verificação foram utilizados neste projeto com o objetivo de avaliar a qualidade primeiramente da orientação e posteriormente para avaliar a qualidade dos produtos gerados, no contexto do Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD – DSG, 2015).

Para a estimativa dos parâmetros de orientação interior (POI) foi realizada a calibração em serviço da câmera do RPA previamente. Esta ocorreu na mesma área de estudo, e foi utilizado o processamento fotogramétrico convencional, isto é, sem injunção relativa de posição nos CP, utilizando-se os dados disponíveis (pontos de controle e as imagens). Os pontos de apoio foram também injuncionados relativamente no ajustamento visando melhorar a geometria necessária para a recuperação dos POE (Parâmetros de Orientação Exterior) e POI no instante da realização do recobrimento aéreo.

Os POI estimados foram a distância focal f ; as coordenadas do PP x_P e y_P ; os coeficientes do modelo de Brown para a distorção radial de lentes K_1, K_2, K_3 ; e os coeficientes do modelo de Conrady para a distorção descentrada de lentes P_1 e P_2 .

Processamento das trajetórias

De posse de todos os arquivos RINEX os processamentos de todos os experimentos de trajetória utilizando o método PPK foram realizados no aplicativo RTKLIB v. 2.4.3 Emlid b33. Na Tabela 2 são apresentadas as configurações de processamentos. O método para a solução das ambiguidades utilizado foi o LAMBDA (TEUNISSEN, 1995), com valor de Ratio-Test igual a 3.

Cabe ressaltar que, após a estimativa da trajetória, para os processamentos fotogramétricos, com as épocas de tomadas das fotos indicadas pelo sistema de foto sensor presente no kit, a partir de um processo de interpolação são automaticamente calculadas, no software GPPK, as coordenadas do(s) centro(s) de fase(s) da antena do receptor GNSS para estes instantes. Um log de eventos é gerado pelo RTKLib onde o software calcula uma solução de posição e gera um arquivo extensão “events.pos” contendo as posições dos eventos a partir das coordenadas E, N e U do Sistema Geodésico Local. Retornando esse arquivo para o GPPK e reprocessando

os dados, o software adiciona os dados internos de afastamento tridimensional do(s) centro(s) de fase(s) para o CP da câmera (lever-arms) resultando no mesmo arquivo as coordenadas ajustadas de cada CP para o voo. A Tabela 3 apresenta os valores de *lever-arms* utilizados, que foram medidos previamente por régua em aço inoxidável com escala milimétrica e já estabelecidos no software GPPK por padrão.

Tabela 2 – Configurações de processamentos no método PPK no RTKLIB v. 2.4.3 EMLID B33.

Configuração	LB curta	LB longa
Observável	L1 e L1+L2	L1/L2 (LI)
Máscara de elevação	15°	15°
Filtro de Kalman	Combined	Combined
Efemérides	Transmitidas	Precisas
Modelagem troposférica/função de mapeamento	--	Saastamoinem/Niell
Modelagem Ionosférica	--	Observável LI + correção de 2ª e 3ª ordem da ionosfera com o aplicativo RINEX HO
Efeitos geodinâmicos	--	Correção de Marés terrestres, carga oceânica de maré (arquivos. BLQ), Movimento do Polo
Correção do centro de fase das antenas dos satélites	Correção aplicada com arquivo IGS14.atx	Correção aplicada com arquivo IGS14.atx
Correção das tendências diferenciais dos códigos C1C e C1W	Correção com arquivo P1C1.dcb para o mês	Correção com arquivo P1C1.dcb para o mês
Constelações	GPS, GLONASS	GPS, GLONASS

Fonte: O autor (2022).

Tabela 3 – Valores de *lever-arms* utilizados.

Lever-arms (m)

LX	0,000
LY	-0,015
LZ	0,175

Fonte: O autor (2022).

Processamentos fotogramétricos

De posse das coordenadas dos CPs de cada imagem do voo, obtidos na estimativa das trajetórias, e dos valores calibrados de POI, os mesmos foram utilizados nos experimentos da área de estudo como parâmetros injuncionados nas fototriangulações de forma relativa, segundo suas variâncias. As variâncias para as

coordenadas dos CPs foram propagadas na interpolação a partir das soluções de trajetória GNSS provenientes dos processamentos no RTKLIB.

Para todos os experimentos indicados na Tabela 1, foi realizada a fototriangulação com georreferenciamento direto e com georreferenciamento indireto, com a utilização de um ponto de controle e também com sete pontos de controle, para que fosse possível gerar dados comparativos e principalmente para refinamento dos POI e POE. Um ponto, considerando uma quantidade mínima para tal e o cenário mais econômico, e sete pontos a fim de analisar o efeito do refinamento com maior grau de liberdade. Mais informações referentes ao uso de pontos de controle no georreferenciamento indireto podem ser encontradas em Andrade (1998) e Tommaselli e Reiss (2005). Na Figura 4 como é apresentado como exemplo o ambiente de trabalho no Agisoft Metashape, com as imagens alinhadas e os pontos de apoio marcados.

A verificação da acurácia de cada fototriangulação foi realizada a partir do cálculo da raiz do erro quadrático médio (REQM) das discrepâncias nos pontos de verificação.

