



X CONFERÊNCIA NACIONAL DE CARTOGRAFIA E GEODESIA

INFORMAÇÃO GEOESPACIAL PARA OS OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

INSTITUTO POLITÉCNICO DA GUARDA

02 – 03 NOVEMBRO 2023

A Tomografia GNSS no apoio à Previsão Meteorológica

André SÁ¹, Witold ROHM² e Machiel BOS³

¹ Instituto Politécnico da Guarda, Guarda, Portugal

² Institute of Geodesy and Geoinformatics, WUELS, Wrocław, Polónia

³ TeroMovigo – Earth Innovation, Coimbra, Portugal

(andre_sa@ipg.pt)



ORDEM
DOS
ENGENHEIROS



1

CONTEXTO E MOTIVAÇÃO

- GNSS
- Vapor de Água Atmosférico

2

INTRODUÇÃO

- Tomografia GNSS

3

SISTEMA TOMOGRÁFICO GNSS

- Implementação
- Paralelização

4

CASOS DE ESTUDO

- CdE I
- CdE II

5

CONCLUSÕES



X CONFERÊNCIA NACIONAL DE CARTOGRAFIA E GEODESIA

INFORMAÇÃO GEOESPACIAL PARA OS OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

02 – 03 NOV. INSTITUTO POLITÉCNICO DA GUARDA

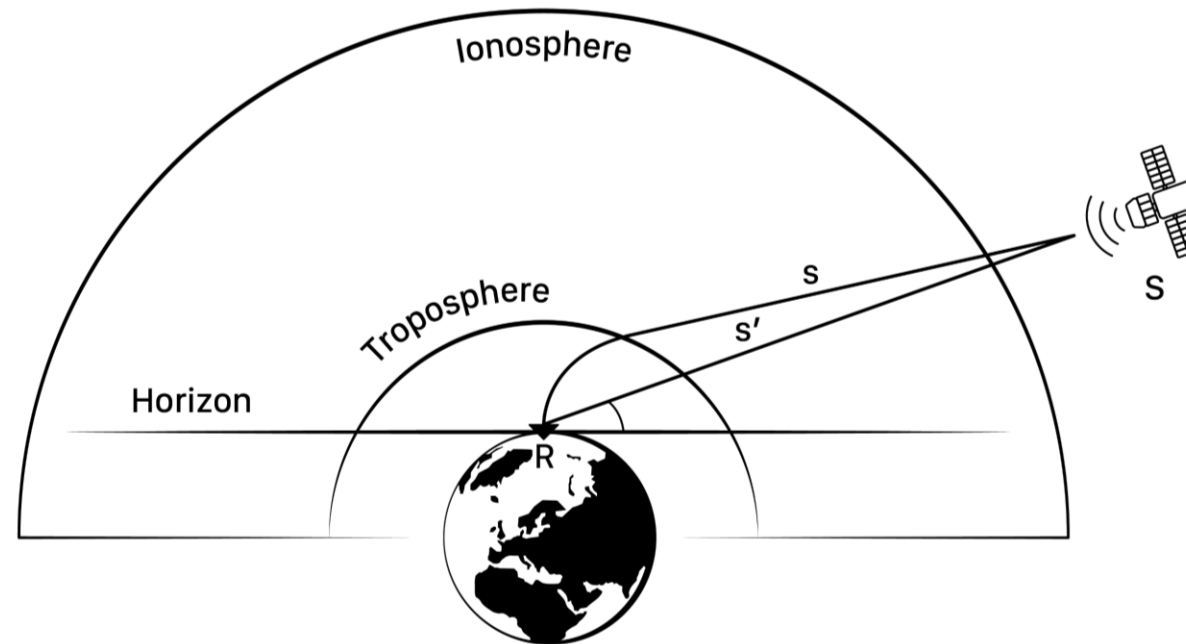


ORDEM
DOS
ENGENHEIROS

CONTEXTO E MOTIVAÇÃO

"You may delay, but time will not!" Benjamin Franklin

"Time, it's the physical parameter which we can measure with highest accuracy!" Gunnar Elgered



X CONFERÊNCIA NACIONAL DE CARTOGRAFIA E GEODESIA

INFORMAÇÃO GEOESPACIAL PARA OS OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

