

Melhorias e perspectivas obtidas com o uso do Galileo no posicionamento GNSS em linhas de base longas

RESUMO

Os últimos 50 anos foram marcados por grandes avanços tecnológicos devido às necessidades econômicas, civis e militares da população mundial. Na década de 70, o surgimento do sistema norte-americano denominado como Navstar-GPS (Navigation System Using Timing And Ranging - Global Positioning System) foi responsável por revolucionar o posicionamento e a navegação. Em paralelo, o governo da extinta União Soviética desenvolveu um sistema concorrente ao GPS, denominado GLONASS (Globalnaya Navigazionnaya Sputnikovaya Sistema). À medida que esses sistemas foram aprimorados, outros países começaram a utilizá-los em aplicações de grande relevância, tais como navegação aérea, marítima e mesmo terrestre, além de muitas outras atividades em que o conhecimento da posição se faz necessário. Com o passar do tempo, outros países começaram a investir recursos financeiros para desenvolver e colocar em órbita seus próprios satélites de posicionamento. Desde março de 2018, a constelação da União Europeia, denominada como Galileo, se tornou operante. O Galileo é o primeiro sistema desenvolvido para fins civis a priori. Apesar de ser novo em comparação aos sistemas americano e russo, espera-se que a constelação Galileo forneça uma melhora significativa em sua acurácia para posicionamento, proporcionando maior segurança e qualidade nos produtos obtidos. Nesse sentido, o presente artigo visa avaliar os ganhos e perdas obtidos considerando as componentes das coordenadas no sistema geodésico local, N (norte), E (leste e perpendicular a N) e U (normal ao elipsoide de referência), no posicionamento relativo com linhas de base longas na região brasileira, com a incorporação do sistema Galileo no posicionamento pelo GNSS. Como resultados obteve-se ganhos planialtimétricos de até 25%.

PALAVRAS-CHAVE: GNSS. Galileo. Posicionamento Relativo.

Thomas Felipe de Lima

thomasfelipedelima@gmail.com

orcid.org/0000-0002-7043-4336

Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, Paraná, Brasil.

Maria Carolina Kmiecik

mariakmiecik@ufpr.br

orcid.org/0000-0002-1465-6874

Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, Paraná, Brasil.

Paulo Sérgio de Oliveira Júnior

psergio.j@gmail.com.br

orcid.org/0000-0001-7000-6924

Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, Paraná, Brasil.

João Francisco Galera Monico

galera.monico@unesp.br

orcid.org/0000-0003-4101-9261

Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP), Presidente Prudente, São Paulo, Brasil.

INTRODUÇÃO

Os Sistemas GNSS possibilitam a obtenção de coordenadas de um ponto qualquer na superfície terrestre, o que possibilita conhecer a posição do usuário no espaço.

Demonstrando a importância dos sistemas de posicionamento, a reportagem com o título “O que aconteceria se o GPS parasse de funcionar”, publicada pelo jornal BBC e escrita por Tim Harford (autor de diversos livros de economia), apresenta que se caso o sistema de posicionamento GPS parasse de funcionar, calcula-se um prejuízo para o mundo de aproximadamente U\$1 bilhão de dólares nos primeiros 5 dias. Se durasse mais, diversos serviços simplesmente parariam de funcionar. (HARFORD, 2019).

Observando essa situação e a dependência dos sistemas GNSS, a União Europeia vem desenvolvendo, desde meados dos anos 2000, seu próprio sistema de posicionamento e, diferente dos outros, será ininterrupto e voltado principalmente para fins civis (HECKER et al. 2018). Faz alguns anos que o Galileo se tornou disponível para um número mais expressivo de receptores e já é possível determinar melhorias com sua utilização, principalmente se combinado com os outros sistemas GNSS disponíveis.

Pesquisadores nacionais e internacionais se propuseram a analisar o desempenho do Sistemas GNSS, principalmente utilizando a combinação de diferentes constelações. Estudos já apresentados na literatura incluem, por exemplo, investigações e análises no posicionamento a partir da modernização dos sistemas GNSS (POLEZEL 2010). Também há outros estudos que analisaram os impactos da utilização de multi-constelações GNSS (GPS e GLONASS) para o posicionamento relativo, no qual foi possível observar melhorias substanciais (69.18% dos casos) a partir do uso de mais de uma constelação (JEREZ et al. 2018). E referente ao sistema Galileo, existem alguns trabalhos em nível nacional que avaliaram a acurácia no posicionamento por ponto, onde foram observadas melhorias no posicionamento utilizando o Galileo com outras constelações GNSS (SETTI JÚNIOR et al. 2016), também foi realizado estudos referentes a fixação rápida das ambiguidades em linhas de base longas a partir da utilização do Galileo e GPS (SILVA, 2021). Contudo, ainda são escassos os estudos sobre os ganhos com incorporação do sistema Galileo no posicionamento relativo de linhas de base longa na região brasileira.

A contribuição apresentada adiante discute se é possível perceber melhorias utilizando o sistema europeu no posicionamento relativo para linhas de base longas. Para isso, foi realizada uma série de experimentos pelo método de posicionamento relativo com diferentes linhas de base. Para essas linhas de base, foram selecionadas estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC), que rastreiam continuamente as três principais constelações GNSS (GPS, GLONASS e Galileo).

MATERIAIS E MÉTODOS

Utilizando como base as informações fornecidas pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), responsável pela RBMC (Rede Brasileira de

Monitoramento Contínuo), constatou-se que 32 estações realizavam o rastreamento do Sistema GNSS Europeu, para o ano de 2020.

AQUISIÇÃO DE DADOS GNSS

Iniciando o processo para comparação do posicionamento utilizando a constelação do Galileo, a primeira etapa executada foi a separação de dados referentes a uma semana GPS. Para isso, foi escolhido o período entre os dias 05 e 11 de julho de 2020, devido a disponibilidade de dados referentes ao Galileo, para as estações de Brasília – DF (BRAZ), Curitiba – PR (UFPR), Palmas -TO (PALM) e Tupã – SP (SPTU).

