

**XIII** Colóquio Brasileiro  
de Ciências  
Geodésicas • 2024

Universidade Federal do Paraná

**25** Anos

*Conectando mentes e  
provendo conhecimento*

# ÍNDICE DE IRREGULARIDADES IONOSFÉRICAS ROTI EM TEMPO REAL A PARTIR DA RBMC-IP: RESULTADOS INICIAIS

*Vinícius Amadeu Stuani Pereira<sup>1</sup>, Ítalo Tsuchiya<sup>2</sup>, João Francisco Galera Monico<sup>2</sup>,  
Héricles Barbosa Lopes<sup>3</sup>, Roberta Dal Bosco Carletto<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), *Campus Santa Helena*

<sup>2</sup> Universidade Estadual Paulista (UNESP), *Campus Presidente Prudente*

<sup>3</sup> ITAIPU Binacional

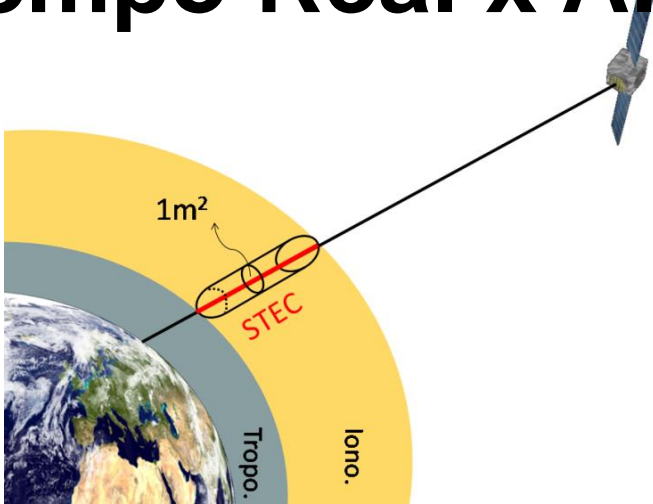
# Tempo Real x Alta Acurácia x Ionosfera

- Várias aplicações do GNSS em tempo real estão cada vez mais demandando alta acurácia das coordenadas geodésicas, visando a otimização e eficiência do trabalho

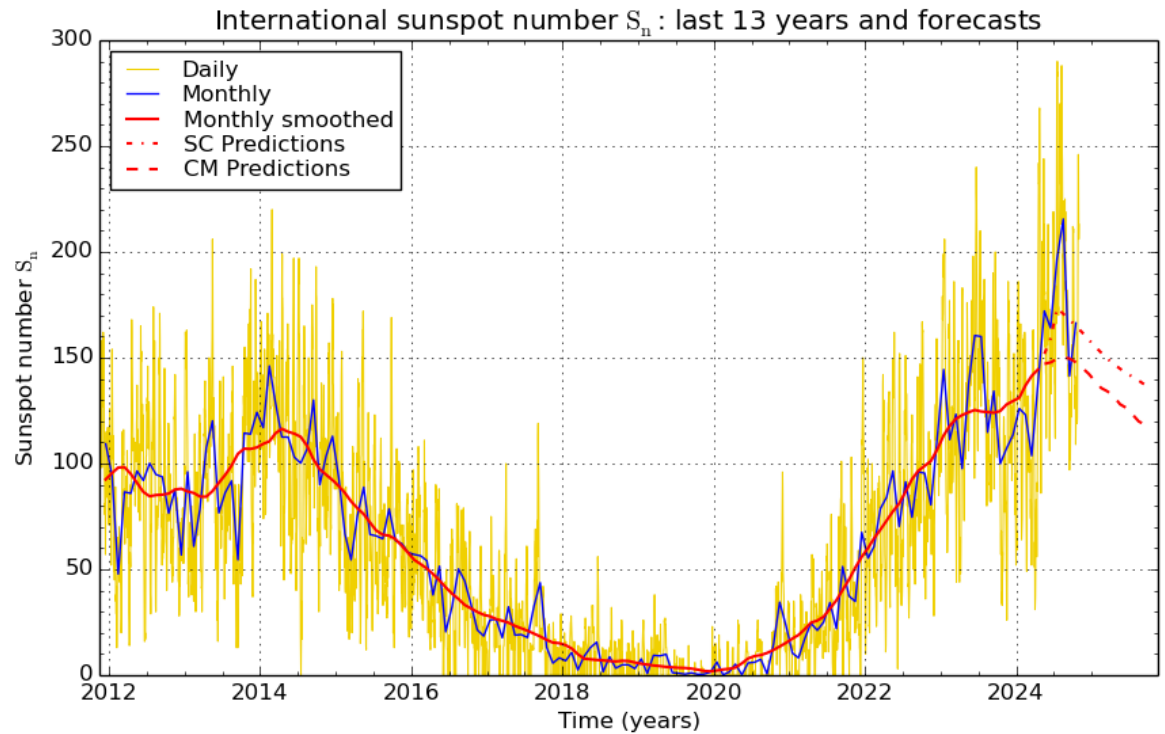
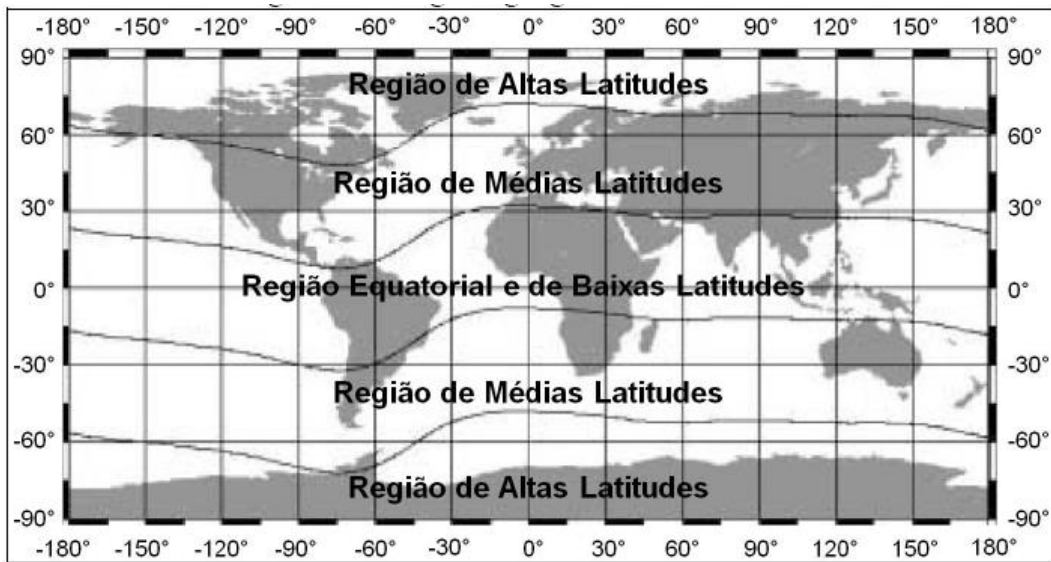