02 – 03 NOV. INSTITUTO POLITÉCNICO DA GUARDA



ORDEM
DOS
ENGENHEIROS

CONTEXTO E MOTIVAÇÃO

- O vapor de água na atmosfera apresenta alta variabilidade no tempo e no espaço e desempenha um papel fundamental em quase todos os processos atmosféricos;
- A sua alta variabilidade (pode ser superior a 50% em poucas horas) afecta a evolução de fenómenos meteorológicos em várias escalas (Miranda et al., 2013);
- A monitorização do vapor de água é um pré-requisito para as validações e melhorias dos modelos (Wufmeyer et al., 2015);
- Atualmente nenhuma técnica consegue observar o vapor de água com a resolução temporal e espacial desejável.
- O aumento de casos de eventos atmosféricos extremos de acordo com a base de dados de desastres naturais (source: International Disaster Database: EM-DAT);

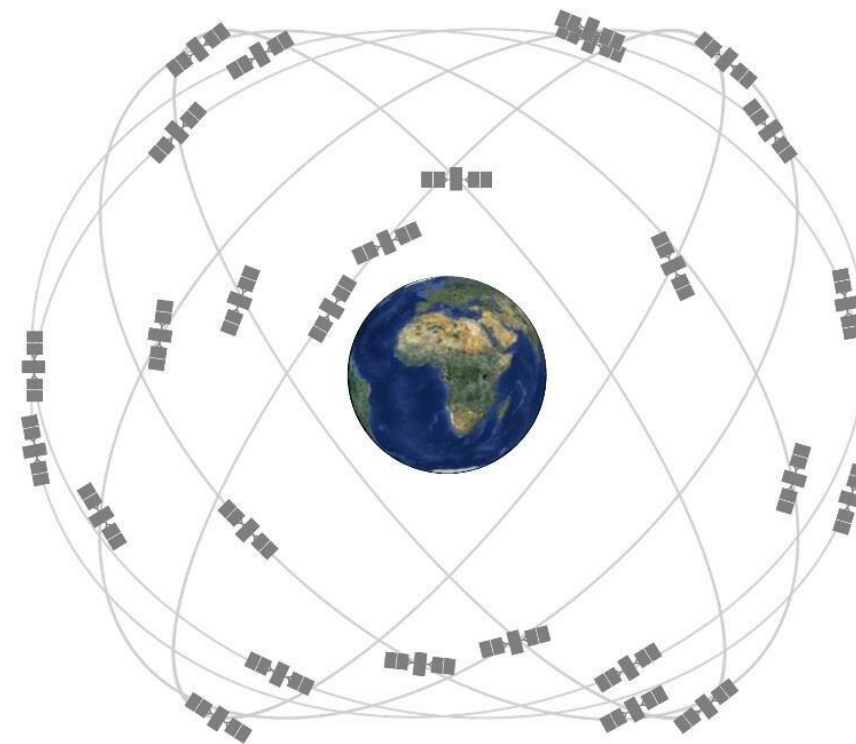


AMBIÇÃO

Encontrar soluções que possam fornecer informações do vapor de água atmosférico 3D/4D para fins de previsão meteorológica em tempo real/quase real.