Para a aquisição dos dados referentes a esse período e locais, foram utilizadas as informações de rastreamento disponibilizadas pelo IBGE. Foram analisadas duas diferentes situações, sendo a primeira uma linha de base de aproximadamente 410 km, utilizando os dados da estação UFPR e SPTU. A segunda linha base processada e analisada foi em relação as estações de BRAZ e TOPL, com uma distância de aproximadamente 640 km. Para ambas as linhas de base utilizou-se sessões de rastreamento com duração de 1 hora. A figura 1 apresenta as estações processadas e as linhas de base formadas.

Figura 1 – Linhas de Base processadas



Fonte: Autoria própria (2022).

PROCESSAMENTO DOS DADOS

Para esta pesquisa foi utilizado o software comercial *Leica Infinity*, sendo este capaz de ler e processar arquivos de diferentes constelações GNSS. Os parâmetros de processamento utilizados para o experimento podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros de Processamento

Parâmetro	Selecionado
Ângulo de Corte	10°
Frequência	Dupla frequência (L1+L2)
Taxa de Amostragem	Usar Todos
Constelações GNSS	GPS/GLONASS/GALILEO
Tipo de Efemérides	Precisas
Conjunto de Calibração da Antena	<i>NGS14 Absolute</i>
Tipo de Solução	Fase Fixa
Minimização dos efeitos da ionosfera	Combinação <i>Ionospheric-free</i>
Modelo Troposférico	<i>VMF (Vienna Mapping Function)</i> com modelo <i>GPT2 (Global Pressure and Temperature 2)</i>
Ambiguidades fixadas para linhas de base menores que	500 km

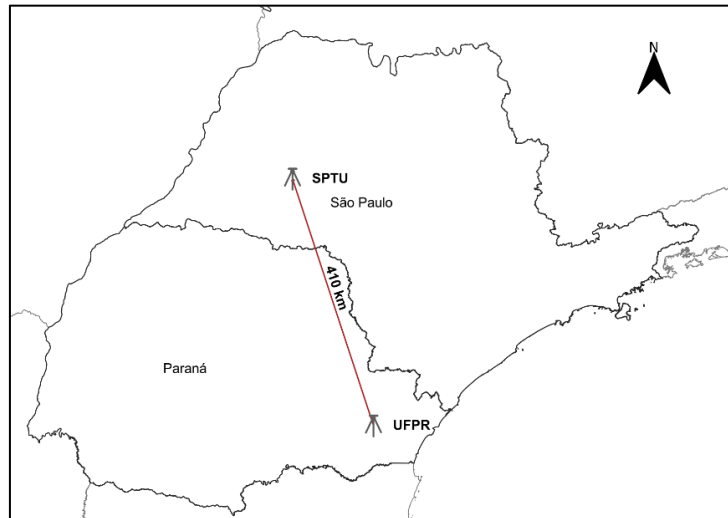
Fonte: Autoria própria (2022).

Com os dados separados referentes aos dias 187 a 191 (5 a 11 de julho), foi dado início ao processamento de dados. Optou-se por utilizar para ambas as linhas de base o período referente às 12:00 UTC (doze horas) até as 13:00 UTC (treze horas). Estes horários foram escolhidos devido à grande incidência solar e pelo fato de ser um horário em que usualmente se realizam trabalhos de campo envolvendo posicionamento. O processamento foi realizado com as seguintes configurações: GPS e GLONASS; GPS e Galileo; GLONASS e Galileo; e GPS, GLONASS e Galileo

PROCESSAMENTO DA LINHA DE BASE UFPR-SPTU

Para essa linha de base, foi definido que a UFPR seria a estação de referência e a estação SPTU seria o considerado como o Rover. A representação da linha de base, pode ser observada na figura 2.

Figura 2 – Representação da linha de base UFPR-SPTU



Fonte: Autoria própria (2022).

PROCESSAMENTO DA LINHA DE BASE BRAZ-TOPL

A próxima etapa foi o processamento de uma linha com o dobro da distância, a fim de verificar o comportamento das diferentes combinações das constelações GNSS. Essa análise é importante, pois à medida que a distância aumenta, em teoria, o impacto do uso de constelações adicionais GNSS se torna mais evidente. A linha de base escolhida para ser processada foi referente as estações de monitoramento contínuo de Brasília e Palmas (Figura 3). A distância entre elas é de aproximadamente 640 km e estão mais próximas da linha do Equador do que as dos outros processamentos, sendo assim, elas estão mais suscetíveis a possíveis interferências externas como por exemplo a atmosfera.

Figura 3 – Representação da linha de base BRAZ-TOPL



Fonte: Autoria própria (2022).

ANÁLISE DE ACURÁCIA

Uma das possibilidades de se realizar a análise da qualidade das coordenadas é calcular o tamanho do vetor de erro em 2D (utilizando apenas as coordenadas planimétricas) e em 3D (utilizando as coordenadas planimétricas e a altitude elipsoidal) através das equações 1 e 2. Para o cálculo, utilizou-se como coordenadas de referência aquelas presentes no descritivo da estação da RBMC, fornecidas pelo IBGE.

$$\text{Erro em 2D} = \sqrt{\text{DAE}^2 + \text{DAN}^2} \quad (1)$$

onde:

- a) Erro em 2D: vetor planimétrico de erro em relação às coordenadas absolutas;
- b) DAE: diferença entre as coordenadas absolutas em E;
- c) DAN: diferença entre as coordenadas absolutas em N.

$$\text{Erro em 3D} = \sqrt{\text{DAE}^2 + \text{DAN}^2 + \text{DAh}^2} \quad (2)$$

onde:

- a) Erro em 3D: vetor planialtimétrico de erro em relação às coordenadas absolutas;
- b) DAh: diferença entre as altitudes elipsoidais.