# Tempo Real x Alta Acurácia x Ionosfera

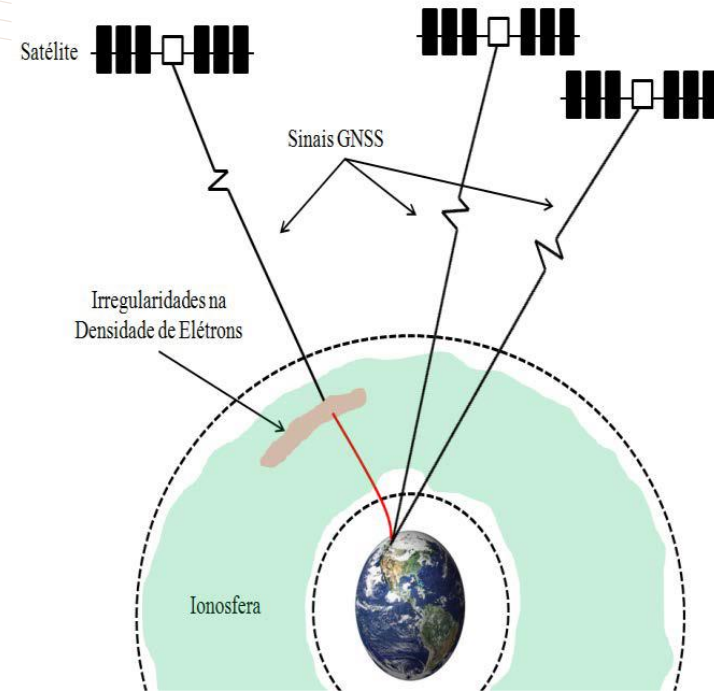


Principal fonte de erro sistemático no GNSS advém da camada ionosférica, compreendida aproximadamente entre 50 e 1000 km de altura – quer seja do atraso para usuários de frequência única, ou de irregularidades ...



# Tempo Real x Alta Acurácia x Ionosfera

- Os sinais ao atravessarem regiões de irregularidades podem sofrer cintilações
  - Degradação da qualidade das medidas
    - ❖ Coordenadas geodésicas de baixa acurácia, perda dos sinais
    - ❖ Importante saber a qualidade das medidas em tempo real – ROTI é um índice importante
  
- Para atender as necessidades em tempo real, o trabalho propõe desenvolver o programa RTIon
  - Estimar o índice ROTI no exato instante que as observações são coletadas por uma das 143 estações da RBMC-IP