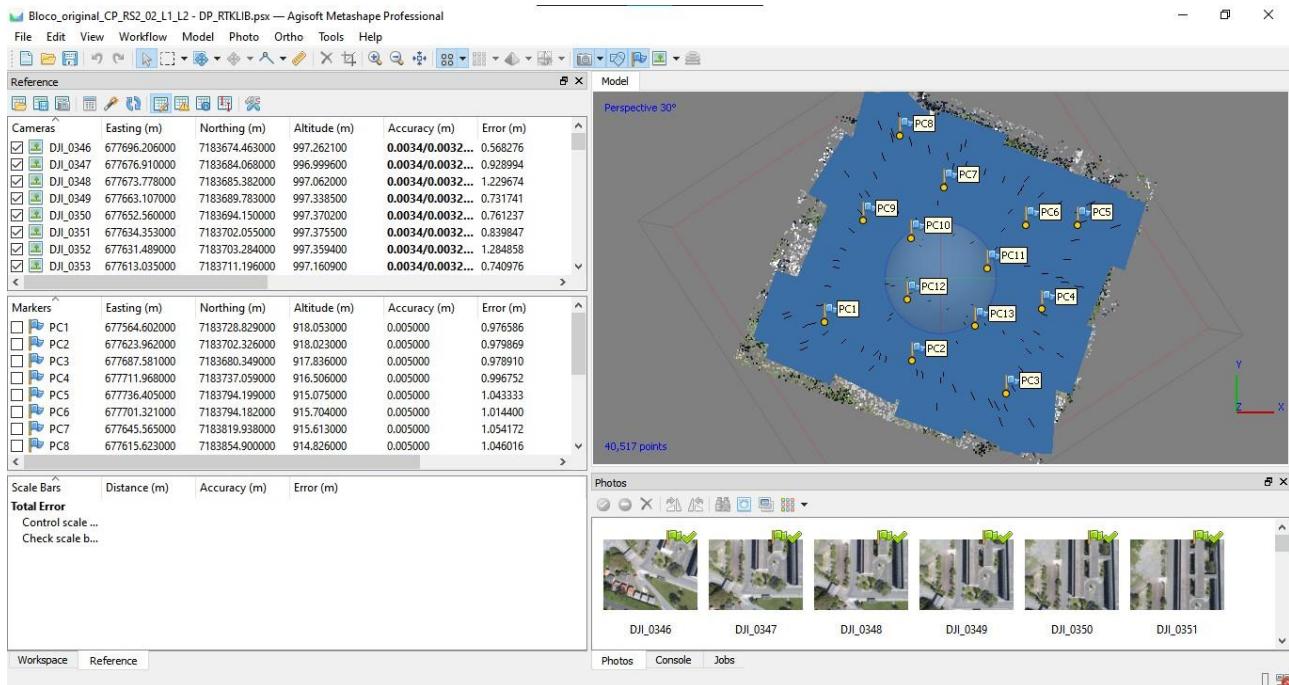


Figura 4 – Exemplo de ambiente de trabalho do Agisoft Metashape. (elaborado pelos autores)

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Resultados das estimativas das trajetórias a partir das estratégias de processamento GNSS

Na Figura 5 são apresentados os valores de precisão das coordenadas E, N e U obtidas nos experimentos de 1 a 6 com LB curta. Para os experimentos 1 e 2 as precisões formais nas componentes E e N foram

concordantes ao nível submilimétrico, com médias em torno de 0,007 m, ficando no geral abaixo de 0,012 m. Já na componente U, no experimento 1 as precisões foram em média de 0,012 m e sempre abaixo de 0,015 m, com pouca variação, na ordem do mm. Porém, no experimento 2 estas se apresentaram levemente melhores, com média de 0,010 m. Isso pode estar relacionado com a maior porcentagem de soluções fixas de ambiguidade durante a trajetória, 45,8% contra 99,6%. Para o experimento 3, as precisões foram piores em relação às obtidas nos experimentos 1 e 2. Nas componentes E e N, em média, teve-se 0,010 m e 0,012 m, respectivamente, com valores variando de 0,008 a 0,021 m. Já para a componente U, a média foi de 0,018 m, com valores variando de 0,013 a 0,031 m.

No caso do experimento 2, os valores apresentados para a componente altimétrica eram esperados tendo em vista a maior porcentagem de solução fixa de ambiguidades obtidas para esse experimento.

Outra questão verificada no experimento 3 foi a amplitude de variação de precisões em um formato aproximadamente cílico. Isso, bem como as precisões piores, era esperado, considerando a baixa amostragem (15 s) para a interpolação, em relação às amostragens nos experimentos anteriores.

Assim como em Dinkov e Kitev (2020), observou-se que os valores de exatidão nos pontos de verificação obtidos nos estudos do método PPK para georreferenciamento direto se mostraram estáveis para linha de base curta.

Para os experimentos utilizando as frequências L1 e L2, com LB curta, teve-se uma ligeira melhora, em virtude da adição das observáveis L2 e da fixação de todas as ambiguidades duramente o período de voo. Nos experimentos 4, 5 e 6 os valores de precisão em ambas as componentes planimétricas se apresentaram abaixo de 0,006 m, com médias de 0,005 m ou melhores. Para a componente altimétrica, nos experimentos 4 e 5, os resultados também foram próximos ao nível submilimétrico, com médias em torno de 0,008 m. Já para o experimento 6 os resultados foram piores, em média de 0,011 m. Neste, embora o comportamento aproximadamente cílico tenha sido verificado, as amplitudes foram menores, consequência direta da melhoria com a inclusão da L2 no processamento. De forma adicional, entende-se que para o cenário de um receptor de dupla frequência trabalhando em uma LB curta, a taxa de frequência utilizada para cada experimento possa não ter tanta influência na característica dos resultados obtidos, comparado ao caso somente de uso de receptor L1.