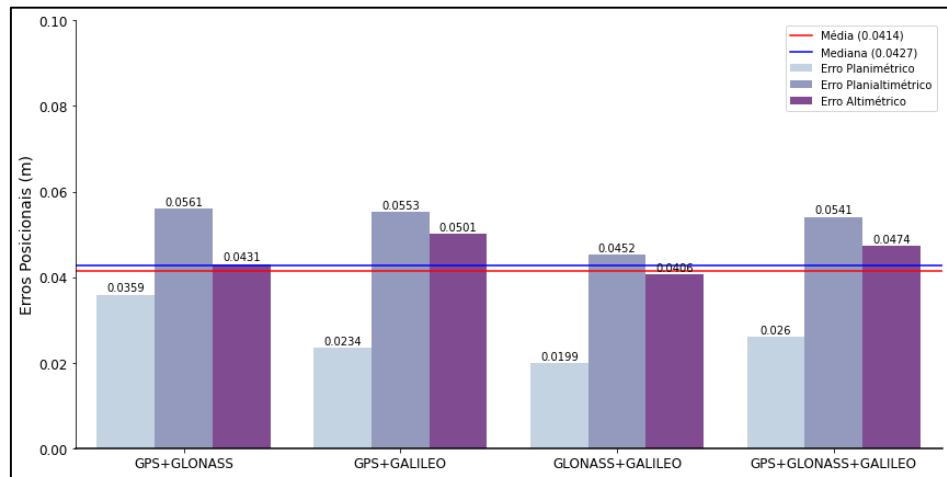
Com os vetores de erro é possível determinar a média de erros para a linha de base. Essa média foi obtida por meio da soma de todos os valores das diferentes constelações em todos os dias de processamento e pela divisão deste valor pelo número de vezes que essa constelação foi analisada.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

RESULTADOS E ANÁLISES DA LINHA DE BASE UFPR-SPTU

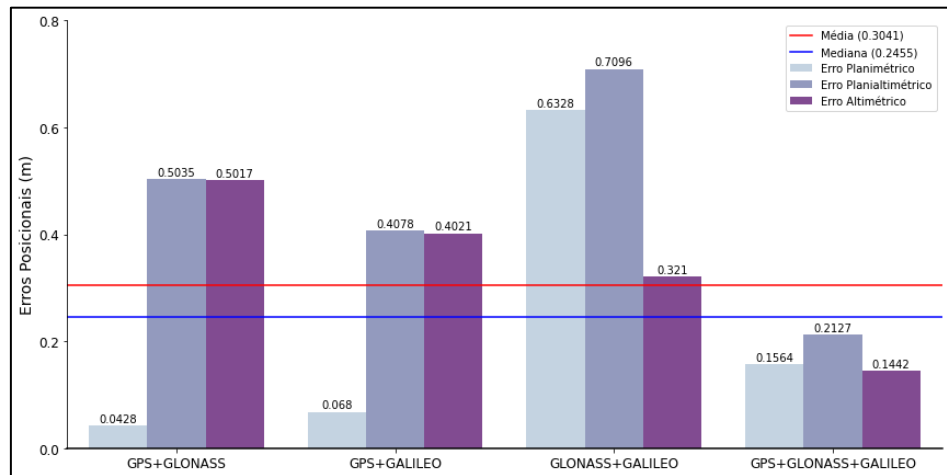
Com a aplicação das fórmulas 1 e 2, referentes ao cálculo dos vetores 2D e 3D, foi possível comparar de maneira numérica e gráfica o impacto das diferentes combinações de constelações GNSS no cálculo das coordenadas finais. A sequência de figuras (Figura 4 a Figura 10), representam os resultados obtidos a partir dos cálculos dos vetores. Para melhor representação foram plotados gráficos dos vetores 2D e 3D, também foram representados os erros de altimetria (DAh). Todos os gráficos estão representados em metros.

Figura 4 - Gráfico de erros para o dia 05 de julho UFPR/SPTU



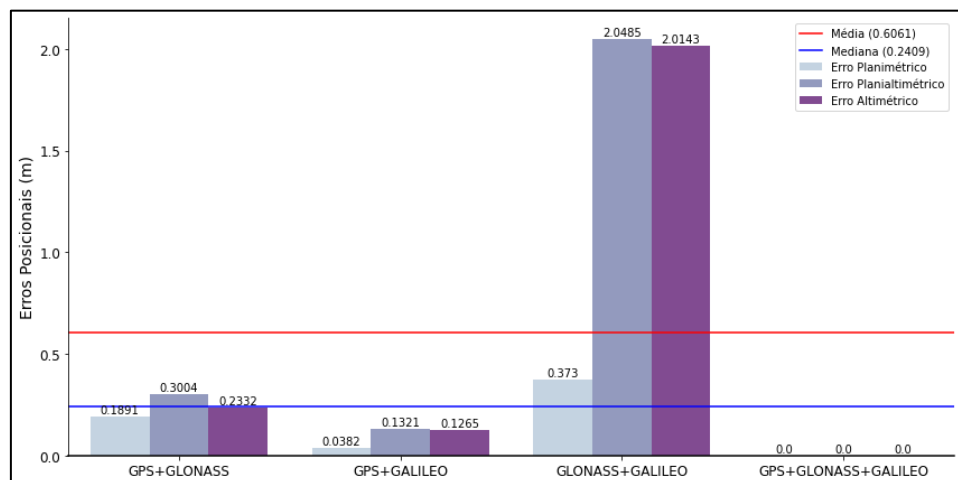
Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 5 - Gráfico de erros para o dia 06 de julho UFPR/SPTU