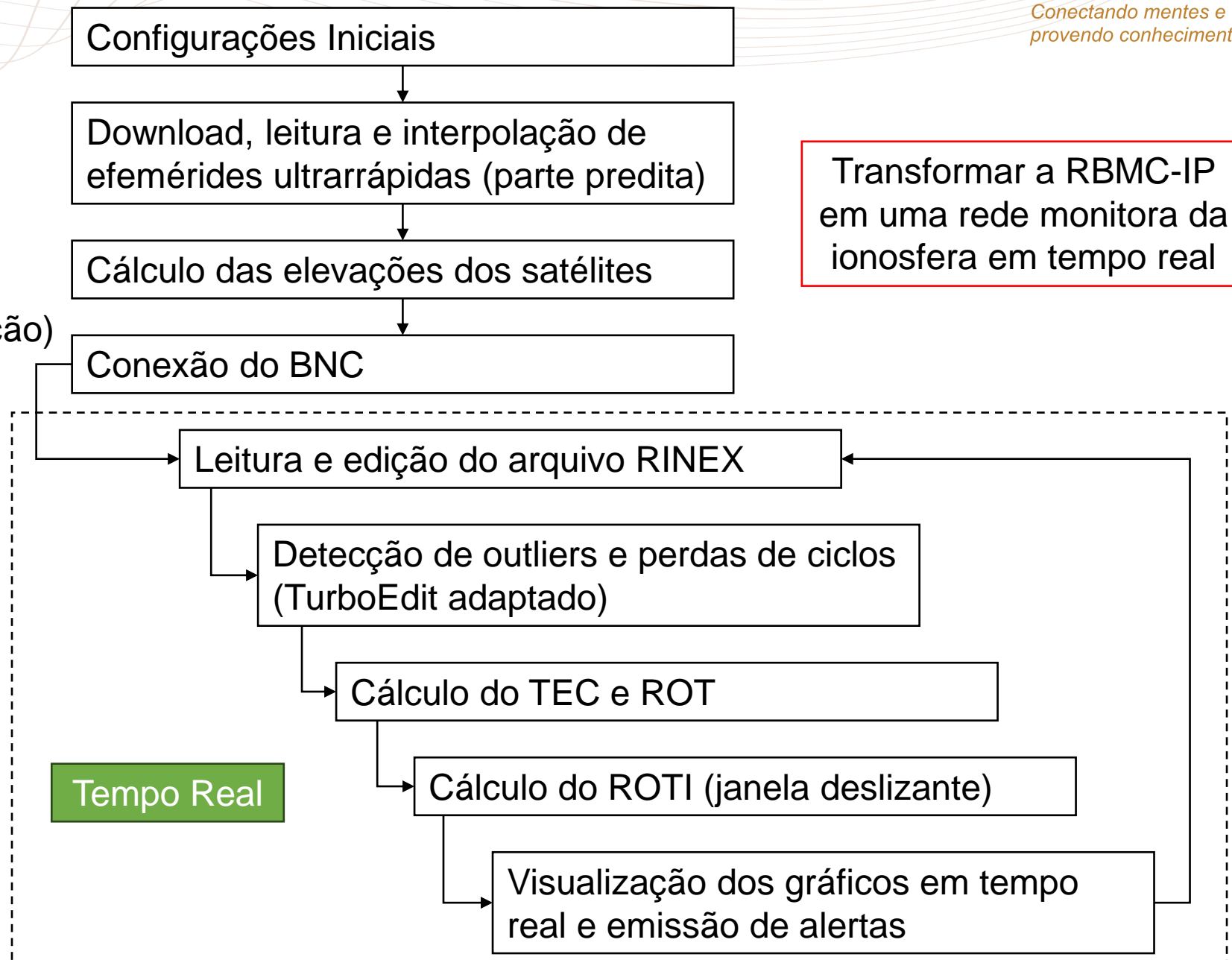
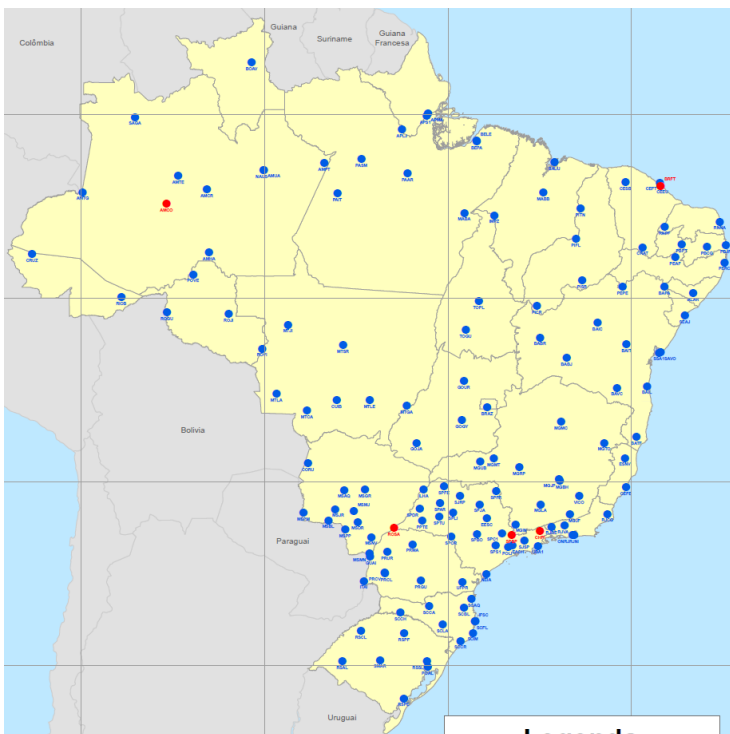
$$\text{TEC}_r^s = \frac{f_1^2 f_2^2}{40,3(f_1^2 - f_2^2)} \left[ (\lambda_2 \Phi_{2r}^s - \lambda_1 \Phi_{1r}^s) - (\lambda_1 N_{1r}^s - \lambda_2 N_{2r}^s) - e_{\Phi_{12}} \right]$$

$$\text{ROT} = \frac{\text{TEC}_{t_2} - \text{TEC}_{t_1}}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta \text{TEC}}{\Delta t}$$

$$\text{ROTI} = \sqrt{\langle \text{ROT}^2 \rangle - \langle \text{ROT} \rangle^2}$$

