

XIII Colóquio Brasileiro
de Ciências
Geodésicas • 2024

Universidade Federal do Paraná

25 Anos

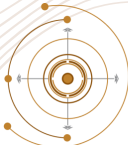
*Conectando mentes e
provendo conhecimento*

PROPOSTA DE FILTRAGEM DE SATÉLITES PELO ÍNDICE S4 PARA MITIGAÇÃO DA CINTILAÇÃO IONOSFÉRICA NO POSICIONAMENTO GNSS

DANIEL CLIMACO PATÊZ¹
JOAO FRANCISCO MONICO¹
HELOÍSA ALVES SILVA MARQUES^{1 2}
ITALO TSUCHIYA¹
BRIAN LEITE MACHADO¹

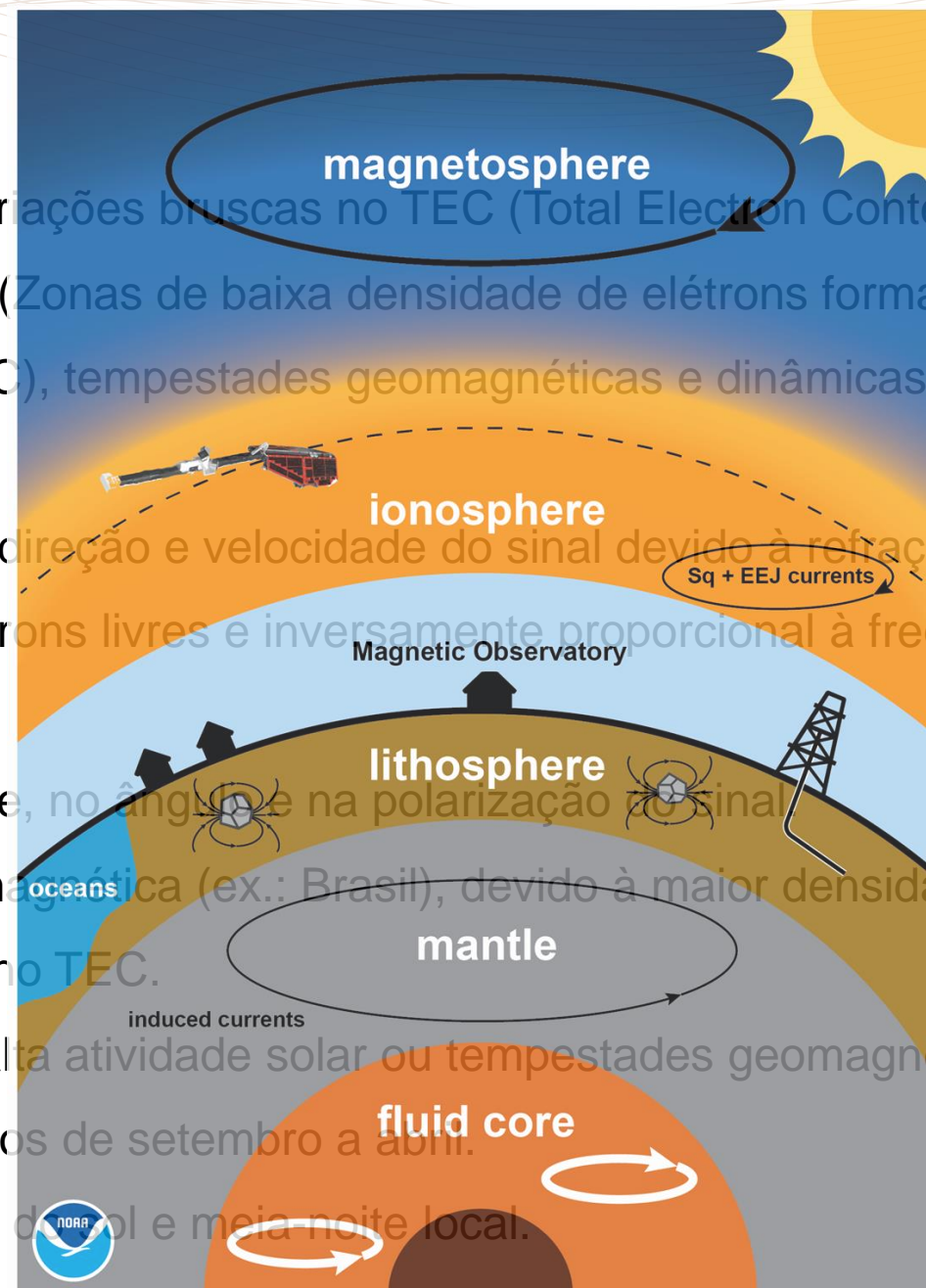
¹ Universidade Estadual Paulista (UNESP) / Campus Presidente Prudente

² Instituto Militar de Engenharia (IME)



Cintilação Ionosférica

- **Irregularidades na ionosfera:** Causadas por variações bruscas no TEC (Total Electron Content), advindas das ocorrências das bolhas de plasma (Zonas de baixa densidade de elétrons formadas na região F da ionosfera, gerando flutuações no TEC), tempestades geomagnéticas e dinâmicas da ionosfera.
- **Interação com ondas eletromagnéticas:** Afeta a direção e velocidade do sinal devido à refração e difração, sendo proporcional à densidade de elétrons livres e inversamente proporcional à frequência do sinal.
- **Efeitos no sinal:** Variações de amplitude, de fase, no ângulo de na polarização do sinal.
- **Regiões de maior impacto:** Baixa latitude geomagnética (ex.: Brasil), devido à maior densidade de elétrons e variações espaço-temporais intensas no TEC.
- **Atividade solar:** Aumenta durante períodos de alta atividade solar ou tempestades geomagnéticas.
- **Ciclo anual:** Mínimos de maio a agosto e máximos de setembro a abril.
- **Horário de ocorrência:** Mais intensa entre o pôr do sol e meia-noite local.



Índice S4

$$S_4^2 = \frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I^2 \rangle}$$

- Os valores do índice S4 podem ser classificados como forte, moderado e fraco, dependendo diretamente da intensidade da cintilação ionosférica.