TOMOGRAFIA VS TOMOGRAFIA GNSS



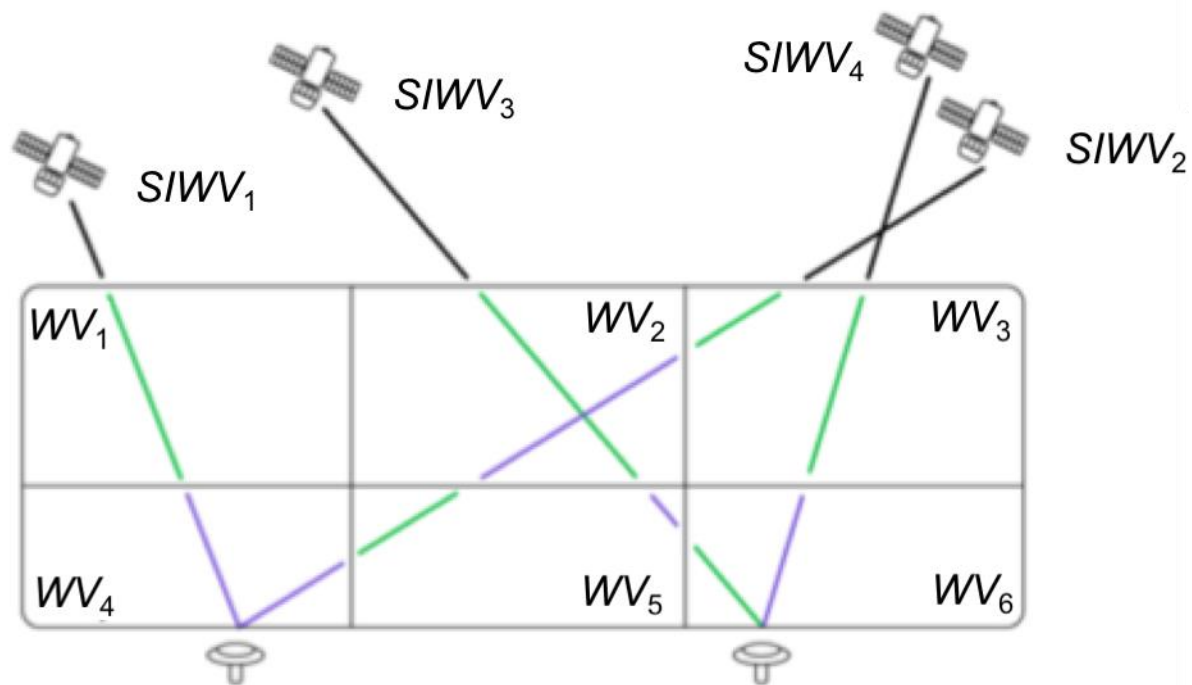
X CONFERÊNCIA NACIONAL DE CARTOGRAFIA E GEODESIA

INFORMAÇÃO GEOESPACIAL PARA OS OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