# Programa RTIon

- Linguagem C
- Índice ROTI
- RBMC-IP
- GPS L1/L2 (L5 em implementação)



# Classificação do ROTI

Alto  $> 0,2$

Moderado  $> 0,05 \leq 0,2$

Baixo  $\leq 0,05$

# Validação

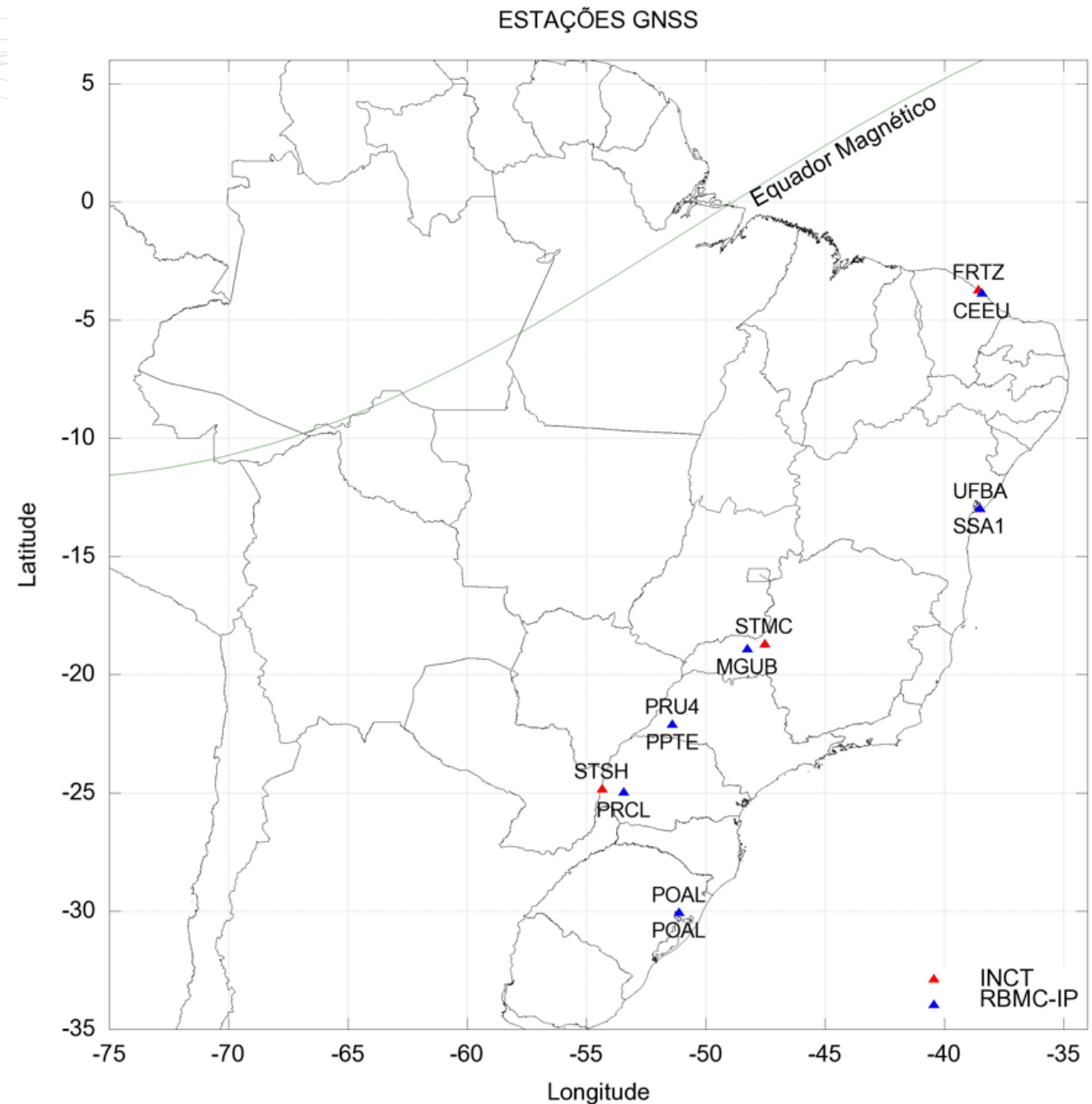
- 6 estações RBMC-IP (distribuição latitudinal)
- 6 estações INCT (mais próximas)
- Junho a Setembro/2024 (variação sazonal)
- 2 dias de cada mês – 22h às 2h UTC
- Máscara de 10°