S4	CLASSES
$S4 > 1$	FORTE
$0,5 \leq S4 \leq 1$	MODERADA
$0 < S4 < 0,5$	FRACA

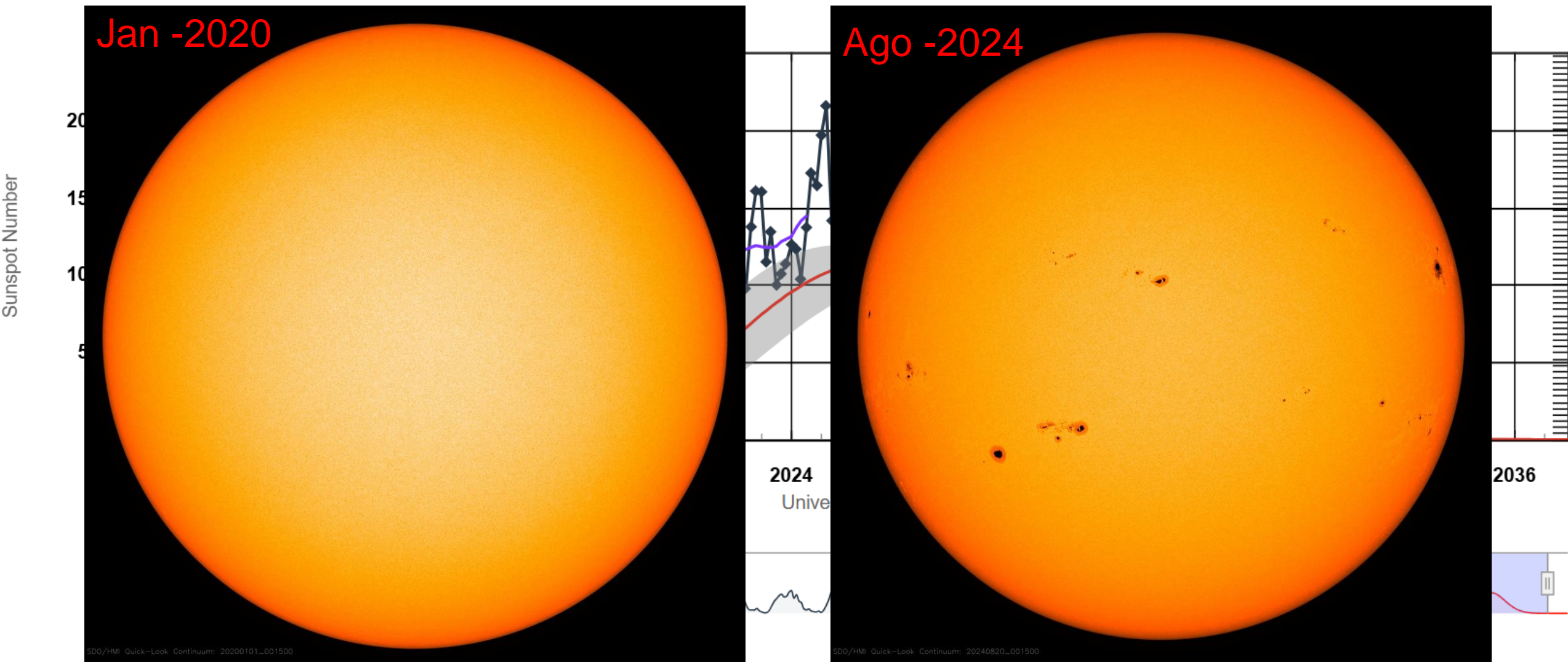
Índice Phi60

$$\text{Phi60} = \sqrt{\langle \varphi^2 \rangle - \langle \varphi \rangle^2}$$

- Os valores do índice Phi60 é dado em radianos, também classificando a cintilação ionosférica como forte, moderado e fraco.

Phi60	CLASSES
$\text{Phi60} > 0,8$	FORTE
$0,4 \leq \text{Phi60} \leq 0,8$	MODERADA
$0 < \text{Phi60} < 0,4$	FRACA

Progressão do ciclo solar



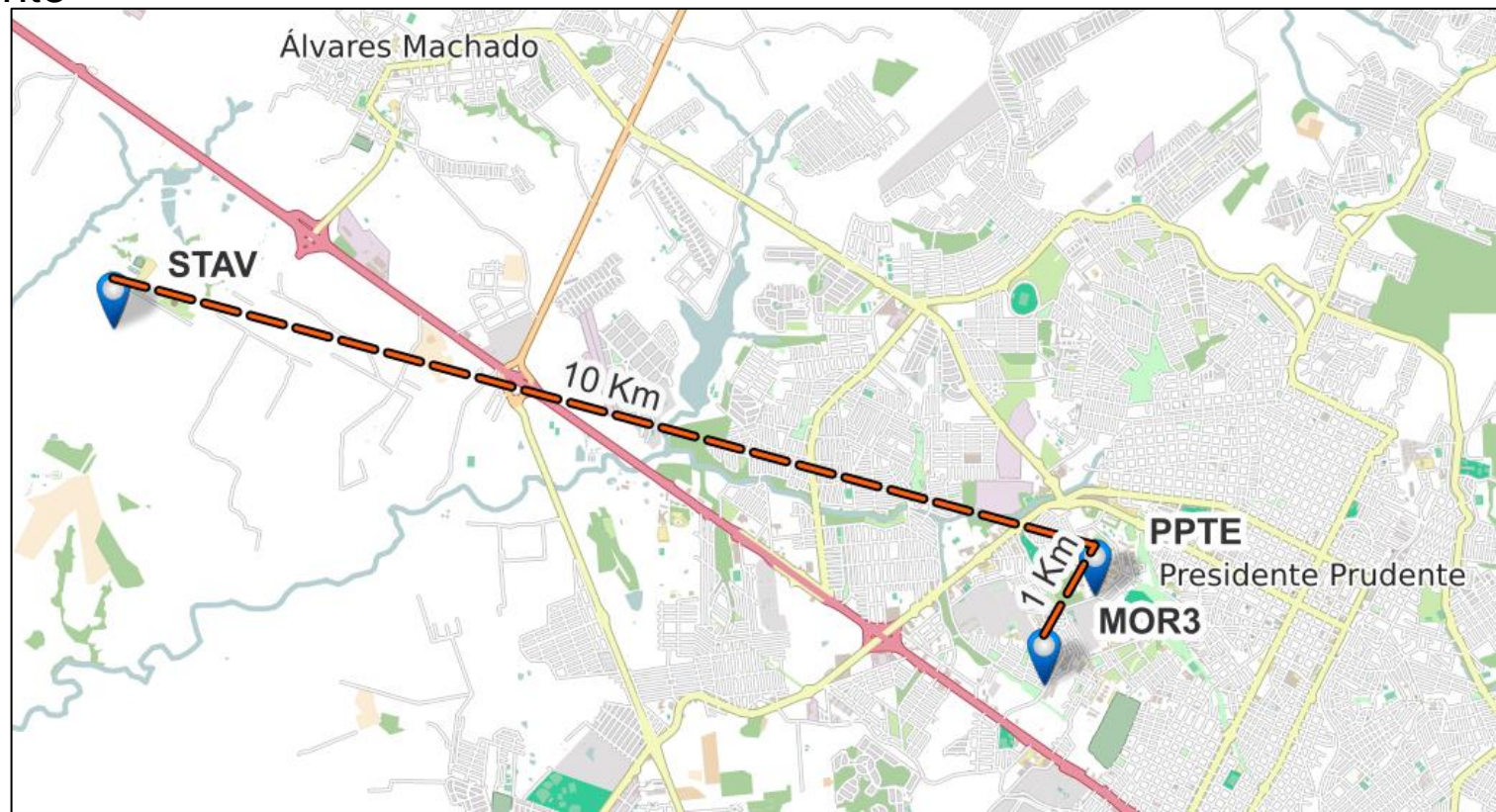
Objetivo

- Analisar os efeitos da cintilação ionosférica no posicionamento relativo no modo pós processado
- Desenvolver metodologia de filtragem de satélites utilizando o índice S4, com intuito de mitigar os efeitos da cintilação ionosférica no posicionamento

Area de estudo

A área de estudo, localizada na região oeste de São Paulo, incluiu as estações STAV e MOR3 (INCT GNSS NavAer) e PPTE (RBMC).

- Estação base: PPTE
- Estação rover: STAV
- Estação para obter índice S4: MOR3



Metodologia

Definições de Limites - Baseado na metodologia de MARINI-PEREIRA, L; MORAES, A. O M.; PULLEN, S. A. (2022, 2024)