Os valores aqui encontrados para LB curta, refletem nas discrepâncias tridimensionais dos pontos de verificação lançados na área de estudo, pois, assim como em Ercolin Filho et al. (2020), considerou-se a posição geodésica tridimensional fornecida pela trajetória do Kit PPK.

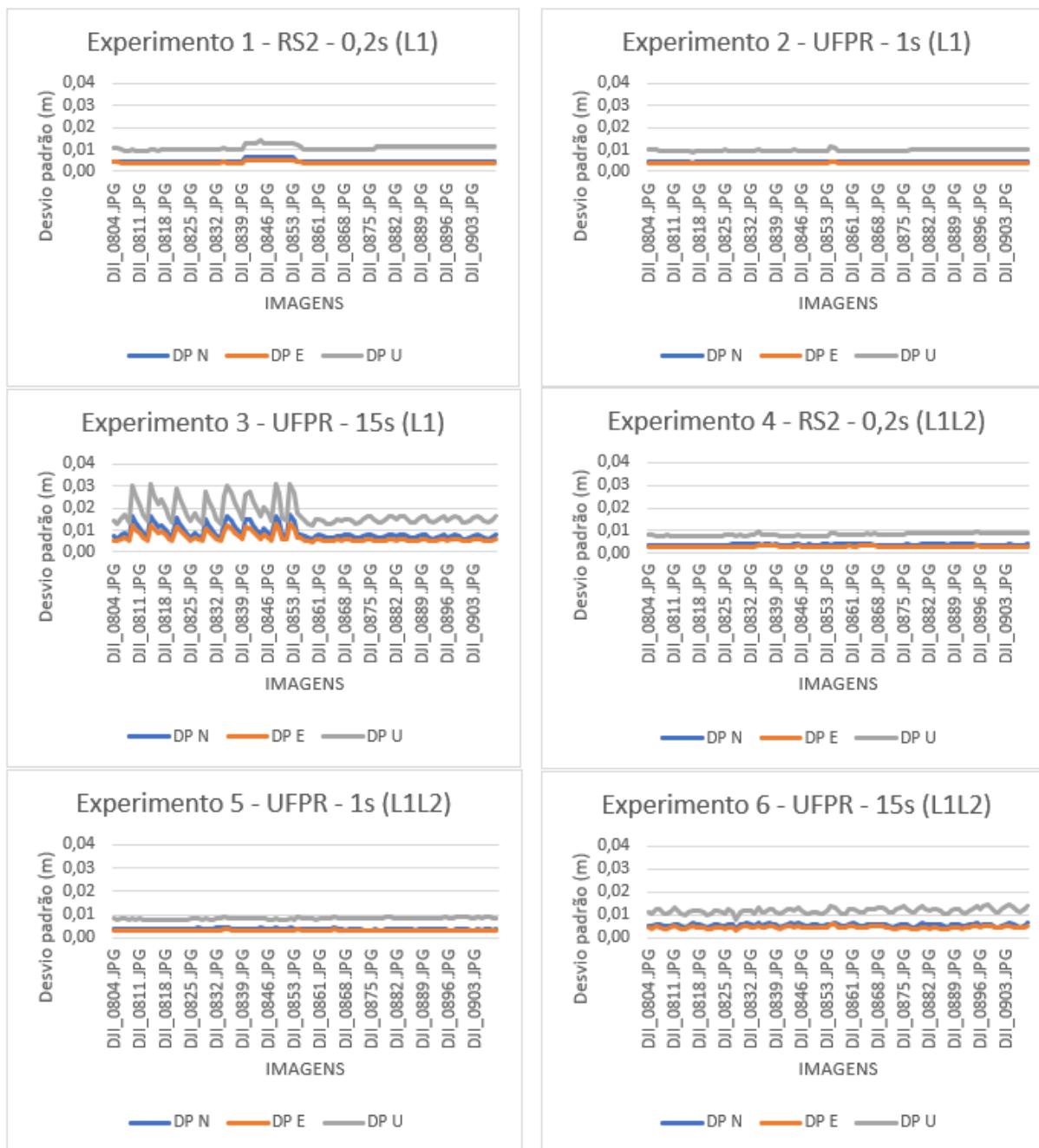


Figura 5 – Precisões das coordenadas E, N e U dos CP para os experimentos de 1 a 6 com LB curta. (elaborado pelos autores).

Em comparação com outras técnicas, como a do PPP (Posicionamento por Ponto Preciso) por exemplo, os resultados são melhores, principalmente pelo pouco tempo de percurso. Geralmente, com o método tradicional do PPP, são necessários aproximadamente 30 minutos para que uma solução de posição possa ser alcançada em um nível de acurácia da ordem do decímetro, em um processamento estático (ALVES et al., 2011; IBGE, 2020). No PPP, quando todos os erros forem adequadamente tratados e se for usado um período longo de observações de receptores de dupla frequência, obtém-se alto nível de acurácia (MONICO, 2007; ZUMBERGE

et al., 1997).

Grayson (2018), que analisou a possibilidade de uso do PPP cinemático na provisão de trajetória utilizando RPA do tipo “asa fixa” alcançou exatidões em torno de 0,02 a 0,03 m para as coordenadas planimétricas dos pontos da trajetória e de 0,10 m para a componente altimétrica.