## Interna:

ROTI em tempo real (RTIon) → RMSE  
 ROTI pós-processado (lon\_Index) → correlação

## Externa:

ROTI em tempo real (RTIon) → Comparação  
 S4 (ISMR Query Tool) → Visual





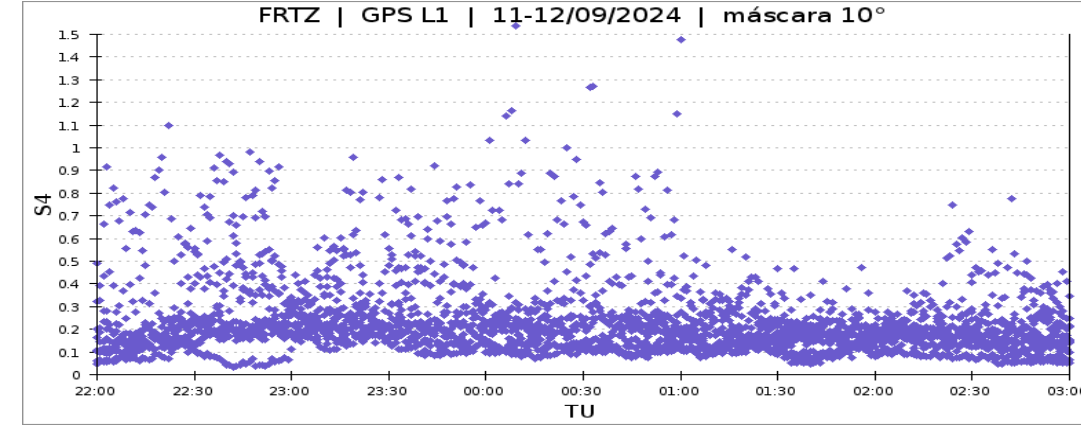
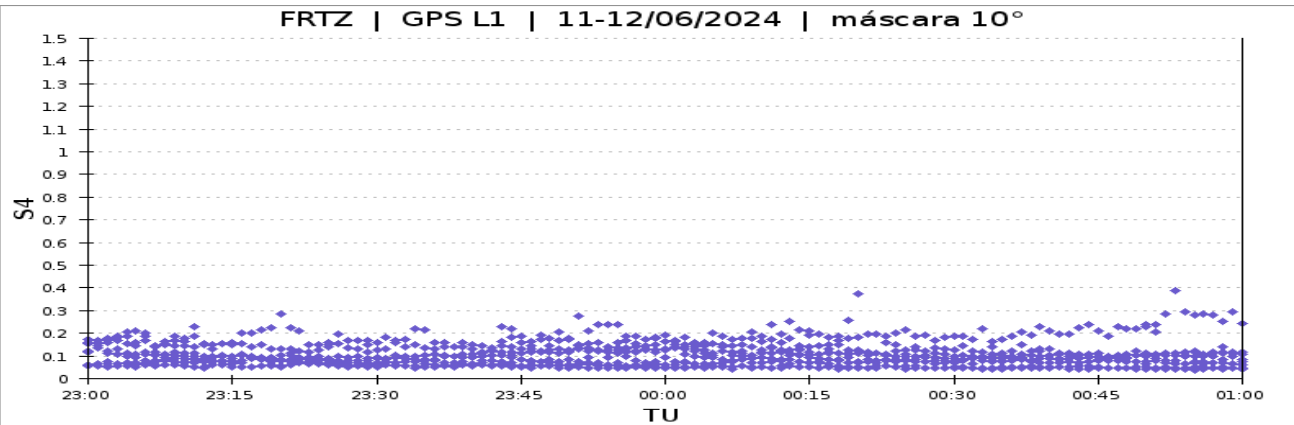
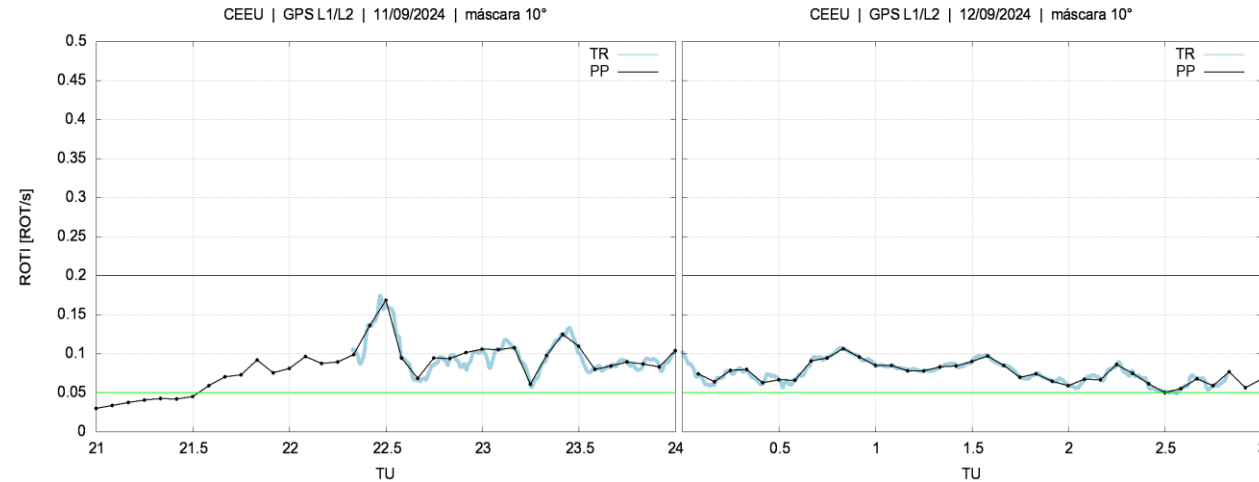
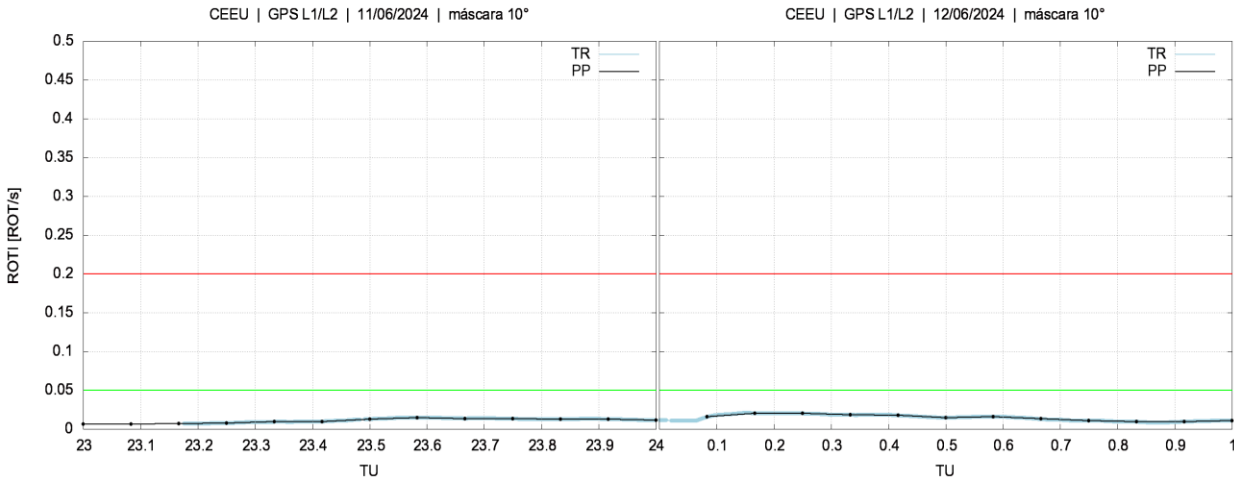
CEEU