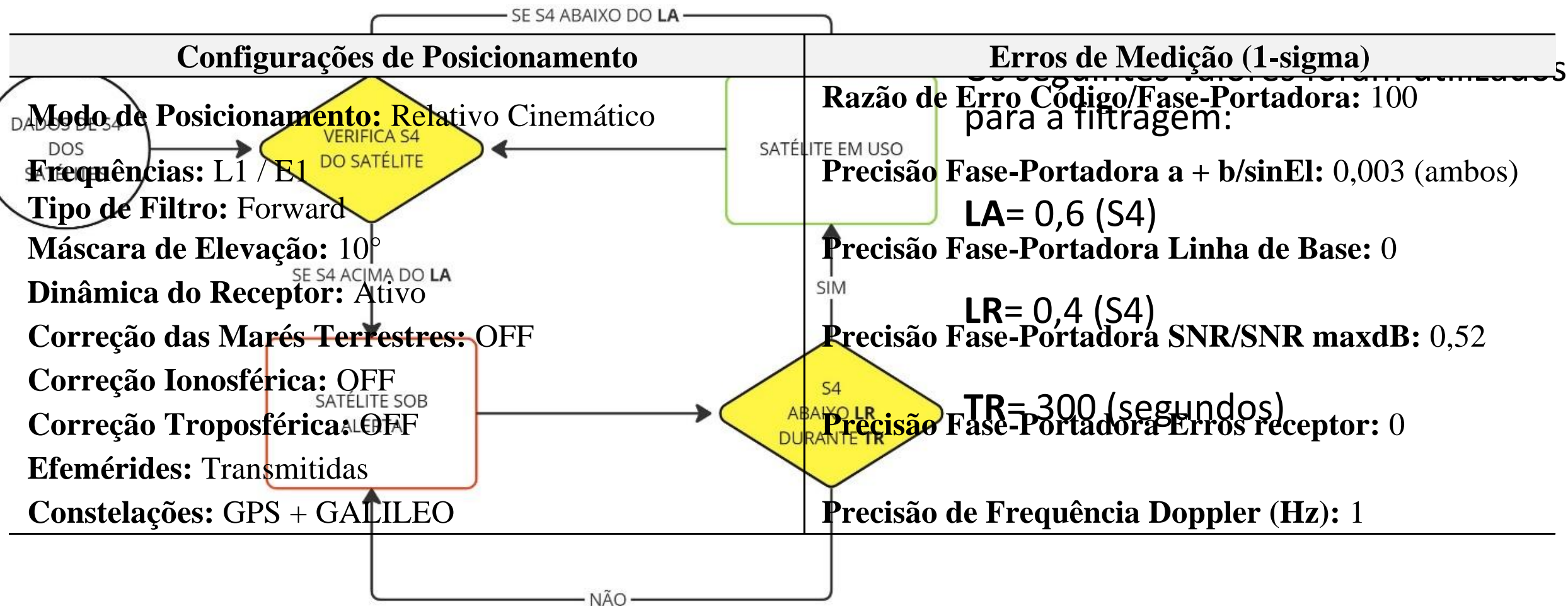
Limite de Alerta (LA): Indica o valor em que a intensidade da cintilação ionosférica para o respectivo satélite se torna crítica para o posicionamento e a navegação.

Limite de Retorno (LR): Indica um nível mais baixo de cintilação e um sinal confiável em relação à cintilação para o posicionamento.

Tempo de Recuperação (TR): Intervalo de tempo durante o qual um satélite deve permanecer abaixo do LR para ser considerado estável o suficiente para ser reintegrado ao processo de posicionamento.

Uma vez obtidos os períodos dos alertas para cada satélite, as observações correspondentes são removidas do arquivo RINEX (base)

Metodologia

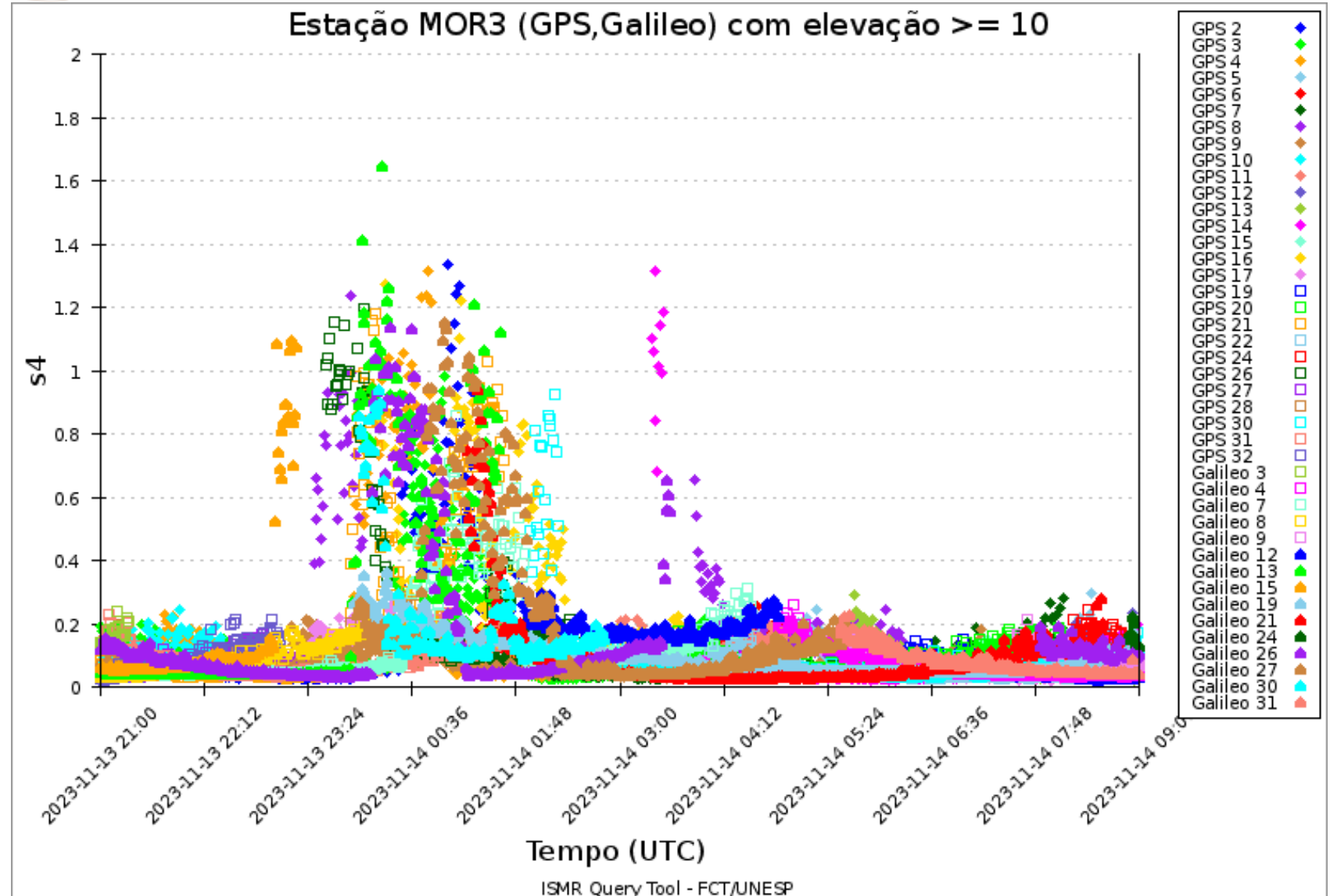


Resultados

Período:

