

Avaliação da utilização de estações virtuais de referência para o georreferenciamento de imóveis rurais

RESUMO

Este trabalho investiga a possibilidade de se empregar estações virtuais de referência (VRS) no georreferenciamento de imóveis rurais. Para tanto, foi realizada uma simulação de um georreferenciamento em uma propriedade rural da cidade de Monte Carmelo/MG. O rastreamento dos vértices de limite da área foi realizado por meio do método relativo estático. As estações virtuais de referência foram então geradas para a posição das bases rastreadas em campo, o que permitiu uma série de considerações e experimentos. Foram utilizadas algumas técnicas para avaliar a coordenada da estação virtual no Posicionamento por Ponto Preciso, tomando como parâmetro de referência as coordenadas rastreadas com receptores reais. Na sequência, avalia-se a precisão posicional obtida no posicionamento relativo estático baseado em VRS de acordo com o que determina a 3ª Edição da Norma Técnica para o Georreferenciamento de Imóveis Rurais. Os resultados da avaliação da coordenada da VRS mostraram um erro planimétrico médio resultante de 17,1 cm com desvio padrão de $\pm 0,2$ cm para o caso da VRS processada com informações de dupla frequência, resultado considerado satisfatório.

PALAVRAS-CHAVE: GNSS. VRS. Georreferenciamento. Precisão posicional.

Vinicius Francisco Rofatto

vinicius.rofatto@ufu.br

orcid.org/0000-0003-1453-7530

Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Monte Carmelo, Minas Gerais, Brasil.

Jhonatta Willyan Miato Assunção

jhonattamiatoacmc@hotmail.com

orcid.org/0000-0002-4862-5435

Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Monte Carmelo, Minas Gerais, Brasil.

INTRODUÇÃO

O sistema GNSS (*Global Navigation Satellite System*) é um conjunto de sistemas baseados em satélites que tem proporcionado diversas possibilidades em trabalhos de navegação e posicionamento. O GNSS é constituído pela integração entre o GPS (*Global Positioning System*), sistema norte americano; o GLONASS (*GLObalnaya NAVigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*), de propriedade da Rússia - , o europeu Galileo e o sistema chinês Beidou/COMPASS. Além desses, fazem parte ainda o sistema GBAS (*Ground-based Augmentation System*) e SBAS (*Satellite-based augmentation systems*) (ROFATTO, 2014).

Diversos fatores vêm contribuindo para o incremento na qualidade do posicionamento baseado no GNSS. O aumento na quantidade de satélites, o desenvolvimento de novos receptores e softwares de processamento e o advento de novas técnicas de posicionamento permitem que, na atualidade, seja possível o posicionamento altamente preciso em qualquer região da superfície terrestre, mesmo com curtos períodos de ocupação dos pontos ou ainda com o receptor em movimento (SEEBER, 2003).

Todavia, resultados altamente precisos no posicionamento apenas podem ser alcançados após a solução das ambiguidades, fato este que é limitado pela existência de erros associados, principalmente aqueles advindos da ionosfera, troposfera e das órbitas dos satélites (LACHAPPELLE e ALVES, 2002).

O emprego de redes de estações referência, em substituição à utilização de uma única linha base no posicionamento é uma alternativa que aumenta a confiabilidade e a disponibilidade do serviço. Esta consideração permite uma modelagem mais acurada dos erros sistemáticos, além de garantir maior integridade dos dados em caso de falhas no sistema. (FOTOPOULOS e CANNON, 2001; ALVES, 2008; PETOVELLO, 2011).

De acordo com Lachapelle e Alves (2002), em uma rede de estações de referência, utiliza-se modelos de ionosfera e troposfera para gerar correções que são disseminadas ao usuário. Pode-se ainda, por meio destes mesmos modelos, gerar dados GPS para uma estação nas proximidades do receptor móvel. Na primeira abordagem, o software do *rover* deve possuir a capacidade de reconhecer e interpretar tais correções; na segunda, que emprega o conceito de estação virtual de referência (*Virtual Reference Station – VRS*), utiliza-se softwares comuns de processamento.

O conceito de VRS é uma alternativa que surgiu para confrontar e buscar soluções aos principais desafios da geodésia. Consiste na implantação de uma estação de referência virtual, isto é, que não está materializada no terreno, a uma curta distância do receptor móvel (WANNINGER, 1999; EULER et al., 2001; HU, 2002).

No Brasil, o posicionamento baseado em redes é tarefa considerada complexa, dados o número insipiente de estações de referência em relação à extensão do território e a grande distância que separa as estações. O caminho para se solucionar essa deficiência está na densificação da rede (ALVES, 2008), e o presente trabalho enfatizará a possibilidade do emprego de estações virtuais de referência – *Virtual Reference Station (VRS)*.

Com o uso de VRS, usuários que operem na área de abrangência da rede podem posicionar-se, inclusive em tempo real e a grandes distâncias, sem que ocorra diminuição na acurácia. É necessário, entretanto, que exista um link de comunicação confiável para a transmissão dos dados da VRS de um centro de controle para o receptor móvel (HU, 2002).

O conceito VRS também permite a utilização do modo pós-processado. Segundo Alves (2008), neste caso, os arquivos de dados da VRS são gerados diretamente no formato RINEX (*Receiver Independent Exchange Format*), o que permite uma série de aplicações, inclusive para o georreferenciamento de imóveis rurais.