02 – 03 NOV. INSTITUTO POLITÉCNICO DA GUARDA



ORDEM
DOS
ENGENHEIROS

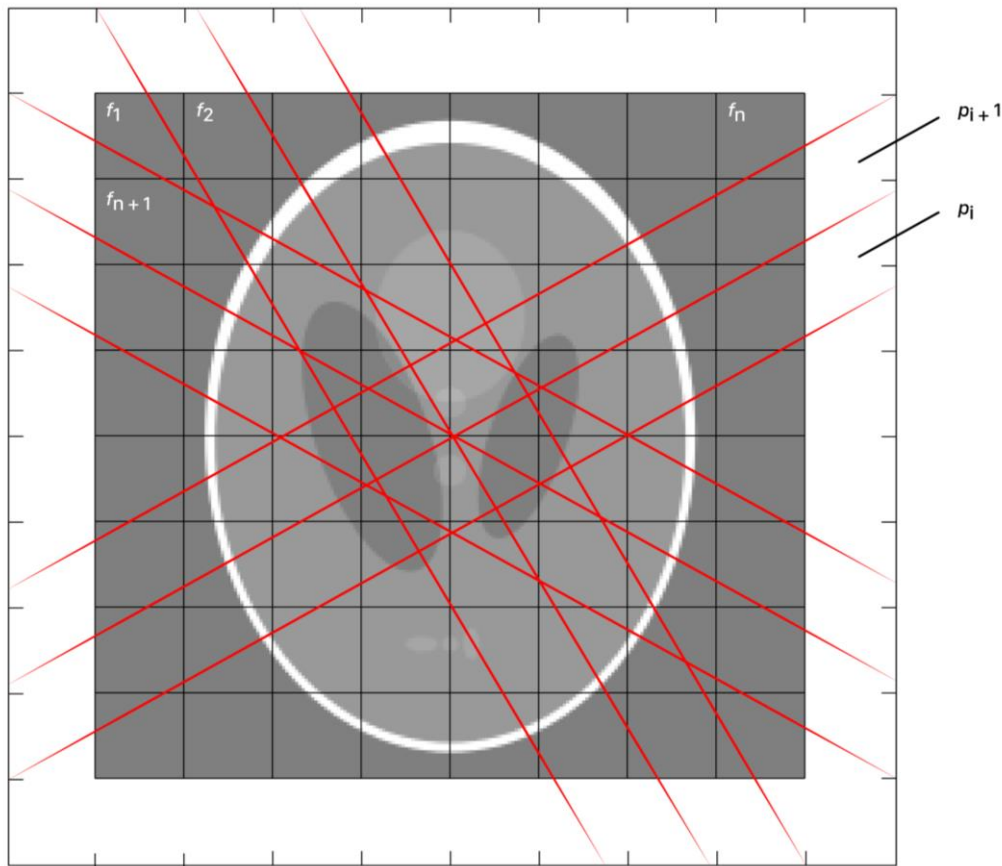


$$\begin{pmatrix} I_{11} & 0 & 0 & I_{14} & 0 & 0 \\ 0 & I_{22} & I_{23} & I_{24} & I_{25} & 0 \\ 0 & I_{32} & 0 & 0 & I_{35} & I_{36} \\ 0 & 0 & I_{33} & 0 & 0 & I_{46} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} WV_1 \\ WV_2 \\ WV_3 \\ WV_4 \\ WV_5 \\ WV_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} SIWV_1 \\ SIWV_2 \\ SIWV_3 \\ SIWV_4 \end{pmatrix}$$

Técnicas padrão para resolver problemas lineares inversos:

- Singular Value Decomposition;
- Tikhonov-Regularization;
- Conjugate Gradient Method;
- Weighted Least-Squares Solution;
- **Algebraic Reconstruction Techniques;**
- Etc.





ART foram descritos pela primeira vez por Kaczmarz (1937) e redescobertos no campo da reconstrução de imagens a partir de projeções por Richard Gordon et al., 1970;

ART são algoritmos iterativos;

(Bender et al., 2011) foi o primeiro a aplicar para fins de Tomografia GNSS.

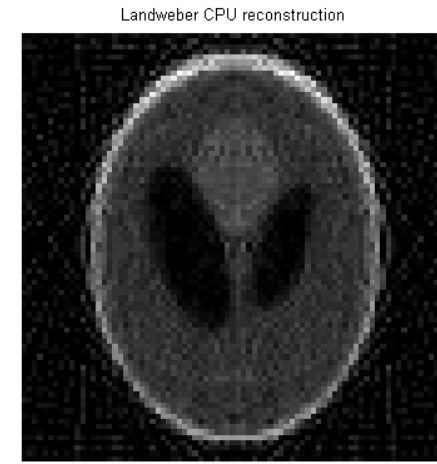
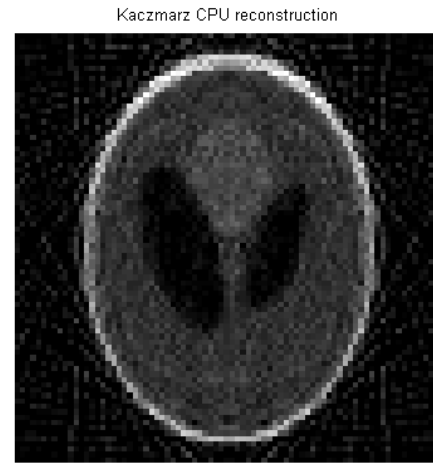
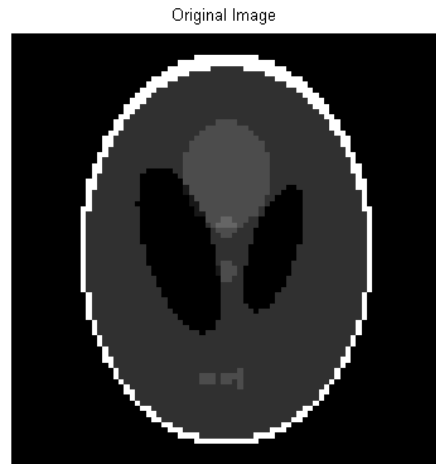
“Not sensitive to ray bending and attenuation;

These algorithms are highly computationally intensive, but they can be parallelized.”

$$\sum_{j=1}^N w_{ij} f_j = p_i, \quad i = 1, 2, \dots, M$$



IMPLEMENTAÇÃO



Para primeiro teste utilizou-se uma imagem com resolução de 80×80 . Os dados de projeção foram gerados usando 75 raios paralelos em 36 ângulos diferentes.