18h de 13/11/2023 às

06h de 14/11/2023



Resultados

Sem Filtragem

Resíduos e S4

Pseudodistância

Média: 0,2340m

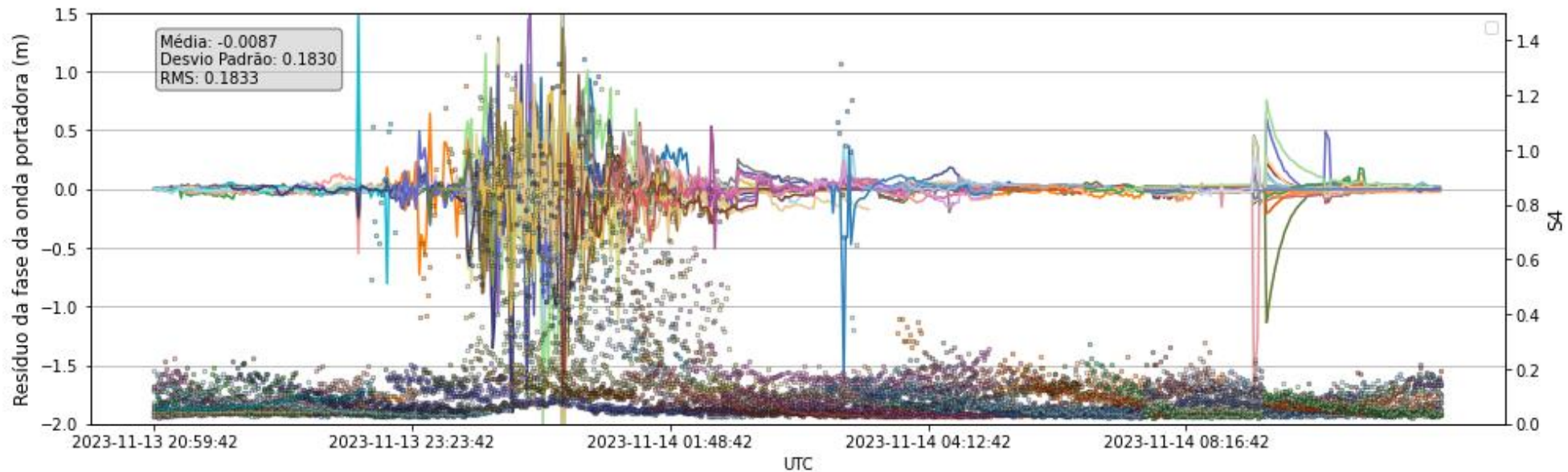
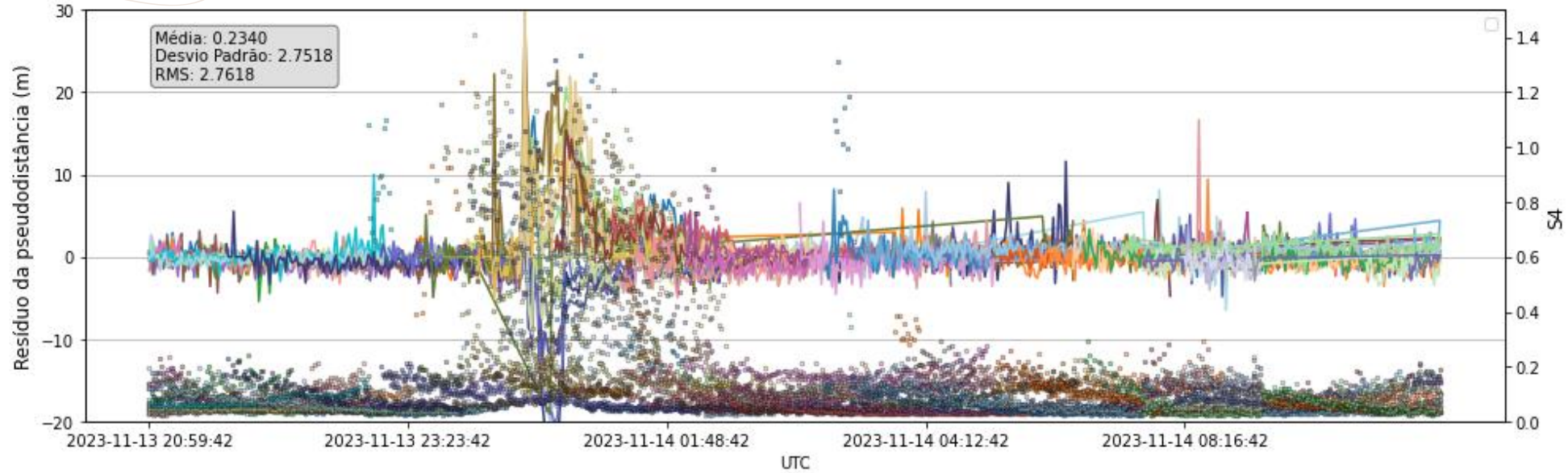
Desvio Padrão: 2,7518m

Portadora

Média: - 0,0087m

Desvio Padrão: 0,1830m

Resíduos e S4 para todos os satélites Frequência L1



Resultados

Com Filtragem

Redução dos resíduos

RMS Pseudodistância

Média: -0,0043 m

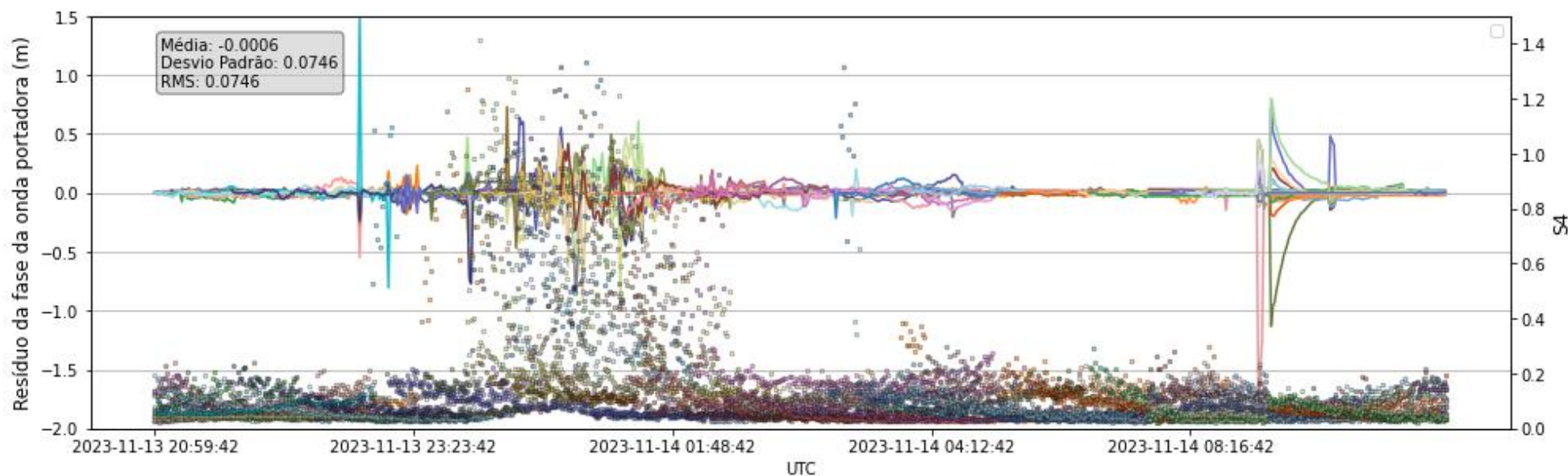
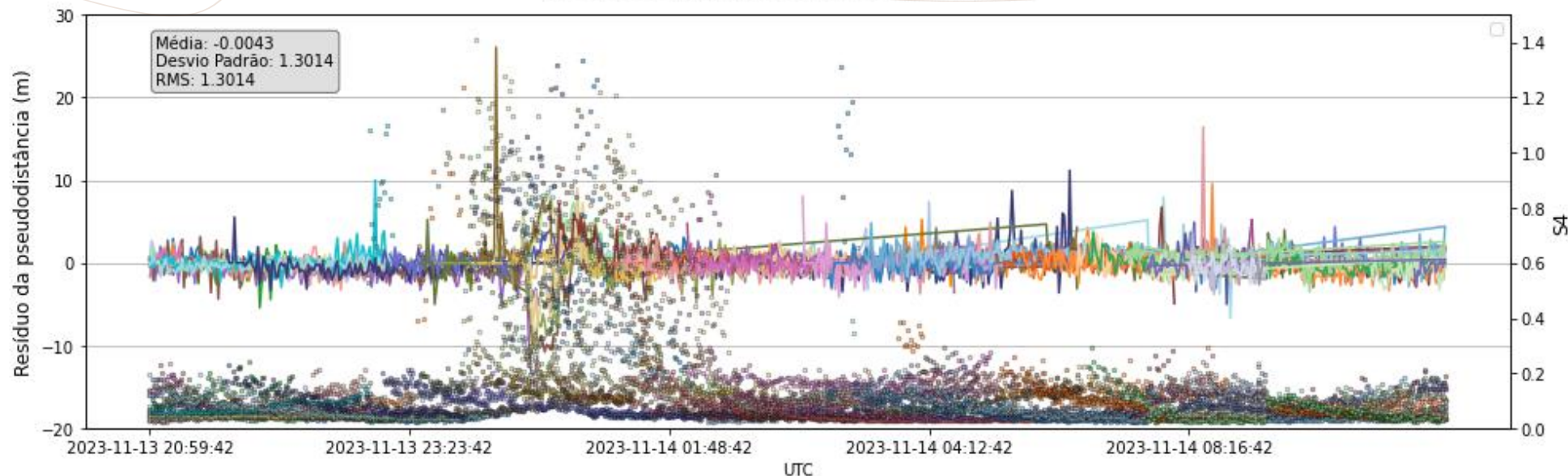
Desvio Padrão: 1,3014 m