O georreferenciamento de imóveis rurais tem, nos últimos anos, acarretado um aumento significativo na demanda por trabalhos que envolvem o posicionamento pelo GNSS no Brasil. Isso se deve substancialmente à publicação, em 28 de agosto de 2001, da Lei nº 10.267/01. É um requisito indispensável à certificação do imóvel e condição *sine qua non* a realização de qualquer ato de compra e venda, cessão, doação, desmembramento, remembramento ou inventário. Analisar as peças técnicas de um georreferenciamento é atualmente uma obrigação compartilhada entre o INCRA e os cartórios (INCRA, 2015).

Foram determinados prazos-limite para a realização do georreferenciamento e certificação, de acordo com a extensão dos imóveis, sendo o menor prazo provido às propriedades de maior área. Todavia, com a ausência de sanções e com o baixo número de profissionais habilitados a realizar os trabalhos, o número de proprietários que buscam a regularização é sempre inferior à meta estabelecida e os prazos são prorrogados de maneira contumaz.

Fato marcante na certificação de imóveis rurais a partir do georreferenciamento sempre foi a burocracia com que as etapas do processo se desenvolviam. Além da grande quantidade de documentos exigidos, todas as peças técnicas eram entregues de maneira analógica. Como resultado, uma grande quantidade de processos se acumulava e a certificação levava vários anos para acontecer.

Com o objetivo de dinamizar o processo de certificação e estimular um maior número de proprietários rurais a realizá-lo, profissionais ligados ao Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA) e ao Ministério do Desenvolvimento Agrário criaram, no ano de 2012, o Sistema de Gestão Fundiária (SIGEF). “Por ele são efetuadas a recepção, validação, organização, regularização e disponibilização das informações georreferenciadas de limites de imóveis rurais, públicos e privados” (INCRA, 2015).

A Norma Técnica para o Georreferenciamento de Imóveis Rurais (NTGIR) está em sua terceira edição, lançada no ano de 2013. Agora, o texto da norma trata basicamente das condições exigíveis em um georreferenciamento visando à certificação do imóvel rural e apresenta alguns conceitos importantes relacionados ao processo. Critérios técnicos, precisão exigida em cada tipo de limite, técnicas de posicionamento e condições de levantamento podem ser encontrados em dois manuais lançados pelo INCRA: o Manual Técnico de Posicionamento e o Manual Técnico de limites e confrontações.

As vantagens do posicionamento baseado em redes de referência e a possibilidade do emprego de estações virtuais no georreferenciamento de

imóveis rurais motivaram o desenvolvimento deste trabalho. Foi selecionada como área de estudo uma porção de uma propriedade rural denominada “Fazenda Juliana”, situada em Monte Carmelo, Minas Gerais. O desenvolvimento deste trabalho objetiva investigar a possibilidade de se empregar estações virtuais de referência como pontos de apoio no georreferenciamento de imóveis rurais, de maneira que a precisão posicional estabelecida pela 3ª edição da NTGIR seja alcançada.

ESTAÇÕES VIRTUAIS DE REFERÊNCIA: CONCEITOS

O conceito de VRS surgiu fundamentalmente como uma alternativa para se gerar correções a partir uma rede de estações de referência e provê-las ao usuário. Com este mesmo fim, existem ainda outros algoritmos, a saber: algoritmos de derivadas parciais, algoritmos de interpolação e algoritmos de ajustamento condicional.

Enquanto os outros métodos provêm correções a serem disseminadas e interpretadas pelo receptor do usuário, o algoritmo baseado em estações virtuais gera dados de GPS para uma posição próxima ao receptor móvel. De imediato, já se identifica uma vantagem da utilização deste conceito: a aceitação das correções baseadas na rede requer um software capaz de reconhecer os Parâmetros de Correção da Área (*Area Correction Parameters – FKP*); já os dados GPS gerados para a posição da VRS podem ser processados por meio de programas convencionais de processamento de dados GNSS (WANNINGER, 1999; ZHANG e ROBERTS, 2003).

Uma estação virtual deve emular a uma estação real e, portanto, os dados obtidos para a VRS devem assemelhar-se tanto quanto possível aos dados reais de um receptor colocado no mesmo local. Assim, as condições atmosféricas na data e local da geração não podem ser negligenciadas e os erros delas decorrentes devem ser embutidos nas observações da VRS (ALVES; MONICO; DALBELO, 2009).

A solução das ambiguidades é etapa considerada, pela concepção original, fundamental na geração de observações para uma estação virtual e realizada antes de qualquer outro procedimento (WANNINGER, 1999). No entanto, Alves, Monico e Dalbello (2009) e Alves (2008) apresentam uma metodologia diferenciada na qual a VRS é gerada sem solução das ambiguidades, apenas considerando os modelos atmosféricos e o deslocamento geométrico (DG). Para se aplicar o DG, a estação de referência pertencente à rede e que está mais próxima ao usuário é adotada como estação base.

As observáveis da estação de referência base são obtidas pelo receptor que ocupa esta posição. As distâncias geométricas são conhecidas uma vez que as coordenadas do satélite, as posições da VRS e da estação base também são definidas. Os erros sistemáticos também podem ser estimados na estação de referência base comparando as observações esperadas com as observações medidas.