11-12/06/2024

RMSE = 0,000124 ROT/s  
 $\rho = 0,999364$

11-12/09/2024

RMSE = 0,003942 ROT/s  
 $\rho = 0,983682$





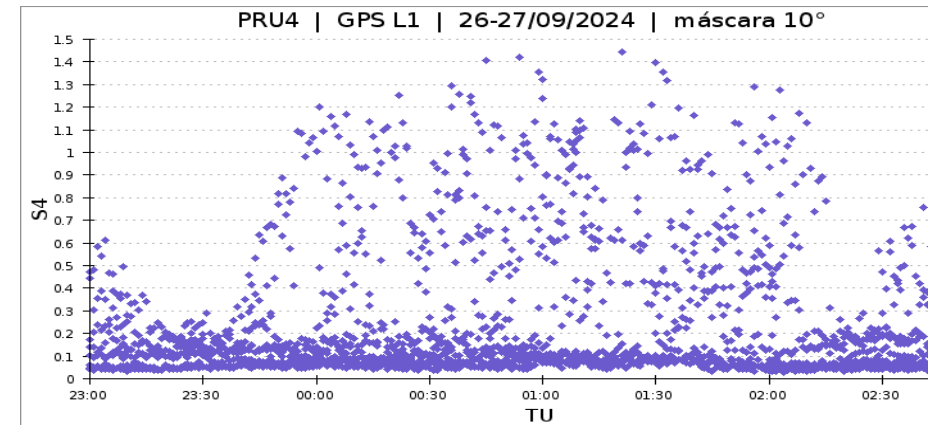
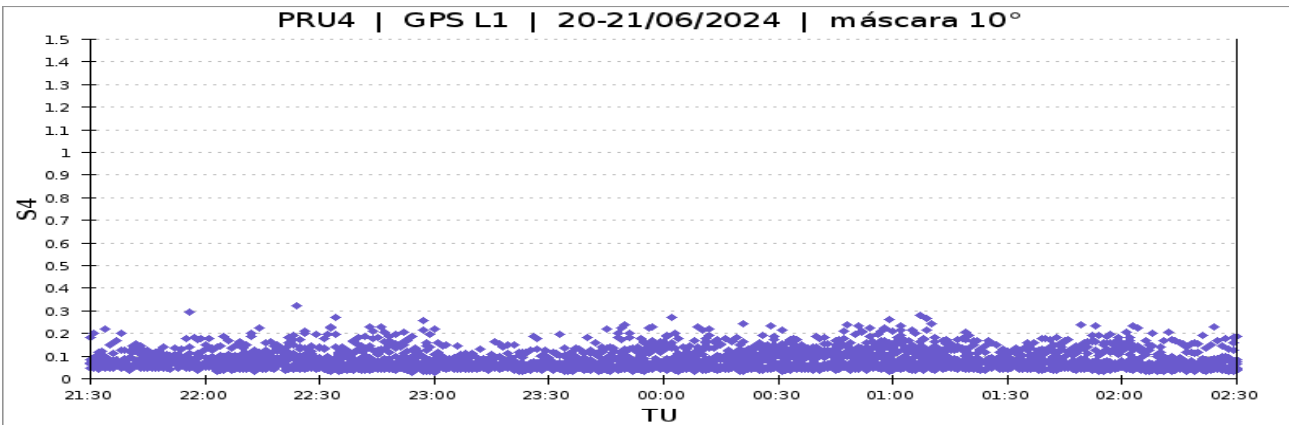
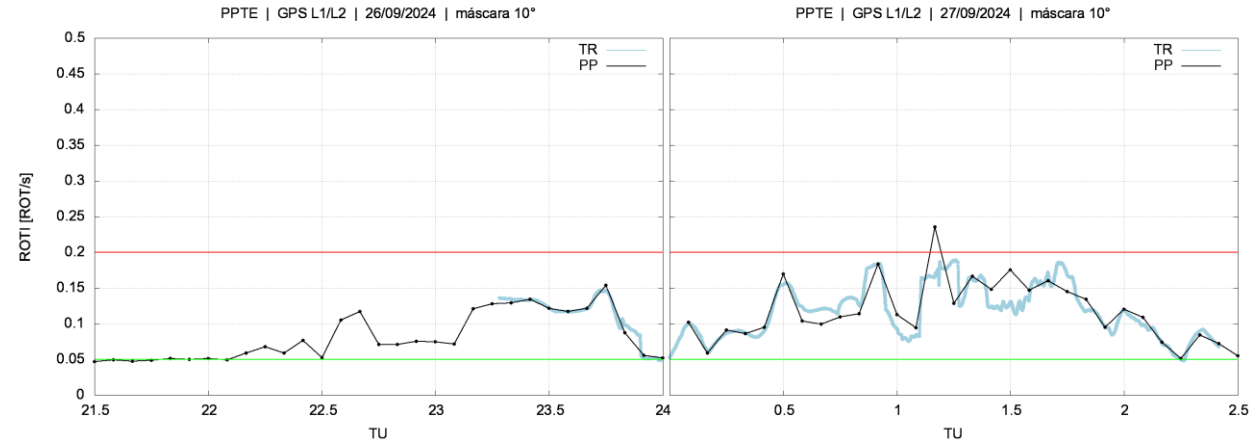
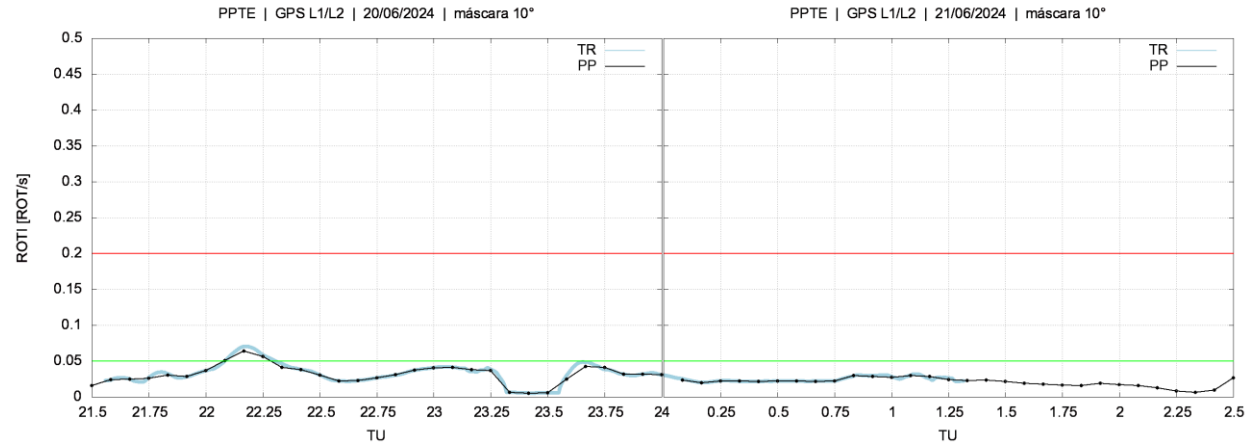
PSTE

20-21/06/2024

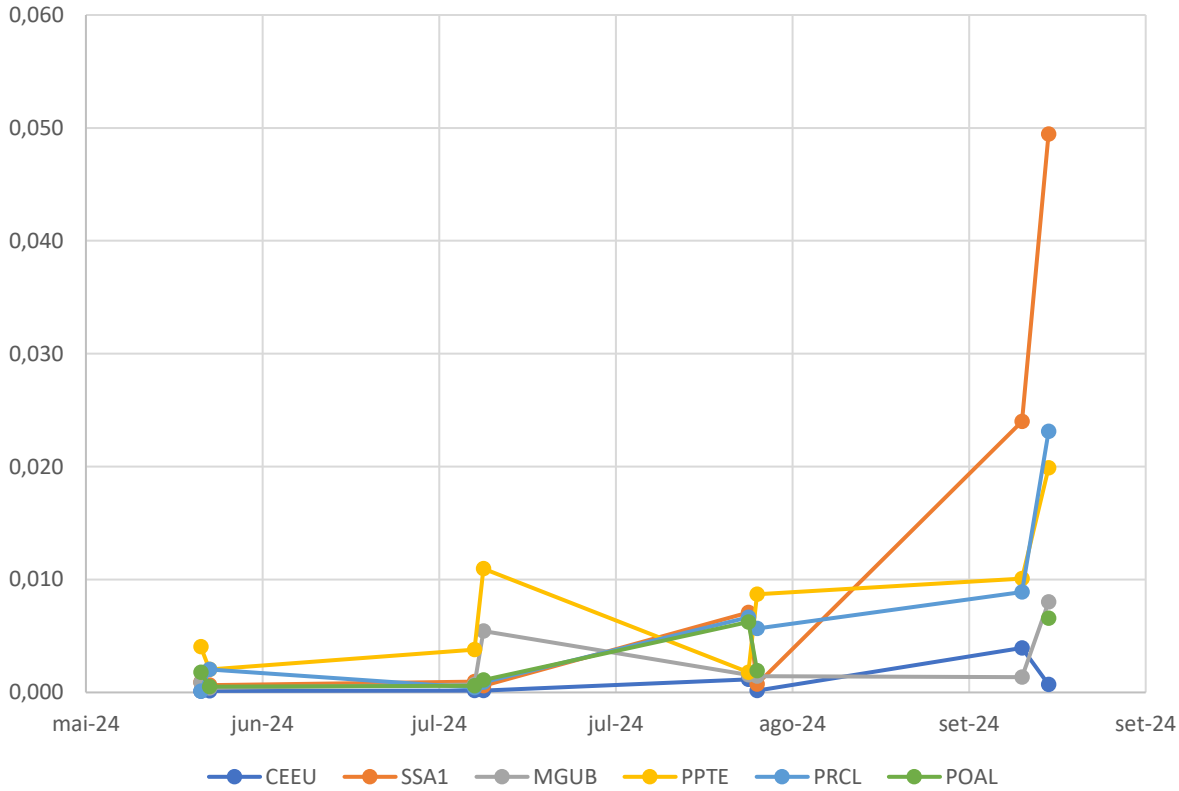
RMSE = 0,002020 ROT/s  
 $\rho = 0,988621$