RMS Portadora

Média: -0,0006 m

Desvio Padrão: 0,0746 m

Resíduos e S4 para todos os satélites Frequência L1

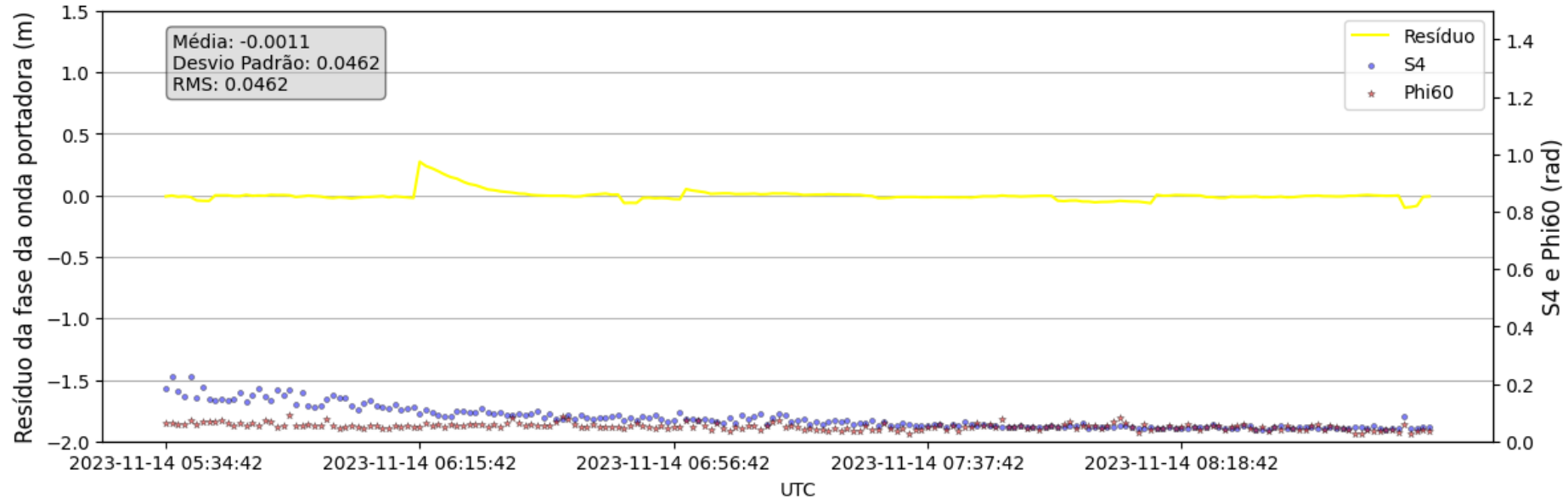
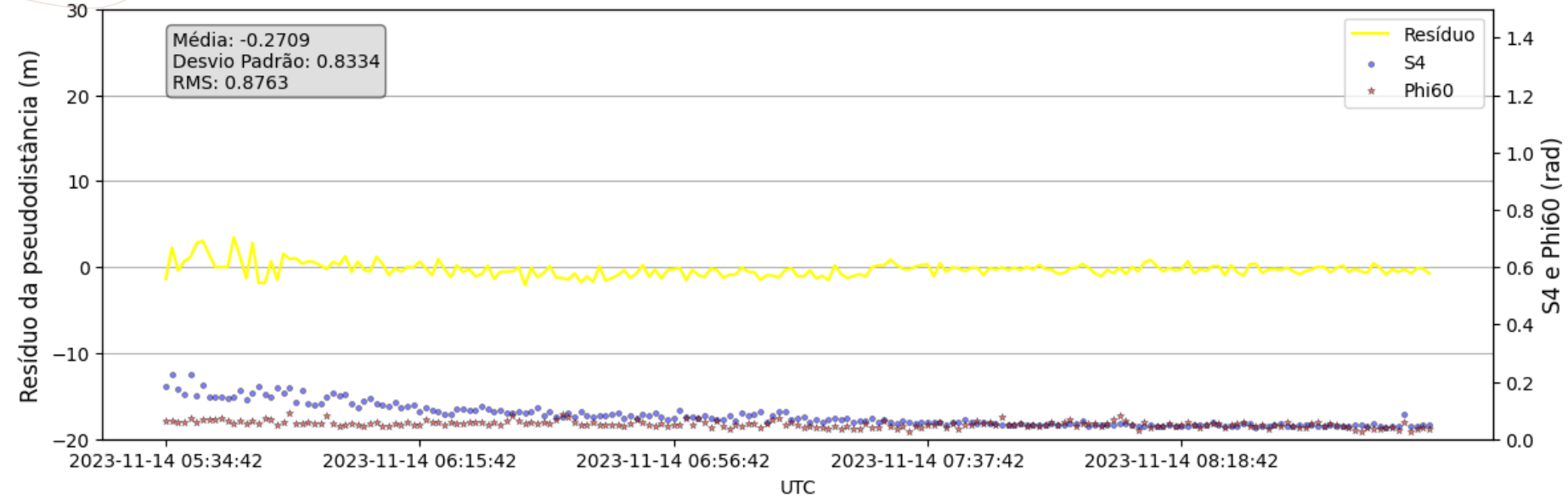


Resultados

Relação dos resíduos com os índices S4 e Phi60

Sem indicação de Cintilação

Resíduos com S4 e Phi60 para o Satellite E31 - Frequência L1

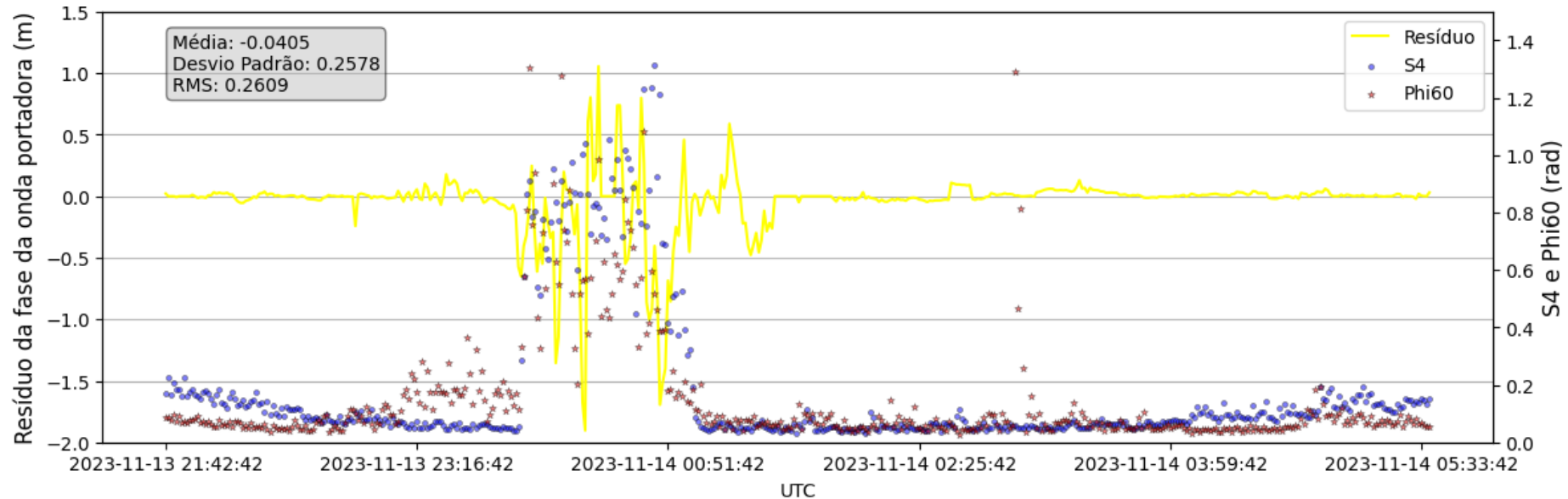
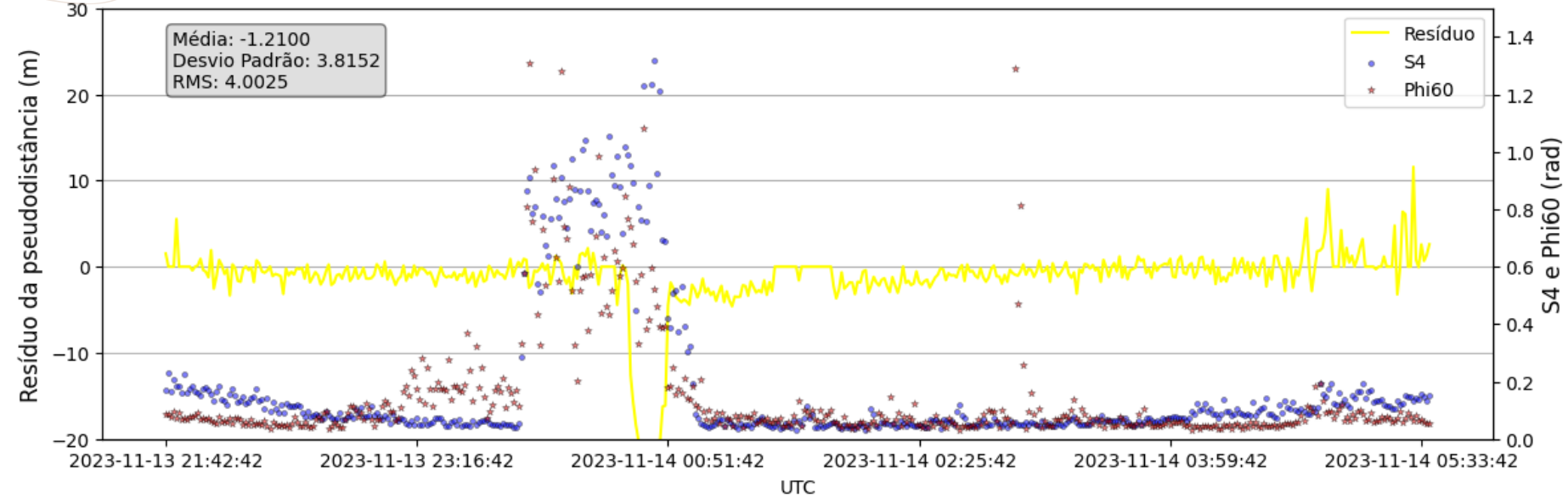