A partir das observações das demais estações de referência em conjunto, são realizados os procedimentos de solução das ambiguidades (quando ocorrem) e a modelagem dos erros. A partir de então, o que resta é deslocar as observações de fase da portadora e pseudodistância da estação base para a posição da VRS e

determinar os erros atmosféricos modelados a partir da rede para o ponto no qual foi criada a estação virtual (HU et al., 2002). Para tanto, faz-se necessário o conhecimento da distância entre o satélite e a estação base (D_B^S), em metros, como mostra a equação (1), e da distância entre o satélite e a VRS (D_V^S), em metros, conforme verificado na equação (2), numa determinada época t (HU et al, 2002; ALVES, 2008):

$$D_B^S(t) = \|X_S - X_B\| \quad (1)$$

$$D_V^S(t) = \|X_S - X_V\| \quad (2)$$

Fazendo a subtração entre a equação (1) e (2), resulta na equação (3):

$$DG(t) = D_B^S(t) - D_V^S(t) \quad (3)$$

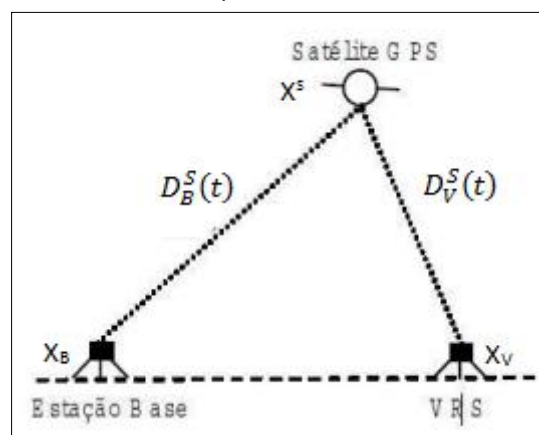
Onde:

X_S, X_B, X_V são as posições dos satélite, da estação base e da VRS, respectivamente, em metros; e

DG é o deslocamento geométrico entre as estação base e a VRS.

A figura (1) mostra os elementos geométricos envolvidos no cálculo do deslocamento geométrico (DG):

Figura 1 – Representação do deslocamento geométrico das observações da estação base para a VRS.



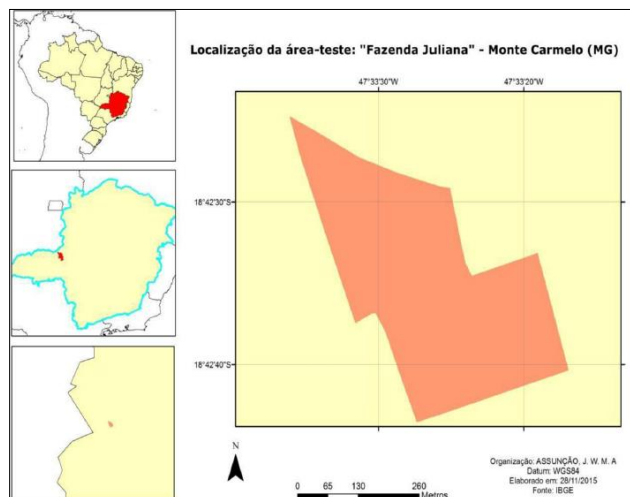
Fonte: Autoria própria (2017).

Depois que o deslocamento geométrico é aplicado aos dados originais da estação base, as correções atmosféricas (efeitos ionosféricos e troposféricos) geradas pelas estações da rede e os respectivos erros residuais devem ser acrescentados aos dados da VRS.

MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo foi realizado em uma porção situada no interior da “Fazenda Juliana”, no município de Monte Carmelo (MG). A área utilizada possui aproximadamente 14,2 ha (Figura 2), de um total de aproximadamente 390 ha que possui a propriedade.

Figura 2 – Localização da área de estudo



Fonte: Autoria própria (2017).

O levantamento dos vértices de limite da área teste ocorreu nos dias 21, 22 e 23 de julho de 2015 (dias do ano: 202; 203; e 204). Os locais mais adequados para a implantação dos pontos de apoio foram escolhidos de forma que ficassem protegidos do manejo realizado na propriedade. Foram implantados dois pontos de apoio, denominados por Base1 e Base2. Os receptores utilizados no rastreamento dos pontos de apoio são do modelo Topcon Hyper V, dupla frequência, precisão horizontal de 3 mm + 0,5 ppm e precisão vertical de 5 mm + 0,5 ppm.

O levantamento dos vértices de limite seguiu a trajetória descrita pelos limites da área-teste em sentido anti-horário. Adotou-se todos os vértices como sendo do tipo M (marco), apesar de a norma facultar sua utilização em caso de limites consolidados, algo que acontece ao longo de algumas confrontações da área. Por se tratar de uma simulação, adotou-se como artificial a caracterização de todos os limites.

O marco geodésico utilizado é confeccionado em material sintético, com formato de tronco piramidal e com dimensões de 8 cm na base menor, 12 cm na base maior e comprimento de 60 cm, pesando 6 kg (Figura 3).

Figura 3 – Marco geodésico em material sintético utilizado no levantamento.



Fonte: Autoria própria (2017).

A implantação dos marcos sobre os vértices de limite foi realizada com o auxílio de materiais de perfuração. Procurou-se manter um mínimo aproximado de 10 cm do corpo do marco não enterrados, conforme mostra a Figura 4.

Figura 4 – Procedimento de implantação dos marcos em campo



Fonte: Autoria própria (2017).