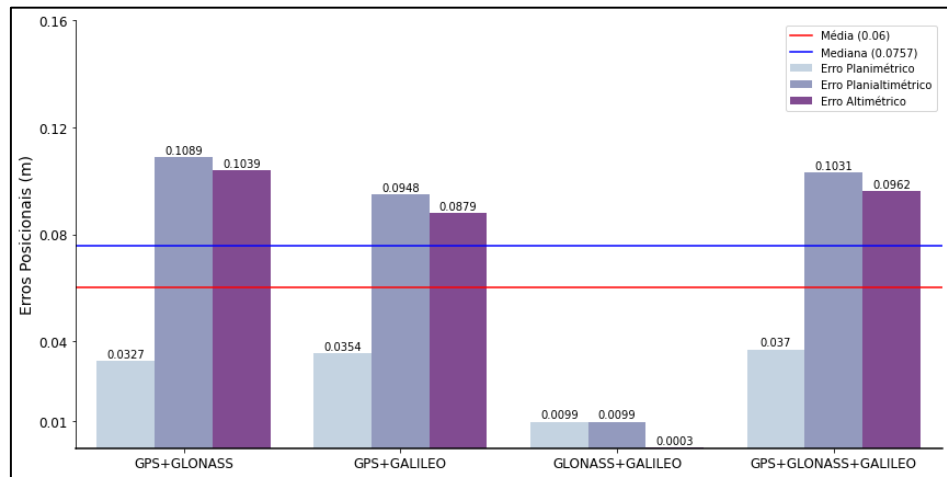
Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 6 - Gráfico de erros para o dia 07 de julho UFPR/SPTU



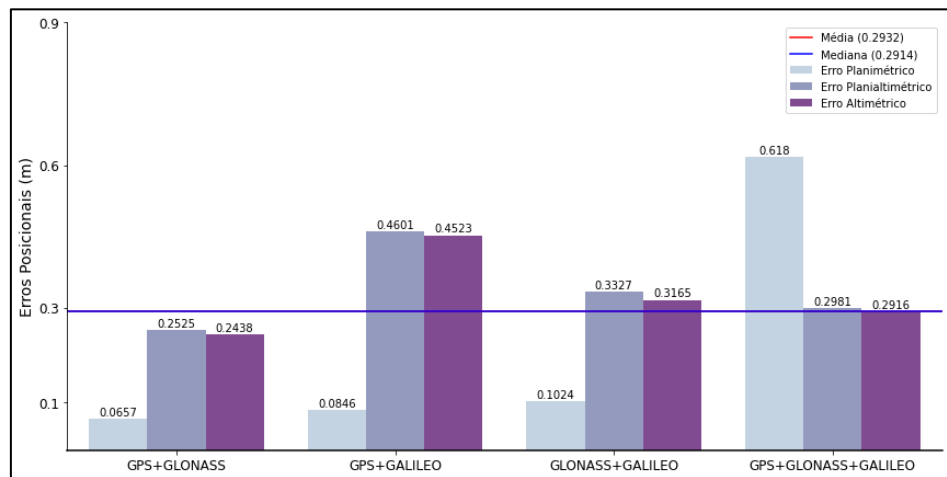
Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 7 - Gráfico de erros para o dia 08 de julho UFPR/SPTU



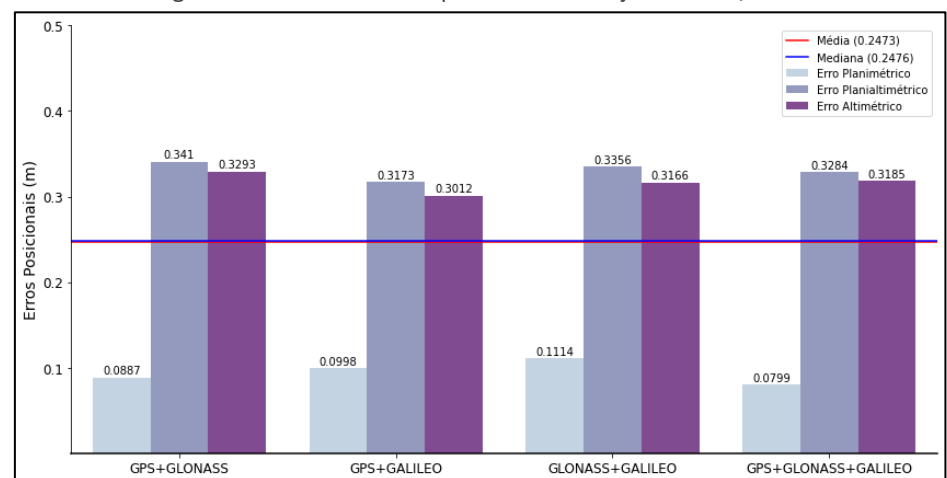
Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 8 - Gráfico de erros para o dia 09 de julho UFPR/SPTU



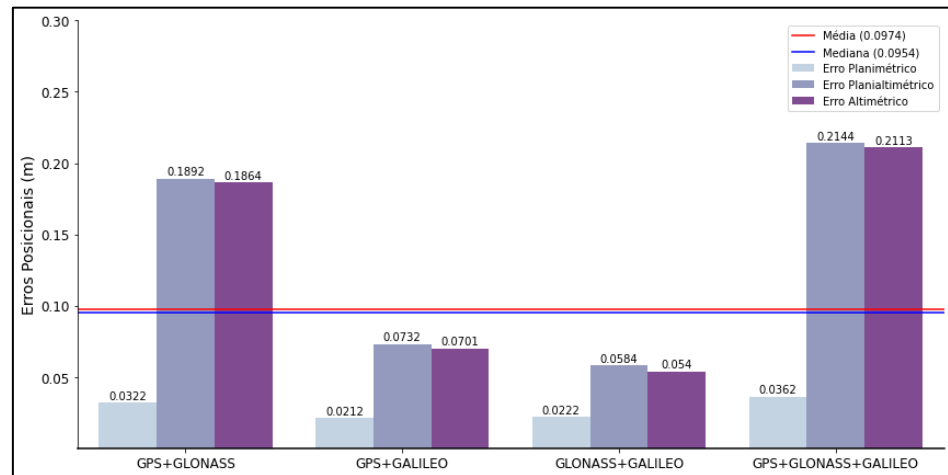
Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 9 - Gráfico de erros para o dia 10 de julho UFPR/SPTU



Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 10 - Gráfico de erros para o dia 11 de julho UFPR/SPTU

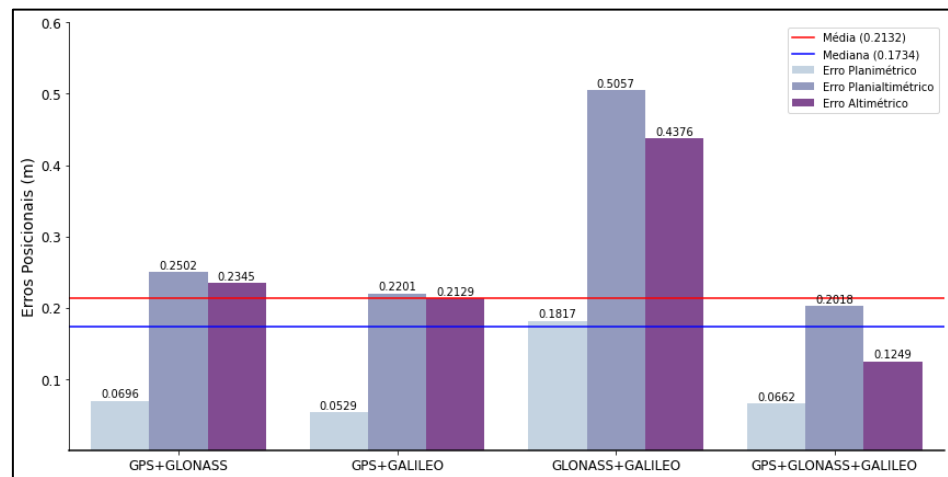


Fonte: Autoria própria (2020).

Com todos os vetores de erros calculados, o próximo passo para a análise de possíveis ganhos foi o cálculo da média simples dos erros 2D e 3D. Com isso, foram obtidos os resultados apresentados na Figura 11.

Com a análise dos valores numéricos é possível perceber o impacto que o Galileo teve no processamento, principalmente se comparado com a combinação de GPS e GLONASS.

Figura 11 - Gráfico de média dos erros 2D e 3D – UFPR/SPTU



Fonte: Autoria própria (2020).

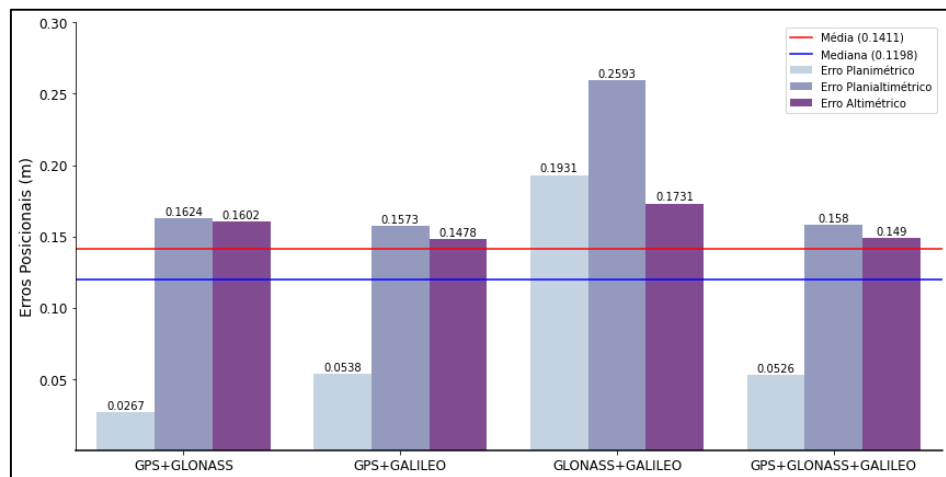
Com os dados coletados e analisados, é possível observar que: ao comparar o desempenho da combinação GPS + GLONASS com GPS + GLONASS + Galileu há um aumento de qualidade de aproximadamente 19,3% em 2D e 22,4% em 3D. Além disso, se o GLONASS for substituído pelo Galileo, a melhoria é de 24% em 2D e 12% em 3D. Considerando-se a altimetria é possível observar uma melhora de 9,22% na combinação GPS e Galileo e de uma melhora de 21,7% na combinação GPS, GLONASS e Galileo.

RESULTADOS E ANÁLISES DA LINHA DE BASE BRAZ-TOPL

A próxima linha de base testada para esse experimento foi referente à Brasília e Palmas. Estas foram escolhidas para avaliar comportamento da combinação de constelações para linhas de base longas, ou seja, superiores a 500 km e por um curto período. As estações de Brasília e Palmas atendem a esses requisitos e estavam aptas a rastrear o Galileo durante o período analisado.

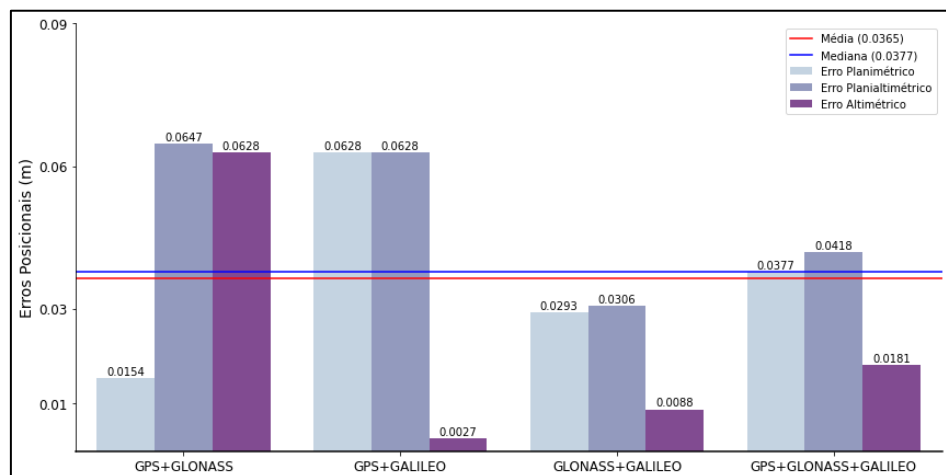
Da mesma forma das linhas de base apresentadas anteriormente, para essa nova análise, foi realizado o cálculo dos vetores 2D e 3D para cada um dos dias e plotado seu gráfico, sendo o 2D representado pela cor azul e o 3D pela cor laranja. Já a altimetria (h) está representada pela cor cinza, conforme apresentado nas figuras 12 a 18.