Nos experimentos simulando o uso do GPPK2 em LB longa foi possível observar que não houve similaridade nos resultados obtidos entre os experimentos. Enquanto os experimentos 7 e 10 geraram quase 100% de pontos com solução fixa de ambiguidade durante a trajetória (voo), os experimentos 8 e 9 tiveram a maior parte dos pontos de trajetória com solução flutuante, 99,4% e 99,7%, respectivamente. Em decorrência disso, como pode ser observado na Figura 6, as precisões das coordenadas tridimensionais para os experimentos 7 e 10 foram as melhores, sendo as médias de 0,014, 0,014 e 0,033 m em E, N e U para o experimento 7, e de 0,020, 0,021 e 0,052 m em E, N e U para o experimento 10. Os valores em planimetria se apresentaram entre 0,008 e 0,019 m no experimento 7, sendo menos variantes do que no experimento 10, que teve valores de mínimo e máximo iguais a 0,009 e 0,032 m. Porém em altimetria, no experimento 10 os valores foram bem mais discrepantes e com amplitudes maiores, em relação ao experimento 7, principalmente na primeira parte da trajetória, variando entre 0,026 e 0,077 m.

Considerando o que fora obtido por Teppati Losè et al. (2020), que se utilizou de dados de estações CORS (do inglês, *Continuous Operating Reference Stations*) estando a distâncias entre 8 km e 68 km de sua área de estudo, os valores aqui alcançados para LB longa merecem maior atenção considerando que esta trata de uma distância entre duas e cinco vezes maior.

Em todos os experimentos, houve melhoria de exatidão na componente altimétrica em relação ao georreferenciamento direto, quando da inclusão de 1 ponto de controle nas fototriangulações. Isso possivelmente em virtude de refinamentos nos valores de POI e de posições dos CPs. Esta melhoria já era esperada, tendo em vista o mesmo tipo de resultado obtido por Ercolin et al. (2020). Cabe ressaltar que, mesmo tendo sido feita a calibração da câmera em voo, os POI tendem a não serem estáveis, uma vez que a câmera não é fotogramétrica.

Com relação aos experimentos 8 e 9, os valores de precisão formal foram próximos ao nível milimétrico, como observado na Figura 6, com as médias na componente N sendo de 0,020 e 0,021 m. Na componente E, por conta da solução predominantemente flutuante as precisões foram piores que em N, sendo de 0,036 e 0,046 m, respectivamente para os experimentos 8 e 9. Para a componente altimétrica, os valores se apresentaram entre 0,046 e 0,082 m, com médias de 0,063 e 0,065 m, respectivamente para os experimentos 8 e 9.

Em geral o efeito de amostragem mais baixa, de 1 e 15 s, se mostrou mais prejudicial no caso de linhas de base longas. Isso em virtude das duas questões mencionadas de uso somente do sinal L2C e do tempo de ocupação bem abaixo do recomendado. Também por estas questões, os resultados foram piores em relação aos obtidos com LB curta.