O tempo de rastreio por vértice foi de 30 minutos, com o receptor operando sempre em modo estático (sendo desligado durante o deslocamento de um vértice a outro). Para rastreio dos vértices, foi utilizado um receptor Ashtech, modelo Promark 500, com antena ASH802129, dupla frequência, precisão horizontal estática de 5 mm + 0,5 ppm (pós-processado) e precisão horizontal cinemática RTK de 10 mm + 1 ppm (tempo real). A nomenclatura dos vértices buscou simular um registro profissional junto ao INCRA, e fez a seguinte consideração: o nome do vértice foi dado por CBDA-M-00XX, sendo XX substituído pelo número equivalente ao vértice em questão.

METODOLOGIA PARA GERAÇÃO DE VRS

A geração de VRS parte de duas abordagens principais: com ou sem solução das ambiguidades. Alves (2008) menciona como principal vantagem da geração sem solução das ambiguidades a facilidade de implementação. As estações virtuais foram calculadas sem tal solução, considerando apenas modelos atmosféricos.

Uma vez selecionada a estação base, o sistema insere nos dados dessa estação o deslocamento geométrico, procedimento através do qual as

observações de fase de batimento da portadora e pseudodistância da estação base são deslocadas até a posição da VRS. Também são inseridas às observações da estação base: a diferença da refração troposférica (refração troposférica da base menos refração troposférica da VRS) e a diferença do efeito ionosférico (efeito ionosférico da estação base menos efeito ionosférico da VRS). Para modelagem da troposfera, é possível utilizar modelagem dinâmica (Previsão Numérica do Tempo - PNT) ou Modelo de Hopfield. Para a ionosfera, as opções são os mapas globais (IONEX) ou ainda o modelo local Mod_Ion, desenvolvido por meio de uma parceria entre a UNESP e o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (ALVES, 2008).

As VRS utilizadas nessa pesquisa foram geradas utilizando o Modelo de Hopfield para a troposfera e os mapas globais para a ionosfera. Na previsão do atraso troposférico, após a implementação do Modelo de Hopfield, o sistema utiliza uma função de mapeamento para estimar o valor do atraso na direção receptor-satélite. A função de mapeamento adotada neste caso é a função de mapeamento de Niell. Mais detalhes sobre modelagem do atraso troposférico pode ser encontrado em Sapucci, 2001 e Rofatto, 2014. A modelagem dos efeitos ionosféricos por meio de mapas globais tem como etapa inicial a leitura dos arquivos IONEX que, tal como os arquivos RINEX, possuem formato específico e rotinas pré-programadas para realização da leitura. Como as informações da ionosfera que constituem os modelos são disponibilizadas em grade, o algoritmo armazena os valores do TEC para os 4 pontos que circundam a posição do usuário. Após a armazenagem, duas interpolações são realizadas:

- A primeira, linear, para determinar o valor do TEC para o horário de geração dos dados da VRS;
- A segunda, bi-linear, para calcular o valor do TEC para a posição desejada.

A função de mapeamento geométrica padrão é utilizada para determinar o valor do TEC na direção receptor-satélite. Uma vez realizada a modelagem atmosférica, são gerados os arquivos RINEX para as estações virtuais, seguindo o padrão descrito e disponível em: <ftp://igs.cb.jpl.nasa.gov/pub/data/format/>.

ESTRATÉGIA ADOTADA PARA GERAÇÃO DAS VRS

As estações virtuais foram geradas para a mesma posição dos pontos de apoio rastreados em campo (apresentadas na Figura 3: Apoio1 e Apoio2), e foram denominadas VRS1 e VRS2 para os três dias em que os levantamentos ocorreram. A rede de estações de referência que alimentou o algoritmo é constituída por um conjunto de 8 estações, todas pertencentes à RBMC. A Tabela 1 apresenta a listagem das estações utilizadas e suas coordenadas geodésicas em SIRGAS2000.

Tabela 1 – Localização das estações de referência

| Estação | Latitude | Longitude |
|---------|-------------------|-------------------|
| BRAZ | -15° 56' 50,9112" | -47° 52' 40,3283" |
| GOGY | -16° 39' 53,0225" | -49° 15' 16,8230" |
| MGRP | -19° 12' 35,4982" | -46° 07' 57,1866" |
| MGUB | -18° 55' 8,9880" | -48° 15' 21,7777" |
| SJRP | -20° 47' 7,8683" | -49° 21' 35,8224" |
| SPFR | -20° 30' 38,0646" | -47° 23' 11,9105" |
| SPJA | -21° 14' 27,8639" | -48° 17' 12,1303" |
| UBE1 | -18° 53' 22,3282" | -48° 19' 1,0979" |

Fonte: Autoria própria (2017).

A estação MGUB é aquela que se encontra mais próxima da posição informada (aproximadamente 78 km) e, portanto, foi utilizada como estação base na geração das VRS. Entretanto, para que outras análises pudessem ser realizadas, também se gerou VRS adotando cada uma das outras 7 estações constituintes da rede como estação base, com o objetivo de investigar a correlação existente entre a distância da estação virtual e a base e o erro na coordenada obtida para a VRS. Os arquivos possuem dados de 24 horas para cada dia.

DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS

Os experimentos realizados encontram-se divididos em dois grupos:

- experimentos de avaliação da coordenada da VRS; e
- experimento de avaliação da precisão posicional dos vértices de limite no posicionamento relativo baseado em VRS.

Para o primeiro conjunto de experimentos foi utilizado o serviço de PPP (Posicionamento por Ponto Preciso) online do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). Todas as análises foram feitas com o arquivo VRS1 para o dia do ano 202, tendo em vista que em nossas análises as diferenças nas coordenadas da VRS comparando os três dias de levantamento não foram significativas. Para o segundo grupo, utilizou-se o método relativo estático, de forma que os dados GNSS foram processados no software Topcon Tools v.7.5.1.