Figura 12 - Gráfico de Erros para o dia 05 de julho BRAZ/TOPL



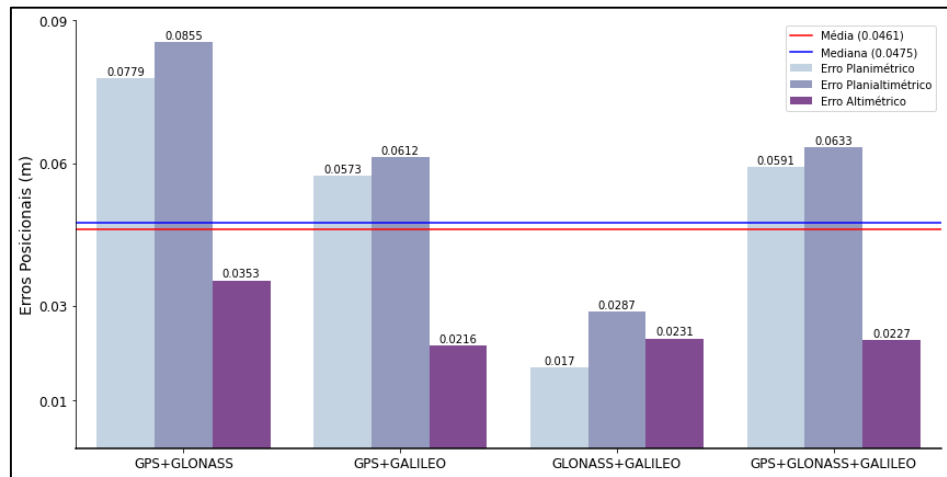
Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 13 - Gráfico de Erros para o dia 06 de julho BRAZ/TOPL



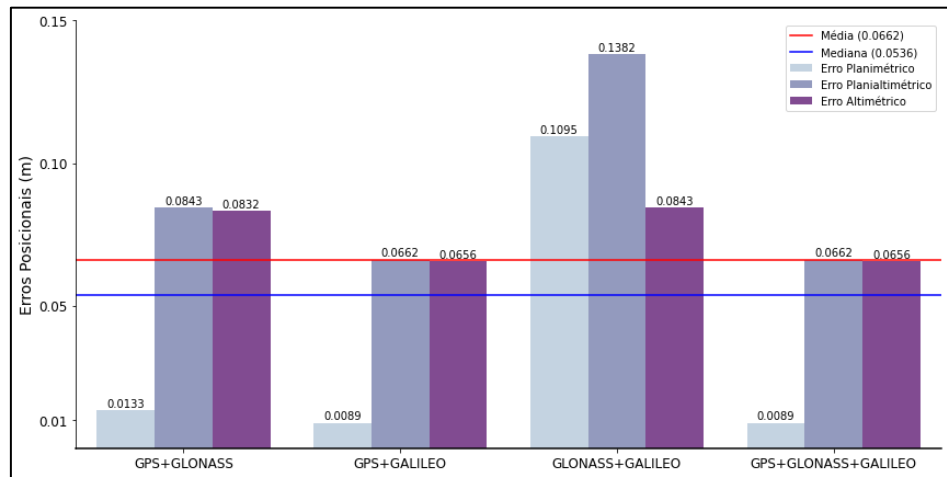
Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 14 - Gráfico de Erros para o dia 07 de julho BRAZ/TOPL



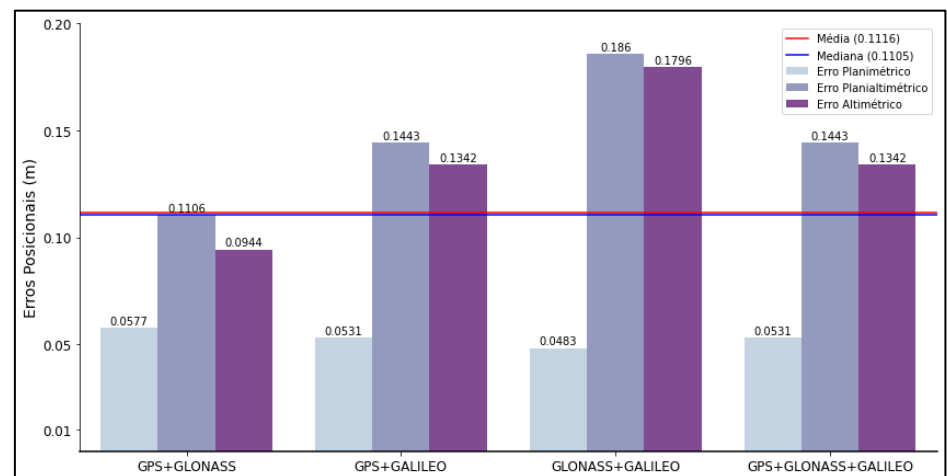
Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 15 - Gráfico de Erros para o dia 08 de julho BRAZ/TOPL