Resultados

Relação dos resíduos com os índices S4 e Phi60

Com indicação de Cintilação

Resíduos com S4 e Phi60 para o Satellite G04 - Frequência L1

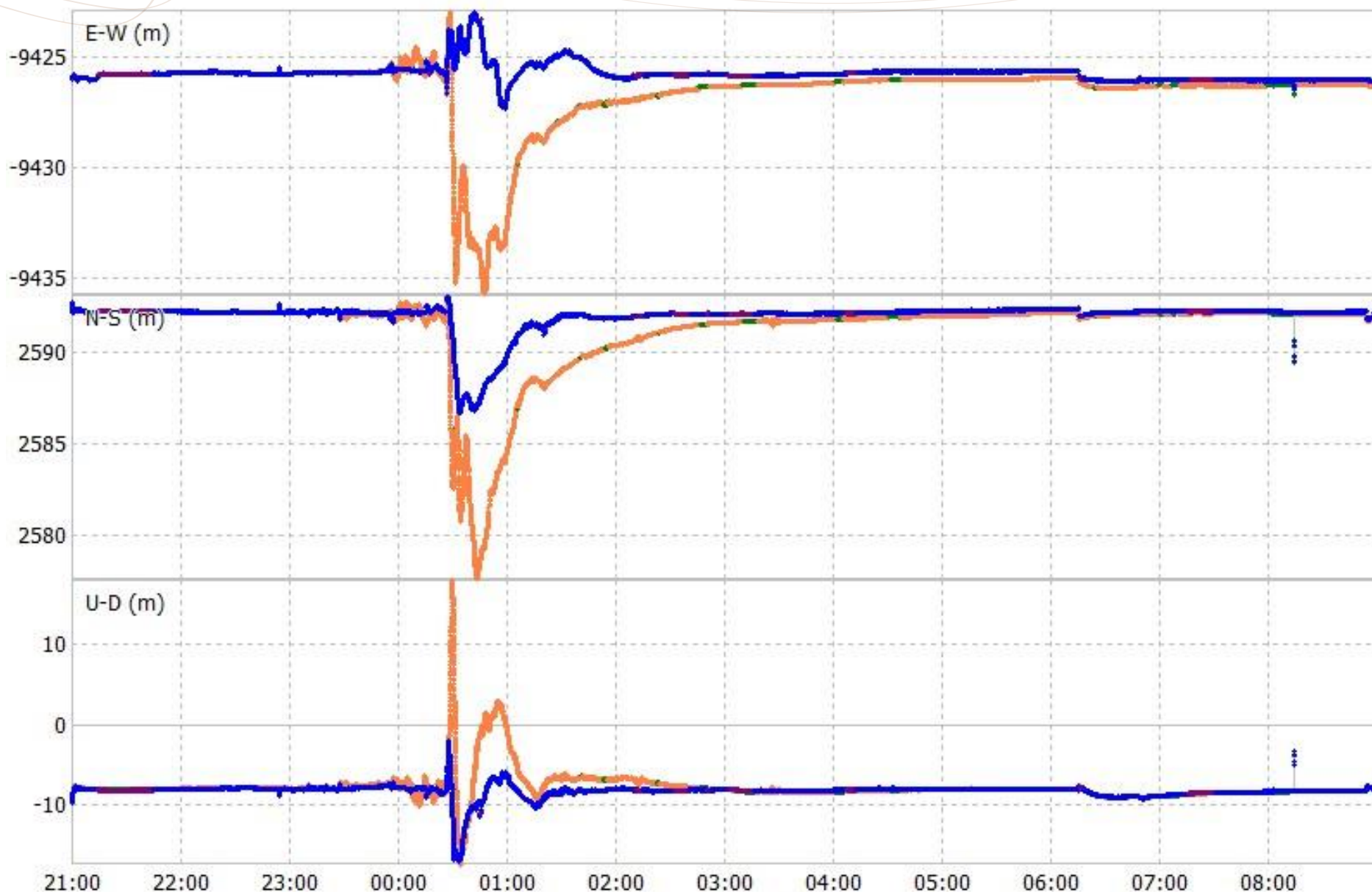


Resultados

Posição ao longo do tempo da solução obtida

Linha azul: representa a solução utilizando o arquivo RINEX da base com as observações dos satélites removidas durante os períodos afetados pela cintilação ionosférica.