Foi adotada como referência a coordenada do ponto de apoio rastreado em campo para obter o erro planimétrico resultante, conforme demonstrado na equação 4. As comparações foram feitas em termos das coordenadas planas UTM (E,N).

$$E_p = \sqrt{dE^2 + dN^2} \quad (4)$$

Na equação 4 E_p é o erro planimétrico resultante; dN é a diferença entre a coordenada N de referência e a N da VRS; dE diferença entre a coordenada E de referência e a E da VRS.

EXPERIMENTO 1: CORRELAÇÃO ENTRE A DISTÂNCIA DA ESTAÇÃO BASE E O ERRO PLANIMÉTRICO RESULTANTE

Neste experimento, os dados das estações virtuais geradas utilizando cada uma das 8 estações de referência como base foram avaliados por meio do IBGE-PPP. A comparação das coordenadas obtidas para cada uma delas com o valor de referência resultou em um erro planimétrico resultante, e este experimento avaliou a aderência existente entre a distância da estação base para a VRS e o erro planimétrico resultante na coordenada. A Tabela 2 apresenta as distâncias entre cada uma das estações base e a posição da estação virtual VRS1.

Tabela 2 – Distância entre cada estação base a VRS

| Estação | Distância (Km) |
|---------|----------------|
| BRAZ | 309 |
| GOGY | 290 |
| MGRP | 160 |
| MGUB | 78 |
| SJRP | 198 |
| SPFR | 289 |
| SPJA | 84 |
| UBE1 | 295 |

Fonte: Autoria própria (2017).

Utilizou-se o modelo de correlação linear de Pearson (r). O valor de r é um número real entre -1 e 1 , e a qualificação da correlação é perfeita positiva quando r é igual a “ 1 ”, e perfeita negativa quando r é igual “ -1 ”.

EXPERIMENTO 2: AVALIAÇÃO DO ERRO PLANIMÉTRICO RESULTANTE NA PARA A COORDENADA DA VRS A PARTIR DO PROCESSAMENTO DE SIMPLES E DUPLA FREQUÊNCIA PARA DIFERENTES INTERVALOS DE DADOS

Neste experimento, o arquivo de 24 horas de observações da VRS foi manipulado de maneira que se gerassem arquivos com tempos de dados de 2, 4, 6 e 12 horas, além do arquivo completo de 24 horas. A seguir, para cada novo item gerado, foi realizada nova edição para que fossem criados arquivos que possuíssem apenas observações da portadora L1. Essas manipulações foram realizadas por meio do aplicativo teqc da UNAVCO, que opera por linhas de comando no próprio prompt do “Windows”. A Tabela 3 mostra uma listagem dos arquivos utilizados para essa avaliação.

Tabela 3 – Estratégias de processamento dos dados GNSS

| Intervalo dos dados (horas) | Tipo de Observação |
|-----------------------------|--------------------|
| 2 | L1 e L1&L2 |
| 4 | L1 e L1&L2 |
| 6 | L1 e L1&L2 |
| 12 | L1 e L1&L2 |
| 24 | L1 e L1&L2 |

Fonte: Autoria própria (2017).

A coordenadas obtidas a partir do processamento de cada um dos arquivos foram comparadas ao valor de referência, e realizou-se a análise do erro planimétrico resultante. Nesse mesmo experimento, realizou-se também a análise da correlação entre o erro planimétrico resultante e o tempo de rastreamento, considerando simples frequência e dupla frequência. O modelo utilizado foi a de correlação linear de Pearsons.

EXPERIMENTO 3: AVALIAÇÃO DA PRECISÃO POSICIONAL DOS VÉRTICES DE LIMITE NO POSICIONAMENTO RELATIVO BASEADO EM VRS

Esse experimento está diretamente relacionado ao objetivo geral desta pesquisa, que é avaliar se a precisão posicional obtida no posicionamento baseado em VRS atende à precisão posicional preconizada pelo INCRA para os vértices de limite.

Como já mencionado, considerou-se que todos os vértices levantados são do tipo M (marco) e, para esse tipo de vértice, a norma determina uma precisão posicional melhor ou igual a 0,5 m.

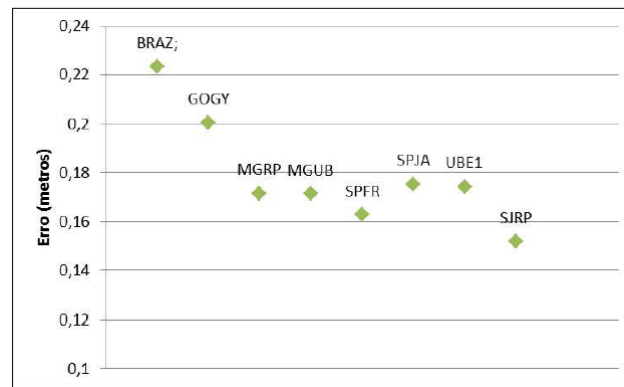
Procedeu-se o processamento dos dados do levantamento no Topcon Tools. Foram utilizadas as efemérides precisas IGS (International GNSS Service). Foi realizada uma comparação vértice a vértice das precisões posicionais no método relativo estático entre o processamento realizado com os arquivos reais e o processamento realizado com os arquivos virtuais, para o total de 30 minutos de rastreamento.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

EXPERIMENTO 1

A Figura 5 apresenta os valores do erro planimétrico (E_p) resultante para as VRS geradas com base em cada uma das estações da rede, no processamento realizado no IBGE-PPP.