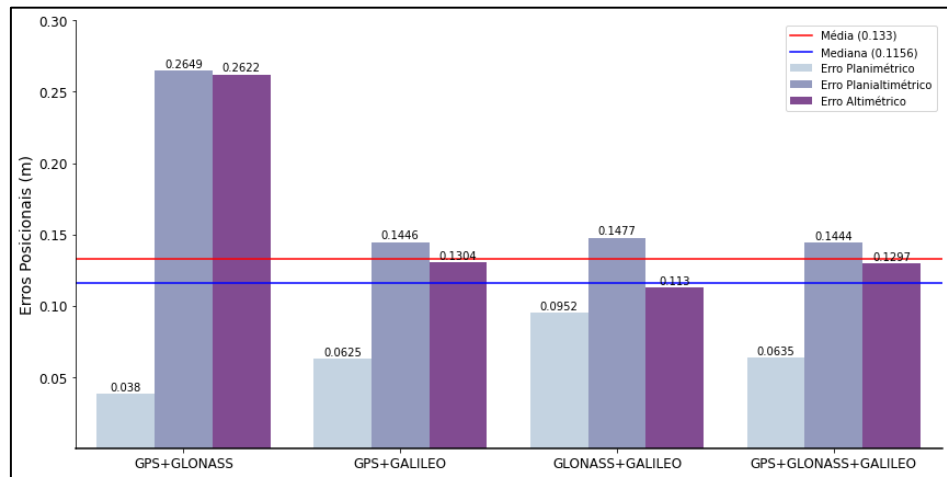
Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 16 - Gráfico de Erros para o dia 09 de julho BRAZ/TOPL



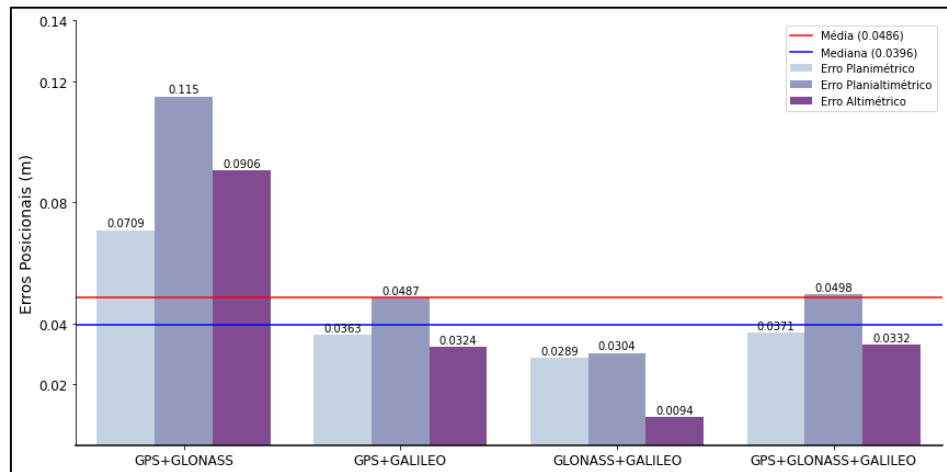
Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 17 - Gráfico de Erros para o dia 10 de julho BRAZ/TOPL



Fonte: Autoria própria (2020).

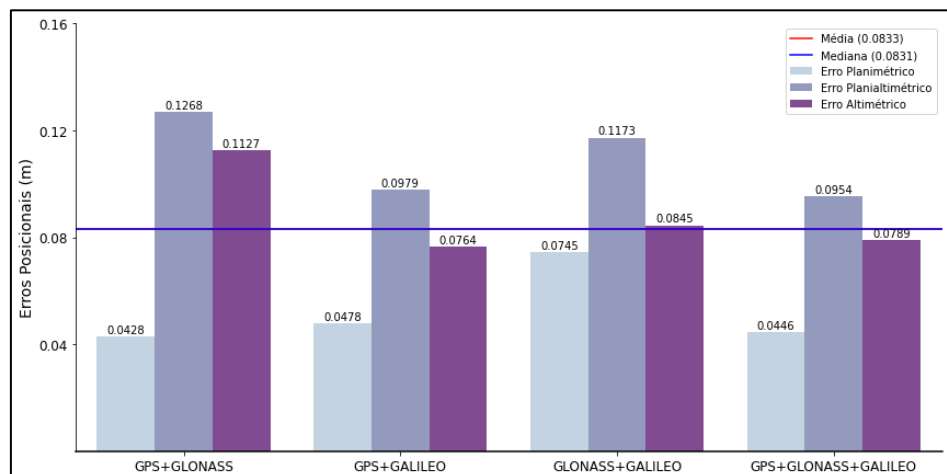
Figura 18 - Gráfico de Erros para o dia 11 de julho BRAZ/TOPL



Fonte: Autoria própria (2020).

Realizando a média dos erros, é possível encontrar os seguintes valores para o período completo analisado, conforme apresentados na Figura 19.

Figura 19 - Gráfico da média Erros 2D e 3D – BRAZ/TOPL



Fonte: Autoria própria (2020).

Com a análise dos resultados para essa linha de base, é perceptível uma melhoria média no 3D, que varia entre 22% a 25% utilizando o sistema GNSS Galileo. Nesse caso, entretanto, é possível observar uma piora nas qualidades, dos valores do 2D, que oscilam entre 4% e 11%. Observando a altimetria é possível notar uma melhora de 32,2% na combinação GPS e Galileo e de uma melhora de 29,9% na combinação GPS, GLONASS e Galileo.

Diferente das outras linhas de base, esse rastreamento considerou uma distância grande em um curto período e, apesar dessa circunstância, foi possível perceber uma melhora significativa na qualidade do posicionamento com o Galileo, principalmente se as coordenadas tridimensionais (E, N e U) forem consideradas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com os experimentos realizados, foi possível observar a performance do sistema de posicionamento Galileo em diferentes situações. Através do processamento da linha de base UFPR-SPTU (~410 km) no período de 1 hora, foi possível perceber um ganho na qualidade do posicionamento de até 24% em 3D. Já na linha de base BRAZ-TOPL (~640 km) o impacto do uso da constelação Galileo foi de até 25% - ao considerar o sistema tridimensional. Com base nos resultados obtidos, é conclusivo que a altimetria é a mais beneficiada com o uso do Galileo. Isto se deve, principalmente, à melhor geometria de satélites com uma constelação adicional.