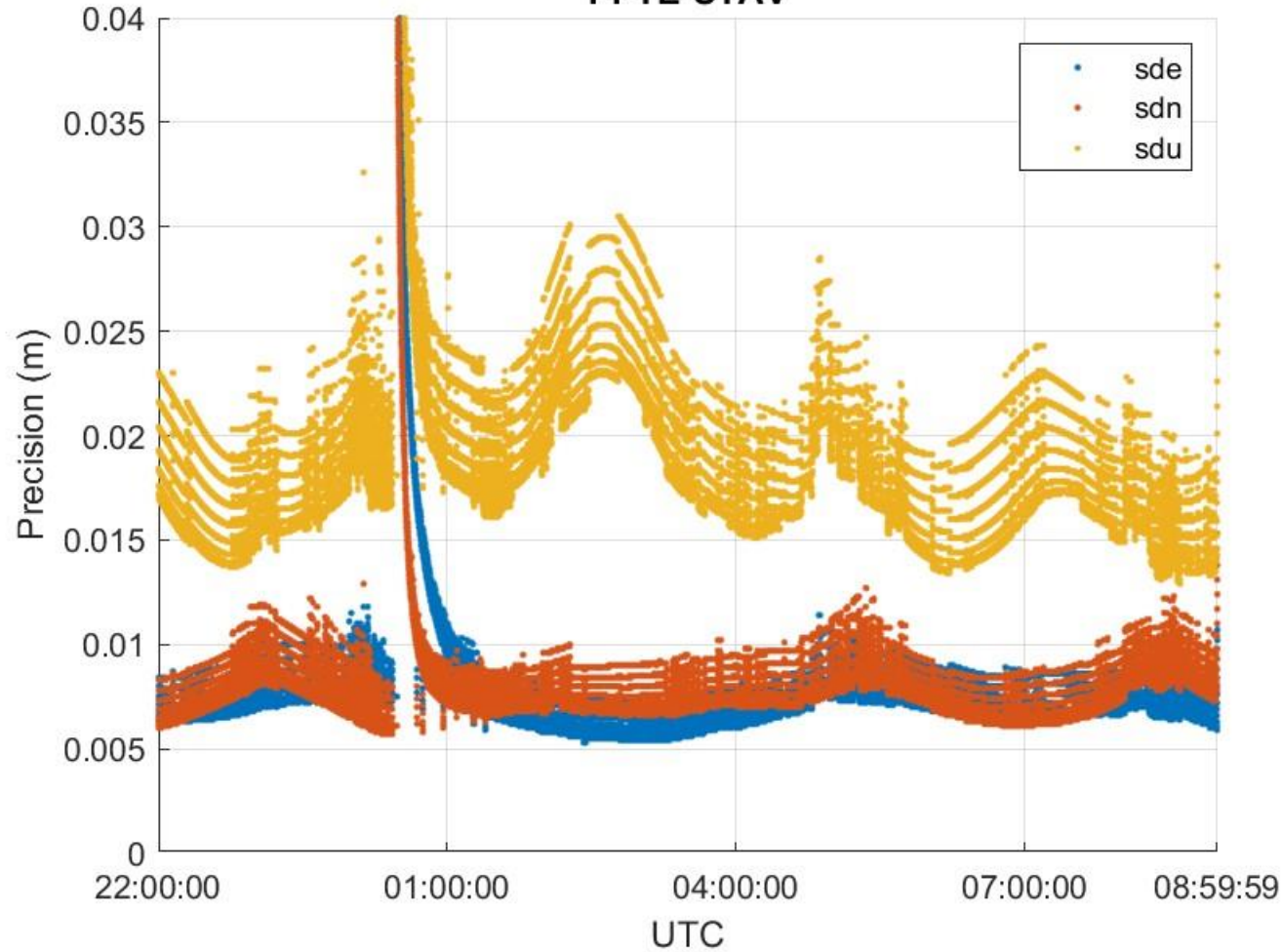
Linha laranja: representa a solução tendo a estação base com todas as observações.