Figura 5 – Erro planimétrico para cada estação utilizada como base na geração da VRS1



Fonte: Autoria própria (2017).

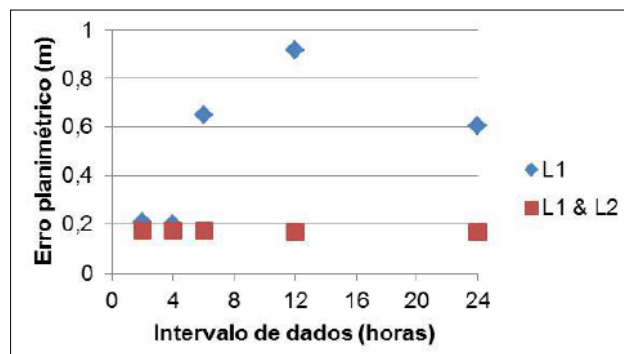
O Ep médio foi de 0,173 m, com desvio padrão de $\pm 0,021$ m. A maior diferença foi encontrada na VRS gerada com base na estação BRAZ (0,211 m com distância de 309 km para a posição da VRS), e a menor diferença corresponde ao valor referente à estação SJRP (0,15 m com distância de 295 km).

O cálculo da correlação linear resultou em 0,371, o que a qualifica como correlação fraca positiva. Esse índice revela que o aumento da distância em relação à estação base aumenta o erro na coordenada da VRS, porém de forma discreta. A fraca correlação em parte se explica pela própria composição da rede; 3 estações estão próximas e localizadas no Estado de São Paulo (SPJA, SJRP e SPFR), o que propiciou uma melhor modelagem dos erros para essa porção da área de abrangência da rede. Essa constatação justifica o fato de os dois menores valores para o erro resultante terem sido verificados nas estações SJRP e SPFR.

EXPERIMENTO 2

A Figura 6 mostra um comparativo entre as variações do erro planimétrico resultante para a VRS utilizando simples e dupla frequência, para diferentes intervalos, com os dados processados no IBGE-PPP.

Figura 6 – Comparativo entre o erro planimétrico resultante para simples e dupla frequência a diferentes intervalos de dados



Fonte: Autoria própria (2017).

A Tabela 4 mostra os valores do erro planimétrico médio, máximo e mínimo, além do desvio padrão, considerando simples frequência e dupla frequência.

Tabela 4 – Estatística para o erro planimétrico considerando as abordagens de simples e dupla frequência, para diferentes intervalos de dados

| Estatísticas | L1 | L1&L2 |
|-------------------|-------|-------|
| Máximo (m) | 0,915 | 0,172 |
| Mínimo (m) | 0,201 | 0,167 |
| Média (m) | 0,516 | 0,171 |
| Desvio-Padrão (m) | 0,309 | 0,002 |

Fonte: Autoria própria (2017).

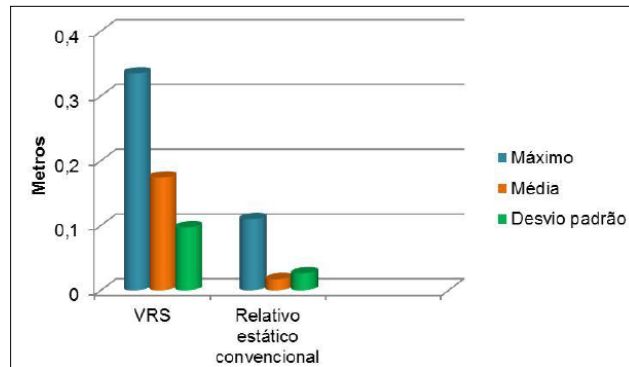
Atentando-se especialmente ao valor do erro planimétrico para a simples frequência, observou-se um comportamento anômalo quanto à análise para a L1. Para os intervalos de 6 horas e 12 horas observou-se aumento no erro planimétrico quando comparados aos intervalos anteriores. Sabendo que o aumento no número de observações propicia maior redundância de dados e maiores alterações na geometria dos satélites e, por consequência, melhora a coordenada obtida, investigou-se as possíveis causas para esse comportamento. A causa identificada está no período do dia para o qual os arquivos foram editados: parte desses arquivos foi constituída por dados relativos aos períodos do dia nos quais as variações diárias da ionosfera exercem maior influência sobre as observações GNSS (ver, por exemplo, em Matsuoka, 2007). Fruto desta constatação, o valor da correlação linear entre a sessão de observação e o erro planimétrico resultante foi de 0,537 para L1.

A média do erro para L1&L2 foi de 0,172 m com desvio padrão de $\pm 0,002$ m, indicando grande aderência entre as observações. A correlação obtida entre o erro planimétrico foi muito forte no sentido negativo (-0,9), indicando que o aumento no tempo de rastreamento provoca diminuição no erro. Isso se deve ao fato que a combinação íon-free (L0), observável utilizada no PPP, minimiza os efeitos de primeira ordem da ionosfera. O baixo valor para o desvio padrão indica que a utilização de dupla frequência tende a reduzir a influência do tempo de rastreamento na exatidão da coordenada. De forma geral, a utilização de dupla frequência ocasionou uma melhoria de 67% em relação à abordagem que utiliza simples frequência.