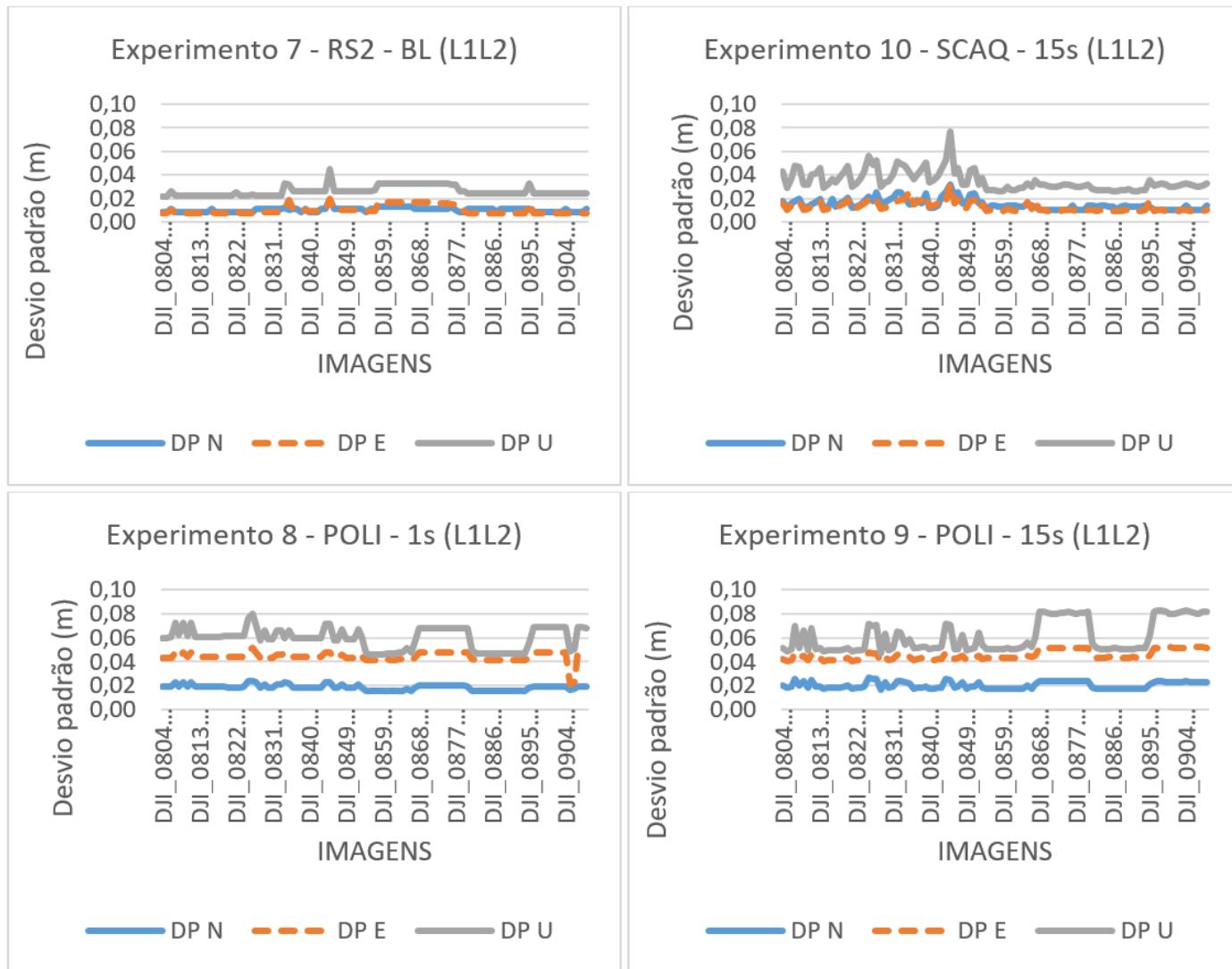


Figura 6 – Precisões das coordenadas E, N e U dos CP para os experimentos de 7 a 10 com LB longa. (elaborado pelos autores)

Considerando todos os experimentos, de 1 a 10, os valores de precisão das coordenadas (estimada automaticamente como desvio padrão pelo software) ficaram geralmente abaixo de 0,09 m tanto para as componentes planimétricas quanto altimétricas, sendo a menor variação encontrada nos experimentos com LB curta.

Ainda em termos de precisão formal, no caso dos experimentos com LB longa, os piores valores de precisão em relação aos resultados com LB curta se devem à duas questões. A primeira é relacionada ao tempo

de ocupação. Conforme recomendado em IBGE (2008), para se ter precisões na ordem de grandeza milimétrica em linhas de base maiores que 100 km o tempo mínimo de ocupação deve ser de no mínimo 4 horas. Uma vez que todo o tempo de ocupação, considerando o período de inicialização, durou cerca de 30 minutos, tem-se resultados em grande parte ao nível do decímetro.

A segunda questão é que os receptores da EMLID não geram as observáveis L2P, somente trabalham com a observável recebida L2C, conforme informações de catálogo disponível em: https://www.guandalinibr.com/wpcontent/uploads/2020/06/PPK2_CATALOGO_V5_2.pdf; e informações contidas no Forum oficial da marca (<https://community.emlid.com/>). Uma vez que somente alguns satélites da constelação GPS transmitem este sinal civil, a formação das observáveis livre de ionosfera ocorre com poucas observáveis. Assim, o número de satélites utilizáveis na solução é mais reduzido do que na solução sem combinação para LB curtas. Isso, juntando com a questão da disponibilidade de satélites para a formação das duplas diferenças, faz com que o sistema de equações em cada época tenha um número menor de equações e de graus de liberdade nos ajustamentos. Consequentemente, as precisões formais são alcançadas com menor precisão.

No caso da LB longa de 115 km para a estação SQAC com 15 s de frequência (experimento 10), os resultados foram melhores, uma vez que a LB é menor. Porém, os resultados ainda são piores do que aqueles obtidos com LB curtas.

Para contornar esta problemática, duas soluções são possíveis para melhorias nos resultados. Ou se utiliza um tempo maior de ocupação em campo na inicialização, o que é pior para o usuário em termos de economia de tempo, ou pode-se utilizar estações virtuais para se ter LB curtas, como realizado por Teppati Losè et al. (2020).

Considerando os resultados de precisões e de todos os testes estatísticos entre os pares de experimentos com LB curta, verifica-se que a trajetória mais indicada em caso de uso de estação RBMC como base é a com 1 s de frequência de aquisição de observáveis, se possível com o kit GPPK2 considerando as observáveis L1 e L2 sem combinação linear. Por outro lado, considerando os resultados para LB longa, verifica-se que a trajetória mais indicada em caso de uso de estação RBMC como base é a com 1 s de frequência de aquisição de observáveis.

Análise das acurárias com pontos de verificação

Na Figura 7 a seguir são apresentados gráficos com valores de exatidões (REQM) planimétricas resultantes de E e N e altimétricas alcançada utilizando-se os pontos de verificação em cada experimento, sem

utilização de pontos de controle (georreferenciamento direto), com um e também com sete pontos de controle. Observa-se que, de forma quase que geral, as exatidões na componente altimétrica se apresentaram piores, isso em virtude de basicamente duas questões. A primeira relacionada à paralaxe (ERCOLIN FILHO, 2017) e a segunda relacionada com a menor precisão das trajetórias na componente U, conforme apresentado anteriormente.