Resultados

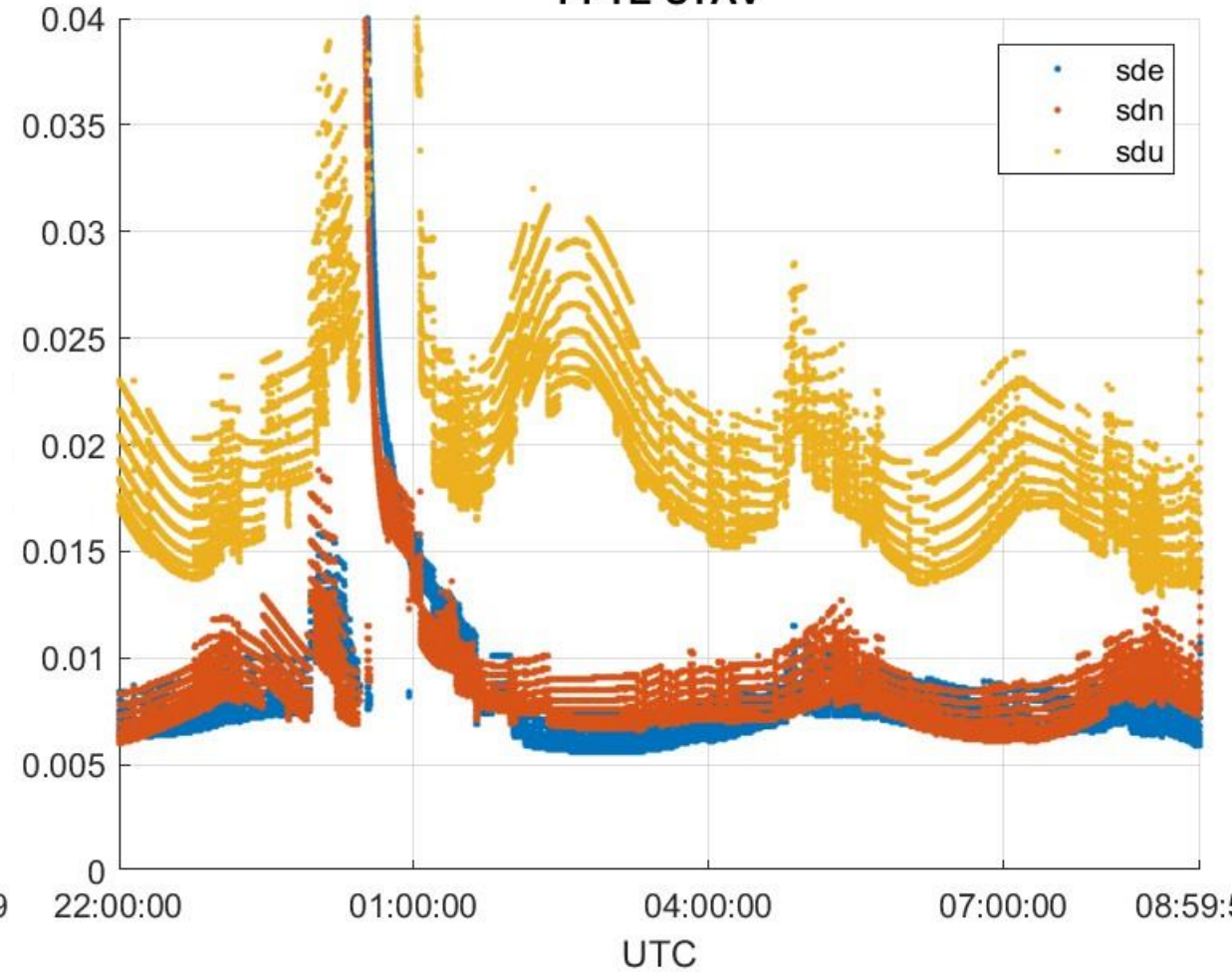
Sem Filtragem

PPTE-STAV



Com Filtragem

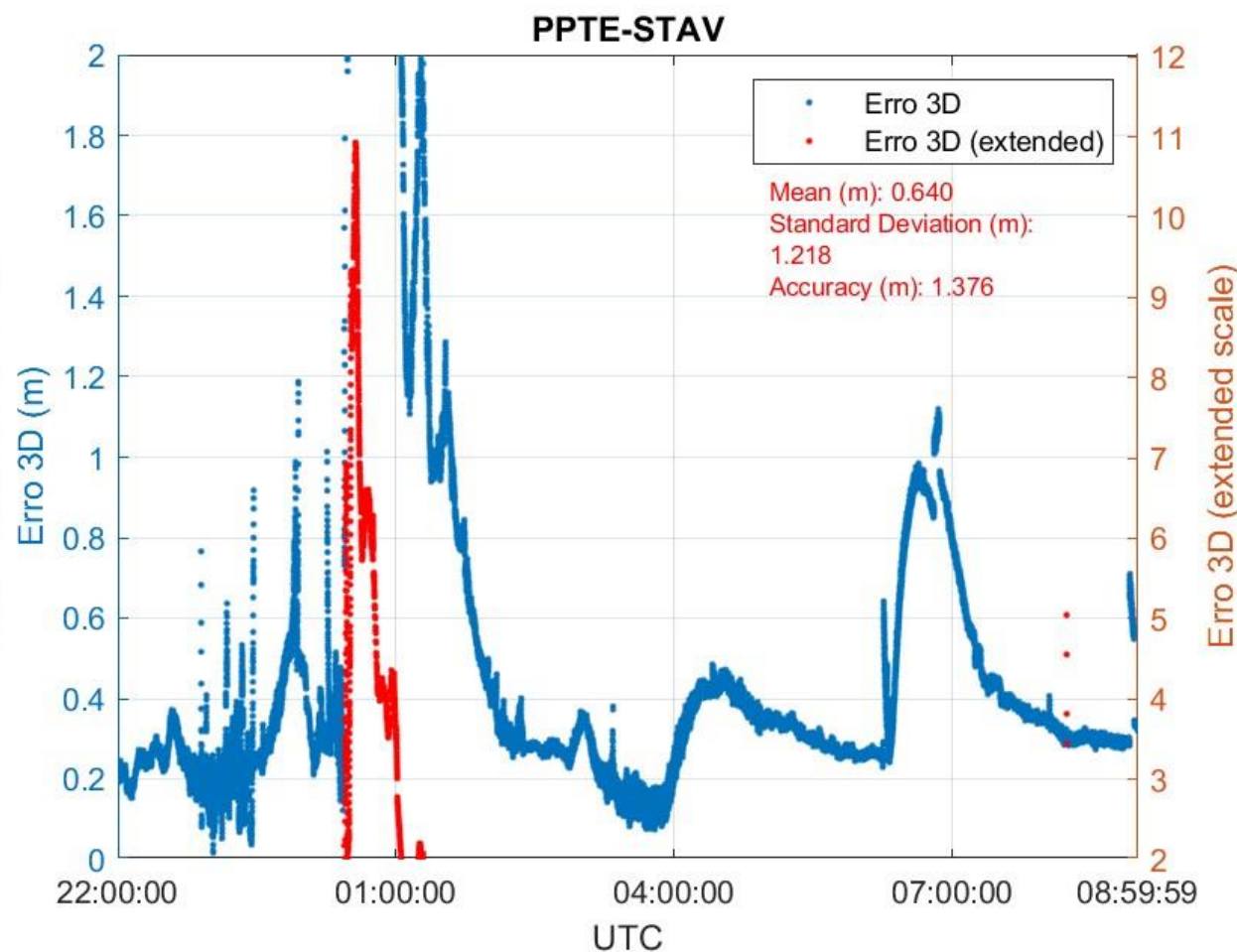
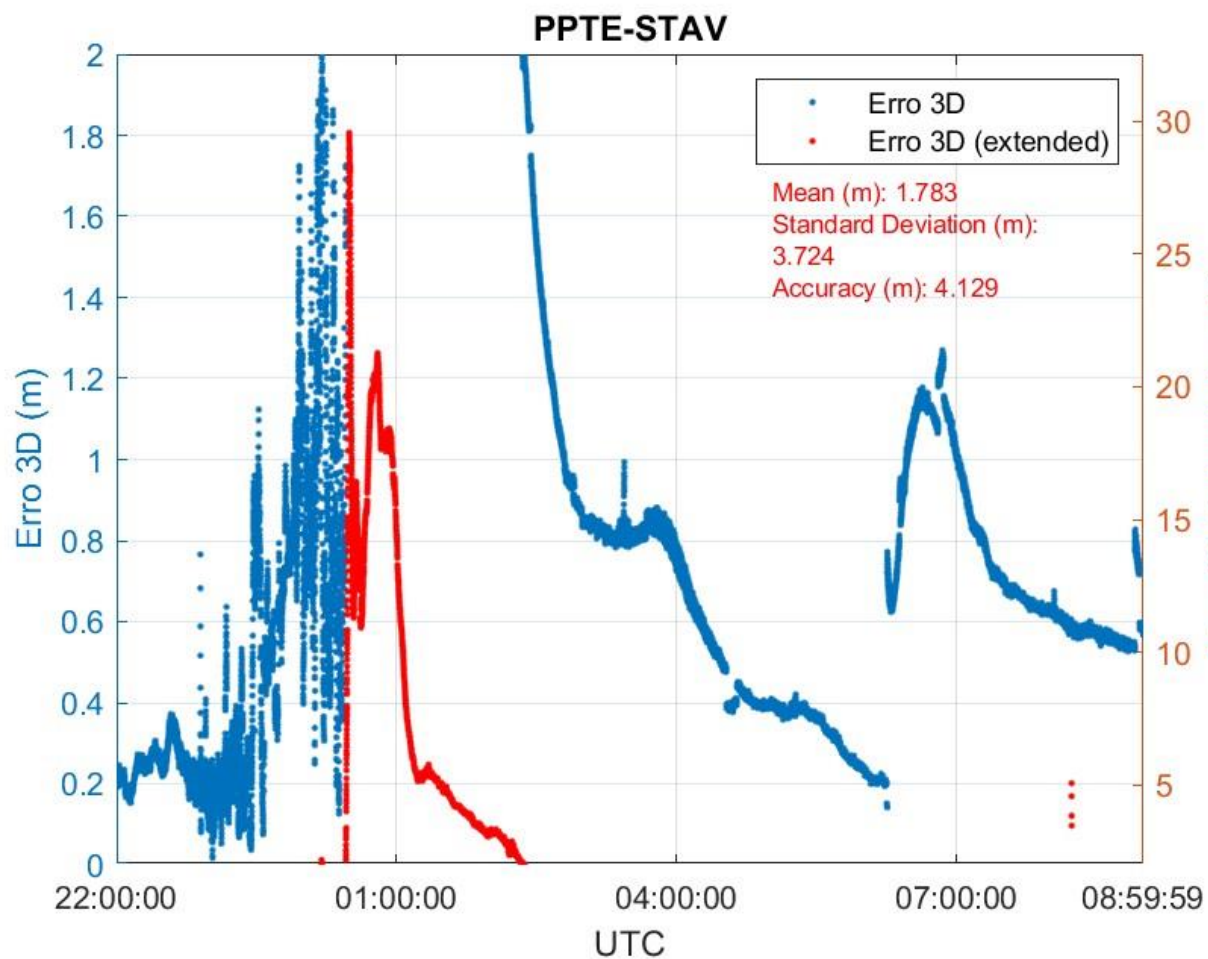
PPTE-STAV



Resultados

Sem Filtragem

Com Filtragem



Considerações Finais

- As precisões foram similares com pequena degradação na solução filtrada

Média das precisões com filtragem:

E= 0,0096m; N= 0,0096m; U= 0,0235m

RMSE das componentes com filtragem:

E= 0,4408m; N= 0,9324m; U= 0,9112m

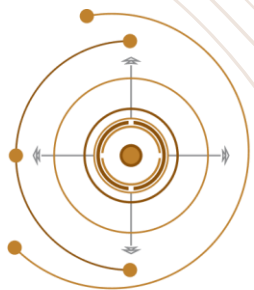
Média das precisões sem filtragem:

E= 0,0090m; N= 0,0089m; U= 0,0214m

RMSE das componentes sem filtragem:

E= 2,1205m; N= 2,6667m; U= 2,3330m

- Os resultados obtidos não foram como esperado:
 - Apesar de melhorias, os erros são muito maiores que os advindos de uma solução relativa normal (poucos centímetros).
- Neste contexto, estão sendo exploradas novas abordagens, como:
 - Modelagem de parâmetros para o modelo estocástico através do uso dos índices de cintilação e resíduo das observações em conjunto com a filtragem de satélites;
 - Expandir para todas as constelações;
 - Implementação direta dessas metodologias no software RTKLib.



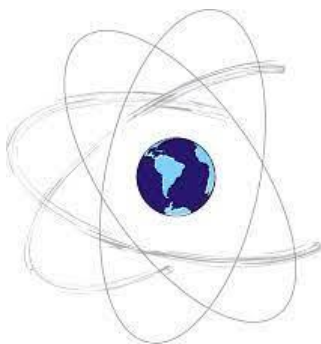
XIII Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas • 2024

Universidade Federal do Paraná

25 Anos

*Conectando mentes e
provendo conhecimento*

AGRADECIMENTOS



REALIZAÇÃO



Curitiba, 26 a 29 de novembro de 2024