EXPERIMENTO 3

Este experimento consistiu em analisar a precisão posicional das coordenadas dos vértices de limite no posicionamento baseado em VRS. A Figura 7 ilustra as medidas de posição e dispersão para o posicionamento relativo estático convencional (uma base e um rover) e para o posicionamento relativo estático baseado em VRS.

Figura 7 – Medidas de posição e dispersão para o caso de dupla frequência.



Fonte: Autoria própria (2017).

A Tabela 5 apresenta os valores da precisão posicional para cada vértice, comparando os valores obtidos para o arquivo real com os valores obtidos para o arquivo virtual como base.

Tabela 5 – Valores de precisão posicional comparados vértice a vértice para o caso de dupla frequência

| Vértice | Ponto de Apoio Real | VRS |
|-------------------------|---------------------|-------|
| CBDA-M-0001 | 0,001 | 0,248 |
| CBDA-M-0002 | 0,002 | 0,044 |
| CBDA-M-0003 | 0,028 | 0,047 |
| CBDA-M-0004 | 0,11 | 0,209 |
| CBDA-M-0005 | 0,004 | 0,158 |
| CBDA-M-0006 | 0,004 | 0,231 |
| CBDA-M-0007 | 0,003 | 0,184 |
| CBDA-M-0008 | 0,004 | 0,161 |
| CBDA-M-0009 | 0,007 | 0,321 |
| CBDA-M-0010 | 0,006 | 0,112 |
| CBDA-M-0011 | 0,027 | 0,323 |
| CBDA-M-0013 | 0,006 | 0,091 |
| CBDA-M-0014 | 0,007 | 0,192 |
| CBDA-M-0015 | 0,006 | 0,027 |
| CBDA-M-0016 | 0,008 | 0,212 |
| CBDA-M-0017 | 0,045 | 0,335 |
| CBDA-M-0018 | 0,021 | 0,054 |
| Máxima(m) | 0,11 | 0,335 |
| Mínima(m) | 0,001 | 0,027 |
| Média(m) | 0,017 | 0,174 |
| Desvio-padrão(m) | 0,026 | 0,097 |

Fonte: Autoria própria (2017).

A precisão posicional média para o posicionamento relativo estático convencional (0,017 m com desvio padrão de 0,026 m) foi aproximadamente 10 vezes melhor que a precisão posicional obtida no posicionamento relativo estático baseado em VRS (0,174 m com desvio padrão de 0,097 m).

Entretanto, a principal análise a ser feita, considerando esta abordagem, é identificar se a precisão posicional requerida para o georreferenciamento de imóveis rurais foi atingida pelos vértices processados em relação à estação virtual. Observa-se, para este caso, que a pior precisão posicional (valor máximo da série) foi de 0,335 m. Sabendo que a norma determina uma precisão melhor ou igual a 0,5 m, conclui-se que a abordagem baseada em estação virtual de referência como ponto de apoio ao posicionamento relativo estático ATENDE ao que determina a 3ª edição da NTGIR para TODOS os vértices de limite.

CONCLUSÃO

A avaliação realizada sobre a coordenada da VRS gerada apresentou resultados significativos e satisfatórios. Considerando-se tempos de dados de 2, 4, 6, 12 e 24 horas para o processamento de dupla frequência, o erro planimétrico médio de 0,174 m em relação à coordenada real.

No que diz respeito à análise da coordenada da VRS para o processamento da frequência L1, recomenda-se que novos estudos sejam realizados para horários diferentes, de modo que se evite observações em horários sujeitos aos efeitos da variação diária da ionosfera.

Foi atestada a existência de correlação forte e negativa entre o tempo de observações para a VRS e o erro planimétrico resultante em suas coordenadas para o caso de dupla frequência.

A precisão posicional preconizada pelo INCRA para os vértices de limite foi atingida, e a pior precisão posicional obtida para o processamento baseado em VRS foi de 33,5 cm.

O conceito de VRS ainda é pouco explorado no Brasil, porém tem apresentado resultados promissores. O desenvolvimento de modelagens atmosféricas locais e a densificação da rede de estações de referência são de fundamental importância para que algoritmos de geração de estações virtuais com solução das ambiguidades apresentem resultados de alta qualidade.

Evaluation of the use of virtual reference stations in geo-referencing of rural properties

ABSTRACT

This paper investigates the possibility of using virtual reference stations (VRS) in geo-referencing of rural properties. For this, a simulation of a georeferencing was carried out on a farm in the city of Monte Carmelo (MG). The boundary vertices of the area were carried out according to what determines the method of static surveying. Virtual reference stations are then generated for the position of bases tracked in the field, which allowed a number of considerations and experiments. We used some techniques to evaluate the coordinate of virtual station in Precise Point Positioning, taking as a benchmark crawled coordinated with real receivers. As a result, it evaluates the positional accuracy obtained in static relative positioning based on VRS according to what determines the Brazilian technical standard for geo-referencing of rural properties, called "Norma Técnica para o Georreferenciamento de Imóveis Rurais". The results of the evaluation of coordinate VRS showed a horizontal error resulting average of 17.1 cm with a standard deviation of ± 0.2 cm in the case of VRS processed with dual frequency information, a result considered satisfactory.

KEYWORDS: GNSS. VRS. Geo-referencing. Positional accuracy.

AGRADECIMENTO

Os autores agradecem a Professora Daniele Barroca Marra Alves do Departamento de Cartografia da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita Filho” (FCT/UNESP) pela disponibilidade do software para geração das VRS.