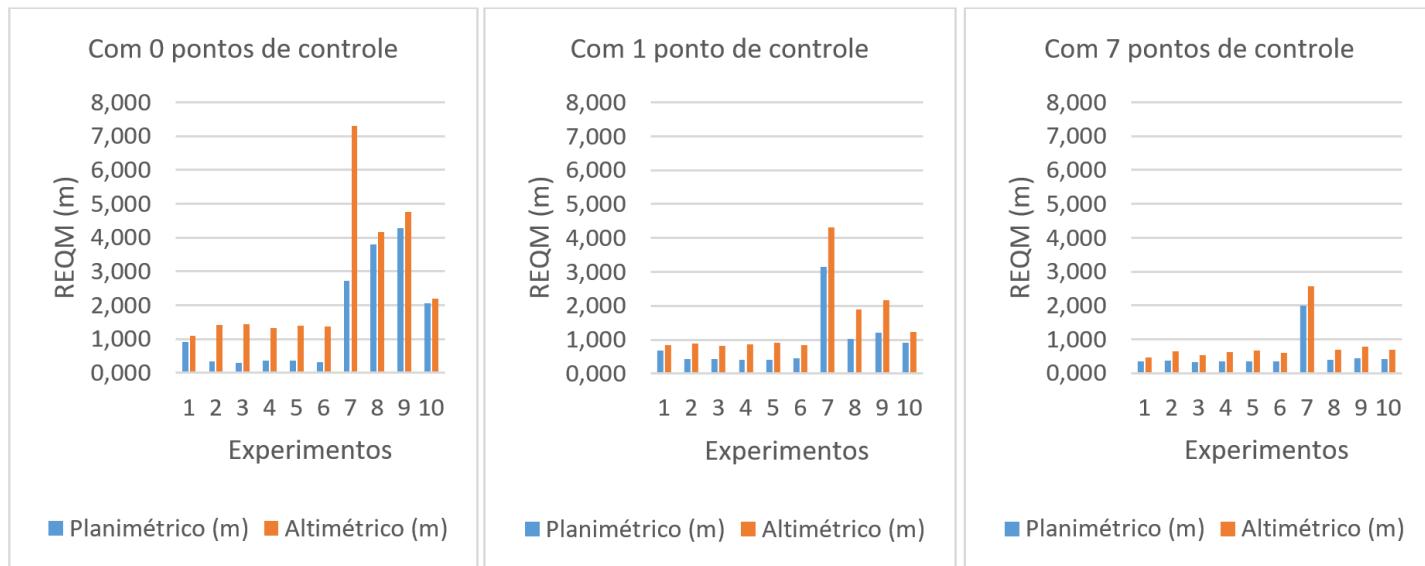


Figura 7 – Acurárias planimétricas e altimétricas nos experimentos, obtidas com Pontos de verificação. (elaborado pelos autores)

Outros resultados que podem ser observados são: i) o menor nível de acurácia nos experimentos com LB longa, em decorrência das piores precisões, e possivelmente piores acuráncias, das coordenadas das trajetórias (Figura 6) e; ii) as melhorias de acurácia com o aumento do número de pontos de controle, indicando que refinamentos nos POI e POE são importantes, principalmente no caso de LB longa. As melhorias com os refinamentos nos POI já eram esperadas, tendo em vista o mesmo tipo de resultado obtido por Ercolin et al. (2020), principalmente na componente U. Neste contexto, cabe ressaltar que, mesmo tendo sido feita a calibração da câmera em voo, os POI tendem a não serem estáveis, uma vez que a câmera não é fotogramétrica. Mesmo que a câmera do Phantom 4 Advanced da DJI seja composta por um obturador mecânico (*global shutter*) e que possua um alto nível de estabilidade, significativamente superior a outros sistemas do fabricante. Porém, como as melhorias foram maiores no caso de LB longa, os refinamentos em POE foram mais efetivos, contornando o problema de pouco tempo de rastreio.

Outro resultado pós refinamento é que as discrepâncias entre as acuráncias nos experimentos diminuíram, com exceção do experimento 7, no qual possivelmente há menor acurácia nas coordenadas da

trajetória. Cabe ressaltar que neste experimento um receptor Emlid RS2 foi utilizado como base, ao invés da estação RBMC POLI, o que justifica a discrepância em relação aos resultados de REQM dos experimentos 8 e 9. No caso do experimento 10, utilizando a estação SCAQ como base, a menor extensão de LB propôs acurácia menores em relação aos experimentos 7, 8 e 9, no caso de georreferenciamento direto e de refinamento com um ponto de controle. Após os refinamentos com sete pontos de controle as diferenças em acurácia foram quase nulas, indicando que com o aumento do número de pontos de controle a questão de extensão de LB torna-se irrelevante.

No caso do experimento 1, com georreferenciamento direto, as piores exatidões planimétricas em relação aos experimentos de 2 a 6 pode estar relacionada à relativa baixa porcentagem de soluções fixas das ambiguidades durante a trajetória.

Com relação à frequência de aquisição de observáveis, com exceção do experimento 1, praticamente não houve diferença nos resultados de LB curta, seja no caso de georreferenciamento direto ou com refinamentos. Já no caso dos experimentos com LB longa, excetuando o experimento 7, o aumento da frequência se mostrou benéfico no caso de georreferenciamento direto e menos relevante com os refinamentos.

Em relação ao uso das frequências L1 e L2 sem combinação no caso dos experimentos envolvendo LB curta (experimentos 4, 5 e 6), em relação aos experimentos 1 e 2, teve-se uma ligeira melhora, decrescente com o aumento no número de pontos de controle. Isso, em concordância com as ligeiras melhorias em termos de precisão de coordenadas de trajetória.