Algoritmo	% reconstrução
ART 1 (Kaczmarz)	84%
ART 2 (SART)	84%
ART 3 (Landweber)	82%



X CONFERÊNCIA NACIONAL DE CARTOGRAFIA E GEODESIA

INFORMAÇÃO GEOESPACIAL PARA OS OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

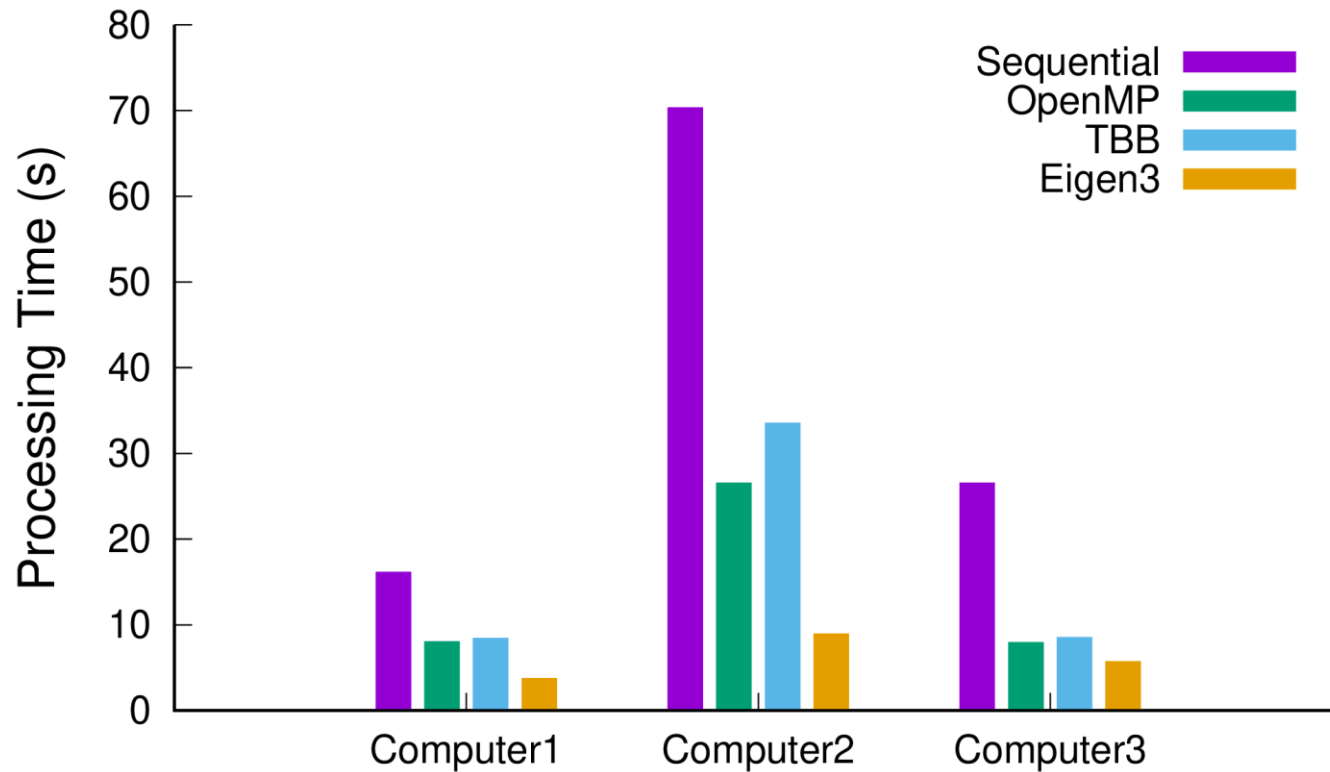
02 – 03 NOV. INSTITUTO POLITÉCNICO DA GUARDA