REFERÊNCIAS

ALVES, D. B. M.. **Posicionamento GPS utilizando o conceito de estação virtual**. 2008. 165 f.. Tese (doutorado). Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita Filho”, Presidente Prudente, 2008.

ALVES, D. B. M.; MONICO, J. F. G.; DALBELO, L. F. A. Análise do modelo troposférico empregado na geração de uma estação de referência virtual utilizando o posicionamento por ponto preciso. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 15, p. 373-387, 2009. <http://dx.doi.org/10.5380/bcg.v15i3.15504>.

BRASIL. Lei Federal nº 10.267: Georreferenciamento de imóveis rurais e outras providências. DOU; Ago. 2001.

BRICEÑO, J. G.. Avaliação do posicionamento estático para distâncias médias. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 7, p. 79-88, 2001. <http://dx.doi.org/10.5380/bcg.v7i2.1391>.

EULER, H. J. et al.. Study of a Simplified Approach in Utilizing Information from Permanent Reference Station Arrays. **ION GPS**, Salt Lake City, 2001.

FOTOPOULOS, G. Parameterization of DGPS Carrier Phase Errors Over a Regional Network of Reference Stations. 2000. 202f. Dissertação (MSc) – University of Calgary, Calgary, 2000.

FOTOPOULOS, G.; CANNON, M. E. An Overview of Multi-Reference Station Methods for Cm-Level Positioning. **GPS Solutions**, Vol. 4, No. 3, p. 1-10, 2001. <http://dx.doi.org/10.1007/PL00012849>.

GEMAEL, C. **Introdução ao Ajustamento de Observações**: aplicações geodésicas. Curitiba (PR), Brasil: Editora UFPR, 1994.

HU, G. R.. et al.. Internet-based GPS VRS RTK Positioning with a Multiple Reference Station Network. **Journal of Global Positioning System**, [S.l.], Vol. 1, No. 2: 113-120, 2002. Disponível em <http://file.scirp.org/Html/213.html>. Acesso em 1 Agosto de 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (Brasil). **Geociências: geodésia**. Disponível em <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/rbmc/rbmcpesq.shtm?c=9>. Acesso em 13 Jul. 2015.

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

INSTITUTO NACIONAL DE COLONIZAÇÃO E REFORMA (Brasil). **Sistema de Gestão Fundiária (SIGEF)**. Disponível em <https://sigef.incra.gov.br/>. Acesso em 1 Ago. 2015.

LACHAPELLE, G. e ALVES, P. Multiple Reference Station Approach: Overview and Current Research. **Journal of Global Positioning System**, v.1, n.2, p.133-136, 2002. Disponível em <http://file.scirp.org/Html/215.html>. Acesso em 1 Agosto de 2015.

LEICK, A. **GPS satellite surveying**. 3 ed. Hoboken (NJ), United States of America: Wiley, 2004. 399.

MATSUOKA, M. T. **Influência de diferentes condições da ionosfera no posicionamento por ponto com GPS: avaliação na região brasileira**. 2007. 264 f. Tese (doutorado). Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita Filho”, Presidente Prudente, 2007.

MONICO, J. F. G. Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações. 2 ed. Editora UNESP, 2008. 480 p.

PETOVELLO, M.. Virtual Reference Stations: what is virtual reference station and how does it work?. **GNSS Solutions**, July/Aug. 2011. Disponível em <<http://www.insidegnss.com/node/2687>>. Acesso em 1 de agosto de 2015.

PUGLIANO, G. et al. Performancing analysys of a Post-Mission RTK Network DGPS Positioning Approach. **11th World Congress of International Association of Institutes of Navigation**, Berlim, 2003.

ROFATTO, V. F. ZTD em tempo quase real via Estações GNSS Terrestres: estratégia de processamento para o GIPSY-OASIS II e combinação das séries temporais. 2014. 137 f. Dissertação (mestrado). Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita Filho”, Presidente Prudente, 2014.

SAPUCCI, L. F. **Estimativa do Vapor D’água Atmosférico e a Avaliação da Modelagem do Atraso Zenital Troposférico Utilizando GPS**. 2001. 167f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy**. Berlin: de Gruyter, 2003.

WANNINGER, L.. The Performance of Virtual Reference Stations in Active Geodetic GPS-networks under Solar Maximum Conditions. **ION GPS**, Nashville, 1999.

XU, G. **GPS: theory, algorithms and applications**. 2 ed. Berlin, Germany: Springer, 2007. 353 p.

ZHANG, K.; ROBERTS C. Network-Based Real-Time Kinematic Positioning System: Current Development in Australia. In: **Geoinformatics and Surveying Conference**, 2003, The Institute of Surveyor, Malasia, 2003.

Recebido: 01 nov. 2016

Aprovado: 27 jul. 2017

DOI: 10.3895/rbgeo.v5n3.5514

Como citar: ROFATTO, V. F.; ASSUNÇÃO, J. W. M. Avaliação da utilização de estações virtuais de referência para o georreferenciamento de imóveis rurais. **R. bras. Geom.**, Curitiba, v. 5, n. 3, p. 361-379, jul/set. 2017. Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.br/rbgeo>>. Acesso em: XXX.

Correspondência:

Vinicius Francisco Rofatto

Rua Matusalém de Freitas Cardoso, 27, CEP 38500-000, Monte Carmelo, Minas Gerais, Brasil.

Direito autoral: Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