Somente com esse experimento não é possível concluir o comportamento do posicionamento relativo em condições similares. Como recomendações futuras, que é necessário estudar um número maior de combinações de linhas de base, a fim de verificar se os resultados obtidos nessa pesquisa são representativos ou se foram apenas pontuais.

Contudo, é válido afirmar que o sistema Galileo, apresenta resultados positivos. Sua melhora aparente em linhas de base longas é relevante e os ganhos devem ser melhores à medida que os algoritmos de processamento GNSS se adaptam à integração das observáveis provenientes do sistema Galileo. Estes algoritmos referem-se, por exemplo, aos modelos para correção das tendências inter-sistemas, fundamentais para a integração do posicionamento com diferentes constelações GNSS (Liu et al 2019; Pan et al 2021).

Como sugestões para o futuro, espera-se a realização e aplicação de um teste estatístico a fim de verificar se as diferenças encontradas são significativas ou não e testar os resultados de diferentes combinações de constelações para períodos de intensa atividade ionosférica.

Improvements and perspectives obtained by using Galileo constellation in GNSS relative positioning with long baselines

ABSTRACT

The last 50 years have been marked by the huge technological advances due to the economic, civil, and military needs of the world's population. In the 70s, the appearance of the North American system called Navstar-GPS (Navigation System Using Timing And Ranging - Global Positioning System) was responsible for revolutionizing positioning and navigation methods. On the other hand, the government of the extinct Soviet Union developed a system competing with GPS, called GLONASS (Globalnaya Navigazionnaya Sputnikovaya Sistema). As these systems were improved, other countries began to use them in highly relevant applications, such as air, sea and even land navigation, in addition to many other activities in which position knowledge is necessary. Over time, other countries began to invest many financial resources to develop and send their positioning satellites into orbit. Since March 2018, the constellation of the European Union, called "The Galileo System", has become operative. Galileo is the first system developed primarily for civilian purposes. Despite being new compared to the American and Russian systems, the Galileo constellation is expected to provide a significant improvement in its positioning accuracy, providing greater security and quality in the results obtained. The present article aims to evaluate the gains and losses obtained considering the components of the coordinates in the local geodetic system, N (north), E (east and perpendicular to N) and U (normal to the reference ellipsoid), in relative positioning with long baselines in the Brazilian region, with the incorporation of the Galileo system in GNSS positioning. As a result, were obtained planialtimetric gains of up to 25%.

KEYWORDS: GNSS. Galileo. Relative positioning.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia – Tecnologia GNSS no Suporte à Navegação Aérea (INCT GNSS-NavAer), financiado pelo CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – processo 465648/2014-2), FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – processo 2017/50115-0) e CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – processo nº 88887.137186/2017-00).

REFERÊNCIAS

HARFORD, T. O que aconteceria no mundo se o GPS parasse de funcionar - BBC News Brasil. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/geral-50388799>. Acesso em: 22 mar. 2022.

HECKER, P.; BESTMANN, U.; SCHWITHAL, A.; STANISAK, M. Study Panel for the Future of Science and Technology Galileo Satellite Navigation System Space applications on earth, 2018.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; WASLE, E. Global Navigation Satellite Systems GPS, GLONASS, Galileo, and more. **Springer Science & Business Media**, 2007.

JEREZ, G. O.; ALVES, D. B. M.; VIEIRA, J. V. E. Avaliação do posicionamento relativo GPS / GLONASS sob influência ionosférica. **COBRAC**, 2018.

JÚNIOR, P. D. T. S.; GOUVEIA, T. A. F. Uso integrado dos sistemas Galileo e GPS: uma análise da acurácia no posicionamento por ponto com correções atmosféricas. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 68, n. 3, 2016.

LIU, X.; et al. An analysis of inter-system biases in BDS/GPS precise point positioning. **GPS Solutions**, v. 23, n. 4, 2019. Springer Berlin Heidelberg. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10291-019-0906-3>>.

LU, P.; et al. Inter-GPS: Interpretable geometry problem solving with formal language and symbolic reasoning. ACL-IJCNLP 2021 - 59th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics and the 11th International Joint Conference on Natural Language Processing, Proceedings of the Conference, v. 1, p. 6774–6786, 2021.

MANFRÉ, L. A.; et al. An Analysis of geospatial technologies for risk and natural disaster management. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 1, n. 2, p. 166–185, 2012.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento GNSS: Descrição, Fundamentos e Aplicações**, 2 ed. ed. São Paulo: Ed. Unesp, 2008.

PEREIRA, V. A. S. **Investigação da usabilidade do GBAS no Brasil**, 2018. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho.

POLEZEL, W. **Investigações sobre o impacto da modernização do GNSS no Posicionamento**, 2010. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho.

SEEBER, G. **Satellite geodesy**. 2nd ed. ed. Berlin, New York, 2003.

Recebido: 08 abr. 2022

Aprovado: 09 nov. 2022

DOI: 10.3895/rbgeo.v10n4.15369

Como citar: LIMA, T. F.; OLIVEIRA JÚNIOR, P. S.; MONICO, J. F. G.; KMIIECIK, M. C. Melhorias e perspectivas obtidas com o uso do Galileo no posicionamento GNSS em linhas de base longas. **R. bras. Geom.**, Curitiba, v. 10, n. 4, p. 279-294, out./dez. 2022. Disponível em:

<<https://periodicos.utfpr.edu.br/rbgeo>>. Acesso em: XXX.

Correspondência:

Thomas Felipe de Lima

Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Departamento de Geomática. Centro Politécnico Jardim das Américas, s/n, CEP 81531980, Curitiba, Paraná, Brasil

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