ORDEM
DOS
ENGENHEIROS

PARALELIZAÇÃO

Matriz: 700*500



Eigen3

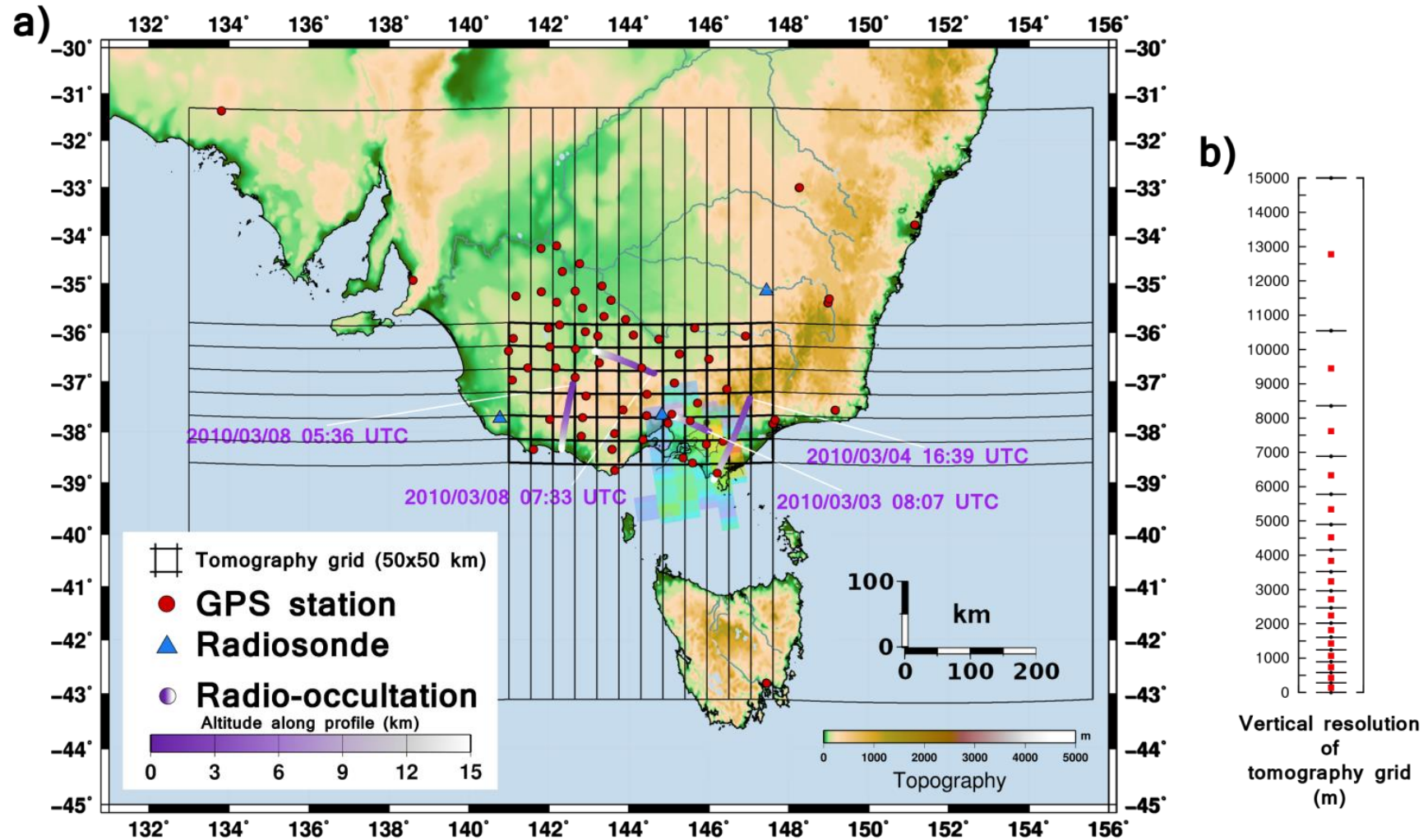
Computador 1: 5 * rápido

Computador 2: 20 * rápido

Computador 3: 7 * rápido

Velocidade de processamento das versões sequencial e paralela

CdE I



Intercomparison multi-model tomography: “Cross-Comparison and Methodological Improvement in GPS Tomography, Remote Sensing, Brenot et al., 2020.”