Comparando-se os resultados obtidos nos experimentos de 1 a 6 com os obtidos por Daakir (2017), por Stöcker (2017) e por Dinkov e Kitev (2020) tem-se a mesma ordem de grandeza em termos de exatidões, o centímetro. No caso do uso de georreferenciamento direto, analisando-se valores de exatidões encontrados nos trabalhos de Padró (2019), Kalacska (2020) e Žabota e Kobal (2021) observa-se uma proximidade maior com os resultados obtidos nos experimentos de 7 a 10, uma vez que a ordem de grandeza obtida para o quadro amostral varia entre o decímetro e o metro.

Por fim, após realizadas as fototriangulações foram gerados MDS (Modelo Digital de Superfície) com resolução espacial de 5 cm e ortofotos com resolução espacial de 2,7 cm. A partir da análise posicional planimétrica, à luz PEC-PCD, considerando a classe A, para todos os experimentos, excetuando o experimento 7, a escala indicada é a de 1:5.000. Para altimetria, também considerando classe A, exceto para os experimentos 1 e 7 a escala indicada foi a de 1:10.000. No caso dos experimentos 1 e 7 as escalas indicadas foram de 1:5.000

e 1:25.000, respectivamente.

IV. CONCLUSÕES

Diante de todos os experimentos aqui realizados e dos resultados obtidos em cada um deles, tem-se que o cenário mais vantajoso em termos exatidão e custos para os usuários seria o do experimento 3. Isso uma vez que o arquivo gratuito da base RBMC de 15 s é disponibilizado com 24h e não necessitaria de junção de arquivos de 1 s, disponibilizados com duração de 1h, caso o levantamento tenha um intervalo de tempo que necessite de mais de um arquivo. No contexto de LB curta, o kit GPPK1 já é suficiente, e o uso do kit GPPK2 com a inclusão das frequências L2 não proporciona ganhos de acurácia significativos.

No caso de não ter a possibilidade de uma LB curta, o tempo de inicialização deve ser condizente com o indicado em IBGE (2017), ainda mais que somente o sinal L2C é utilizado, pela limitação do próprio receptor à bordo da RPA, o que diminui a possibilidade de formação de observáveis livre de ionosfera e, assim sendo, a quantidade de satélites disponíveis. Como solução alternativa menos custosa, o uso de estações virtuais como realizado por Teppati Losè et al. (2020) é indicado, e será testado em trabalhos futuros.

No tocante aos processamentos fotogramétricos e as acurárias calculadas com pontos de verificação, entende-se que em relação ao georreferenciamento direto, os efeitos da inclusão de um ponto de controle na fototriangulação se mostraram positivos e ainda mais evidentes com o uso de sete pontos de controle. Neste caso as acurárias melhoraram, principalmente na componente altimétrica. Isso porque pequenas mudanças nos valores de POI podem afetar muito a precisão da orientação do bloco fotogramétrico, principalmente quando nenhum GCP (do inglês *Ground Control Point*) é incluído no processamento.

Entende-se que o uso de um conjunto maior de pontos de controle em campo, aumenta os custos do mapeamento, porém, demonstraram considerável relevância para o refinamento dos POI e principalmente das posições dos CP no caso de LB longa. Cabe ressaltar que, para realizar a análise do PEC-PCD, sempre haverá a necessidade de se obter pontos em campo, neste caso de verificação.

Uma questão muito importante, que pode ser vista em Ercolin Filho et al. (2020), é que melhores resultados podem ser alcançados com maior liberdade de refinamento nas posições dos CP, proporcionada por injunções relativas com pesos menores (injunções menos rígidas). Isto é, considerando incertezas maiores nas coordenadas. Neste contexto, em trabalhos futuros pretende-se testar a utilização de precisões das coordenadas multiplicadas por fatores de escala, como 1,96, (95% na estatística Z) ou 2,58 (99% na estatística Z).

Agradecimentos

O presente trabalho faz parte dos esforços oriundos do termo de cooperação técnica firmado em 2019 entre o Centro de Pesquisas Aplicadas em Geoinformação da UFPR (CEPAG-UFPR) e a empresa Guandalini Posicionamento e renovado em 2020 para este projeto de pesquisa com o intuito de dar continuidade nos estudos relativos ao uso do sistema GPPK desenvolvido especificamente para uso em RPAs.

A empresa Guandalini Posicionamento além de disponibilizar o sistema desenvolvido pela mesma, proporcionou o contato direto com a equipe de desenvolvimento do GPPK e também com as demais áreas da empresa, o que em muito agregou ao desdobramento da pesquisa. A empresa foi fomentadora da bolsa desse projeto e disponibilizou materiais e recursos como laptop, celular e itens relativos a eventuais procedimentos de manutenção.