26-27/09/2024

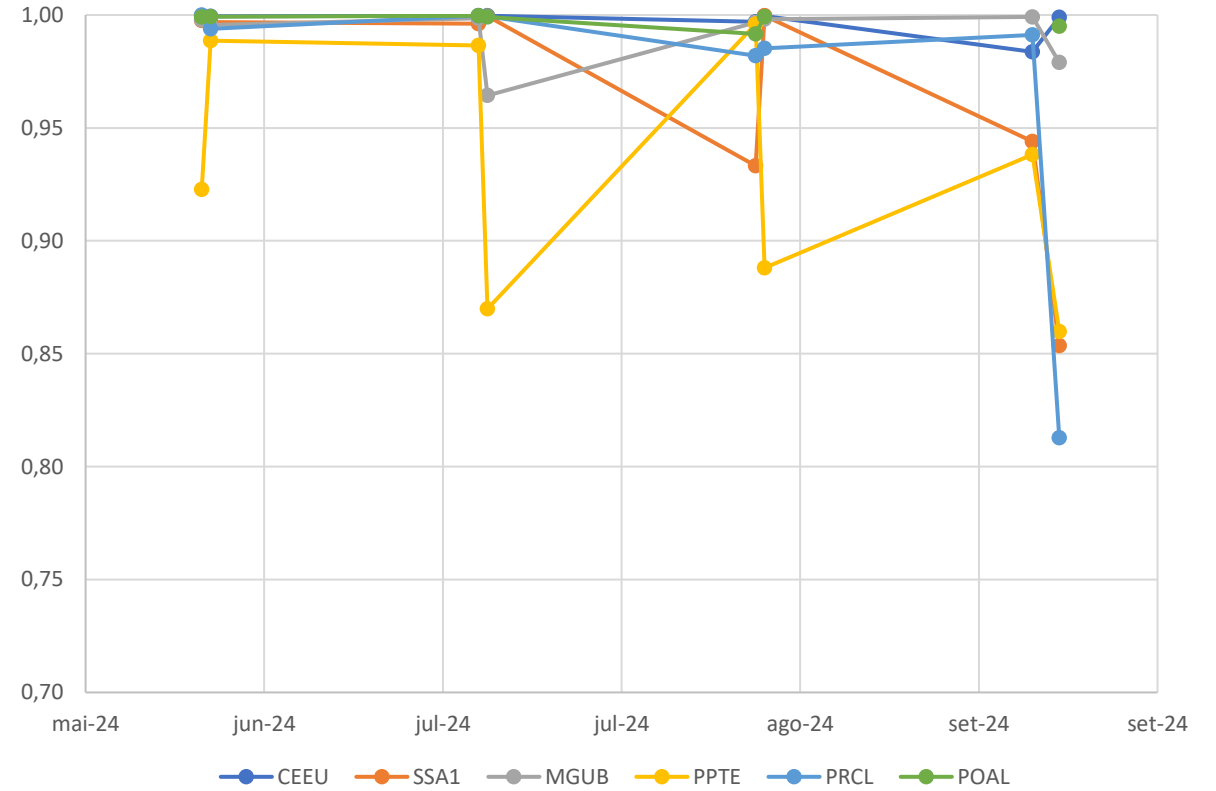
RMSE = 0,019881 ROT/s  
 $\rho = 0,859851$



RMSE



Correlação de Pearson



Solstício de inverno → alta acurácia e correlação  
 Equinócio de primavera → baixa acurácia e correlação

Variação Sazonal da Ionosfera

CEEU, POAL (equador geomagnético e médias latitudes) → alta acurácia e correlação  
 SSA1, MGUB, PPTe, PRCL (crista sul da AIE) → baixa acurácia e correlação