X CONFERÊNCIA NACIONAL DE CARTOGRAFIA E GEODÉSIA

INFORMAÇÃO GEOESPACIAL PARA OS OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

02 – 03 NOV. INSTITUTO POLITÉCNICO DA GUARDA



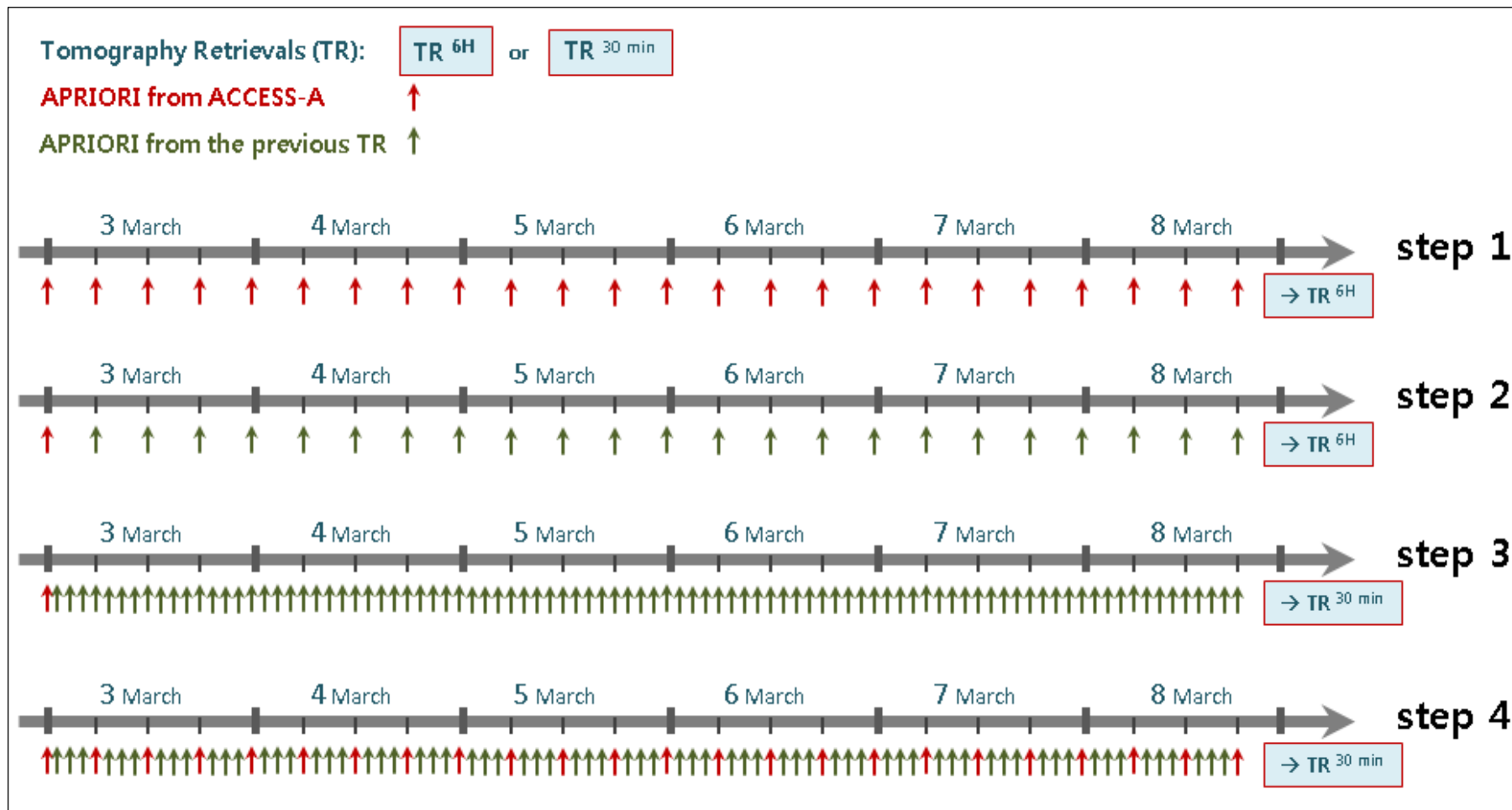
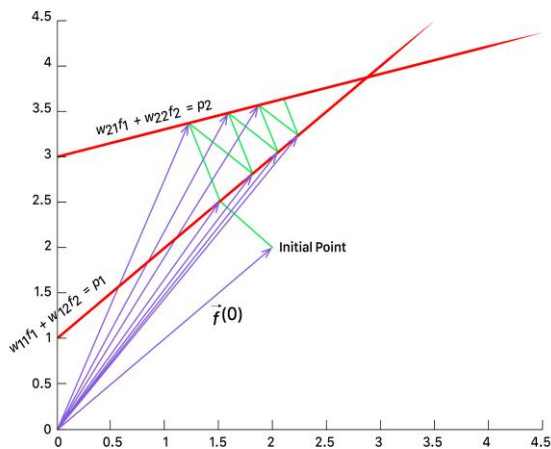
ORDEM
DOS
ENGENHEIROS