V. REFERÊNCIAS

- ALVES, C. M. D.; MONICO, J. F. G.; ROMÃO, V. M. C. Análise da acurácia no PPP a partir da solução de ambiguidades GPS em curtos períodos de ocupação. *Revista Brasileira de Cartografia*, N° 63/5, p. 585-600, 2011.
- ANDRADE, J. B. *Fotogrametria*. Curitiba: SBEE, 258 p., 1998.
- BAPTISTA, P.; BASTOS, L.; CUNHA, T.; BERNARDES, C.; DIAS, J. A. Monitoring Sandy Shore Morphologies by DGPS – A Practical Tool to Generate Digital Elevation Models. *Journal of Coastal Research*, v. 24, n.6, p.1516-1528, 2008.
- BARBOSA, E. D. M.; MONICO, J. F. G.; ALVES, D. B. M.; OLIVEIRA, L. C. Integridade no posicionamento RTK e RTK em rede. *BC - Boletim de Ciências Geodésicas*, Curitiba, v. 16, n. 4, 589-605 p., 2010.
- CHANG, X. W.; YANG, X.; ZHOU, T. MLAMBDA: A modified LAMBDA method for integer least-squares estimation. *Journal of Geodesy*, v. 79, n. 9, p. 552-565, 2005.
- COLOMINA, I.; MOLINA, P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*, v. 92, p. 79-97, 2014.
- ERCOLIN FILHO, L. Calibração de um sistema fotogramétrico multi-câmeras para uso em aplicações de mapeamento com georreferenciamento direto. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas). Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.
- ERCOLIN FILHO. L.; PICUSSA, M. S.; DELAZARI, L. S. Análise da acurácia de um sistema de posicionamento cinemático pós-processado a bordo de um vant-rpa para aplicações de mapeamento. *Anais do XI Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas*, Curitiba, Paraná, 2020.
- FERREIRA, E.; CHANDLER, J.; WACKROW, R.; SHIONO, K. Automated extraction of free surface topography using SfM-MVS photogrammetry. *Flow Measurement and Instrumentation*, Loughborough, UK, v. 54, p. 243-249, 2017.

GRAYSON, B.; PENNA, N. T.; MILLS, J. P.; GRANT, D. S. GPS precise point positioning for UAV photogrammetry. *The photogrammetric record*, UK, v. 33, n. 164, p. 427-447, 2018.

GUANDALINI, M. Análise metodológica do posicionamento relativo através do GNSS e suas aplicações na engenharia: uso da técnica RTK/GSM. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

HUANG, J. D.; JACKSON, D. W. T.; COOPER, J. A. G. Morphological Monitoring of a High Energy Beach System Using GPS and Total Station Techniques, Runkerry, Co. Antrim, Northern Ireland. *Journal of Coastal Research*, No. 36, pp. 390-398, ISSN 0749-0208. (DOI: 10211/08-1108.1). 2002.

IBGE. Recomendações para levantamentos relativos estáticos – GPS. Rio de Janeiro: IBGE, 35p., 2008. Acesso em 29 de novembro de 2021, disponível em https://geoftp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/normas/recom_gps_internet.pdf

JAMES, M. R.; ROBSON, S. Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: Accuracy and geoscience application. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, NW, Washington, DC, v. 117, n. F3, 2012.

KALACSKA, M.; LUCANUS, O.; ARROYO-MORA, J. P.; LALIBERTE, E.; ELMER, K.; LEBLANC, G.; GROVES, A. Accuracy of 3d landscape reconstruction without ground control points using different uas platforms. *Drones*, Basel, Switzerland, v. 4, n. 2, p. 13, 2020.

LEICK, A. *GPS SATELLITE SURVEYING*. 3rd Edition, 464 p, 2004.

MONICO, J. F. G. Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações. 2. Ed. São Paulo: Editora UNESP, 476p., 2007.

MORTON, R. A.; LEACH, M. P.; PAINÉ, J. G.; CARDOZA, M. A. Monitoring beach changes using GPS surveying techniques. *Journal of Coastal Research*, 9, 702–720. 1993.

NEX, F.; ARMENAKIS, C.; CRAMER, M.; CUCCI, D. A.; GERKE, M.; HONKAVAARA, E.; KUKKO, A.; PERSELLO, C.; SKALOUD, J. UAV in the advent of the twenties: Where we stand and what is next. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, v. 184, p. 215-242, 2022.

PADRÓ, J. C.; MUÑOZ, F. J.; PLANAS, J.; PONS, X. Comparison of four UAV georeferencing methods for environmental monitoring purposes focusing on the combined use with airborne and satellite remote sensing platforms. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Amsterdam, v. 75, p. 130-140, 2019.

OSCO, L. P.; JUNIOR, J. M.; RAMOS, A. P. M.; JORGE, L. A. C.; FATHOLAH, S. N.; SILVA, J. A.; MATSUBARA, E. T.; PISTORI, H.; GONÇALVES, W. N.; LI, J. A review on deep learning in UAV remote sensing. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Amsterdam, v. 102, p. 102456, 2021.

TAKASU, T.; YASUDA, A. Development of the low-cost RTK-GPS receiver with an open-source program package RTKLlib. In: *International symposium on GPS/GNSS*. International Convention Center Jeju Korea, 2009.

TEPPATI LOSÈ, L.; CHIABRANDO, F.; GIULIO TONOLO, F. Boosting the timeliness of UAV large scale mapping. Direct georeferencing approaches: Operational strategies and best practices. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, v. 9, n. 10, p. 578, 2020.

TEUNISSEN, P. J. G. The least-square ambiguity decorrelation adjustment: a method for fast GPS ambiguity estimation. *Journal of Geodesy*, vol.70, 1995.

TOMMASELLI, A. M. G.; REISS, M. L. L. A Photogrammetric Method For Single Image Orientation And Measurement. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* v. 71, n. 6, pp. 727-732, 2005.

ZUMBERGE, J. F.; HEFLIN, M. B.; JEFFERSON, D. C.; WATKINS, M. M.; WEBB, F. H. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *Journal of geophysical research: solid earth*, v. 102, n. B3, p. 5005-5017, 1997.