Variação geográfica da Ionosfera

# Experimento: ROTI x RTK

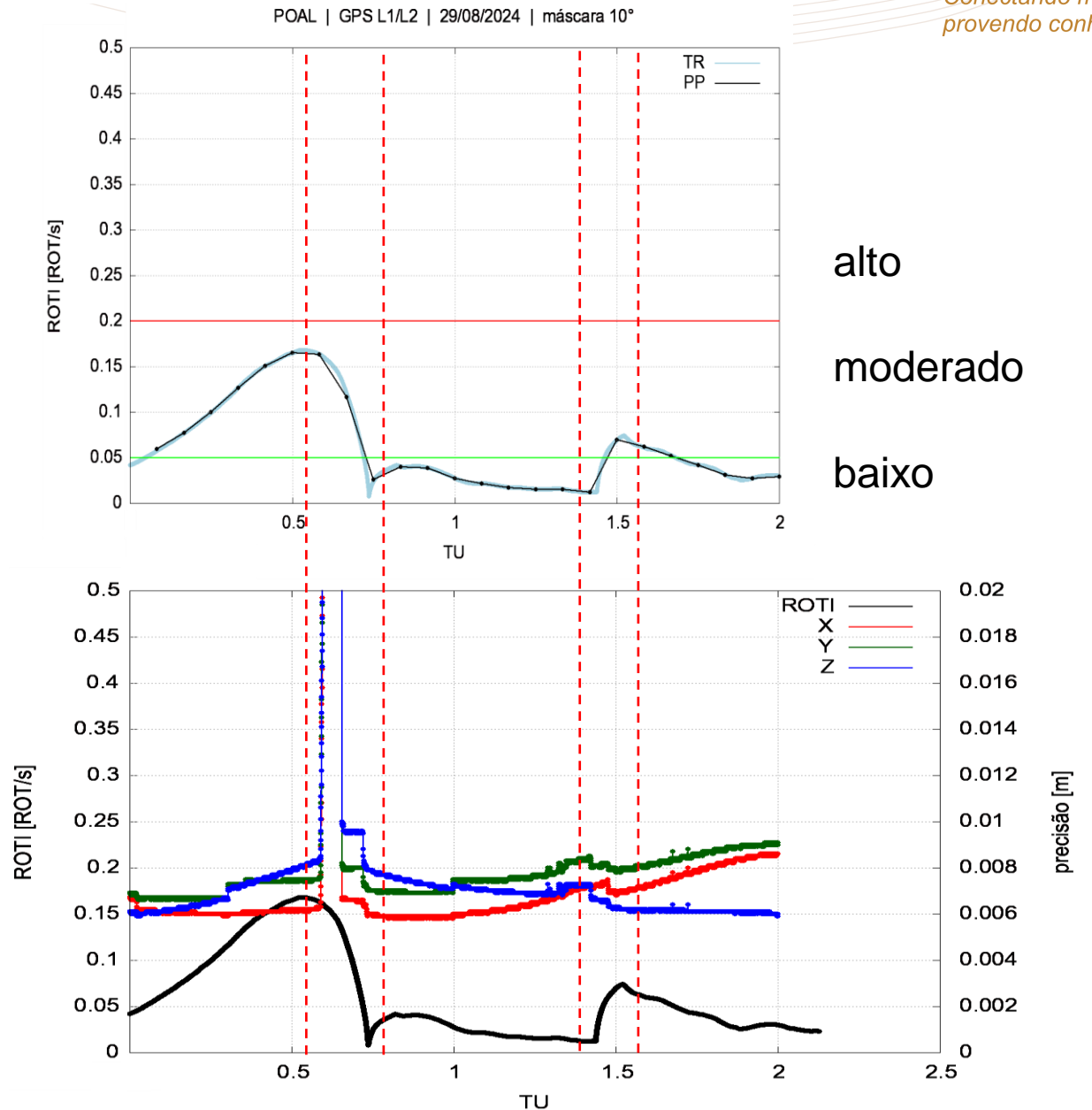
**Ion\_Index e RTIon**  
 POAL (RBMC): ROTI TR e PP

29/08/2024 0h – 2h TU

**RTKLib**  
 POAL (INCT): Base  
 POAL (RBMC): Rover

Distância de 17 m

Deteriora a precisão do ROVER na ocorrência de moderadas irregularidades



# Comentários Finais

- Durante o solstício de verão e equinócio de outono é usual que ocorram fortes irregularidades
- Os RMSE e correlações mostram resultados satisfatórios – em todos os testes preliminares (RMSE < 0,050 e  $\rho > 0,80$ )
- A consolidação do RTIon proporcionará aos usuários meios de obter avisos sobre a ocorrência de irregularidades na ionosfera. Os valores de ROTI podem também ser utilizados para a atenuação dos efeitos da ionosfera no posicionamento.
  - Alertas de início de ocorrências de moderadas e fortes irregularidades podem ser enviadas para usuários envolvidos em operações autônomas
  - Auxiliar no *geometric screening* (supressão de satélites alinhados com as regiões de irregularidades)
  - Ponderação no modelo estocástico
- O RTIon encontra-se em fase de validação (até março/2025), e ficará disponível aos usuários em junho/2025
- Contribuição importante para o INCT GNSS NavAer



# Referências

BLEWITT, G. An automatic editing algorithm for GPS data. *Geophysical Research Letters*, v. 17, n. 3, 1990. pp. 199-202

MATSUOKA, M. T.; CAMARGO, P. O. Cálculo do TEC usando dados de receptores GPS de dupla frequência para produção de mapa da ionosfera para região brasileira. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 56, n. 1, 2004. pp. 14-27

MONICO, J. F. G. *Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações*. 2ª ed. São Paulo: Ed. da UNESP, 2008. 476p.

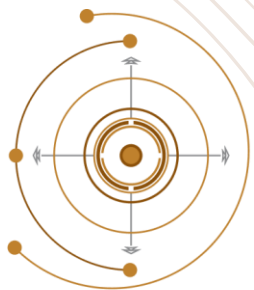
MONICO, J. F. G.; PAULA, E. R.; MORAES, A. O.; COSTA, E.; SHIMABUKURO, M. H.; ALVES, D. B. M.; SOUZA, J. R.; CAMARGO, P. O.; PROL, F. S.; VANI, B. C.; PEREIRA, V. A. S.; OLIVEIRA JUNIOR, P. S.; TSUCHIYA, I.; AGUIAR, C. R. The GNSS NavAer INCT Project Overview and Main Results. *Journal of Aerospace Technology and Management*, v. 14, p. 1-23, 2022.

PEREIRA, V. A. S.; CAMARGO, P. O. Brazilian active GNSS networks as systems for monitoring the ionosphere. *GPS Solutions*, v. 21, n. 3, 2017. pp. 1013-1025

PI, X.; MANNUCCI, A. J.; LINDQWISTER, U. J.; HO, C. M. Monitoring of global ionospheric irregularities using the worldwide GPS network. *Geophysical Research Letters*, v. 24, n. 18, 1997. pp. 2283-2286

SILSO. Sunspot Index and Long-term Solar Observations. *12-month forecasts of the Monthly sunspot number, 2024*. Disponível em: <<https://www.sidc.be/SILSO/IMAGES/GRAPHICS/prediSC.png>>. Acesso em: 4 jul. 2024.

VANI, B. C.; SHIMABUKURO, M. H.; MONICO, J. F. G. Visual exploration and analysis of ionospheric scintillation monitoring data: the ISMR query tool. *Computers & Geosciences*, v. 104, 2017. pp. 125-134



# 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