Tomography Model	Inversion	Dim.
BIRA Royal Belgium Institute For Space Aeronomy	 <i>SVD, weighted & damped LS adjustment</i>	3D
WUELS TOMO 2	 <i>Kalman filter with selective SVD</i>	3D
SWART	<i>SART</i>	3D

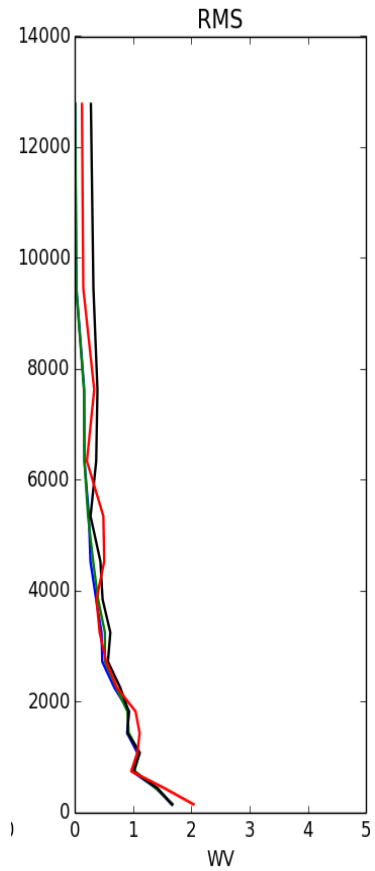
(Brenot et al., 2020).

GNSS processing strategy	
Software	Bernese 5.0
Strategy	Double differenced
ZTD + Gradients (30 min resolution)	
ZHD extracted from ACCESS-A	
Isotropic mapping function GMF	
Anisotropic mapping function Chen and Herring	
Gradient hydrostatic part was removed using ACCESS-A	

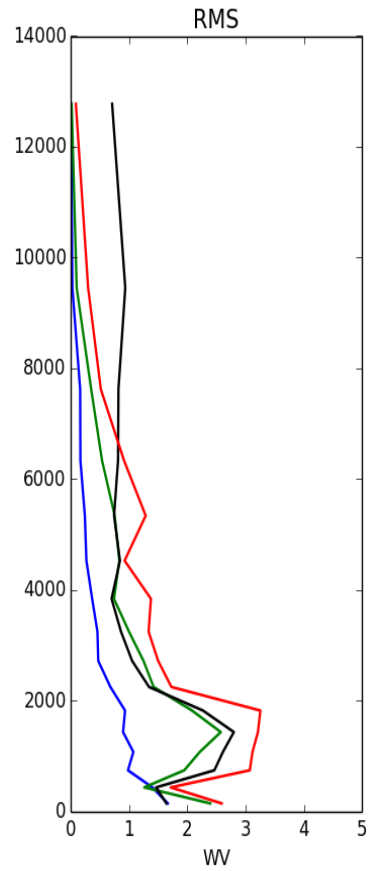




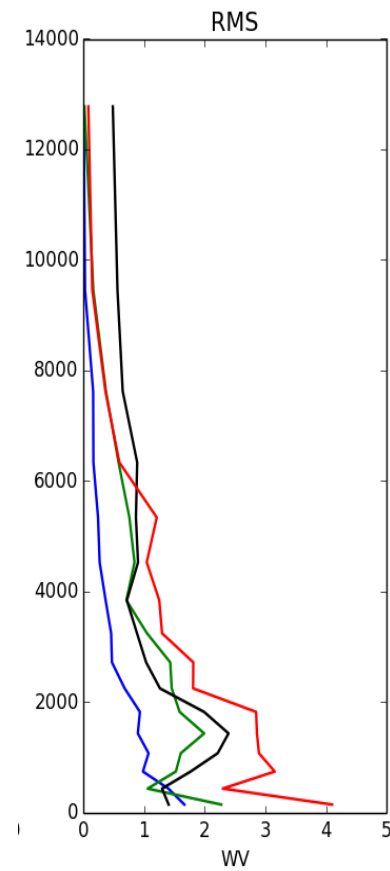
step 1



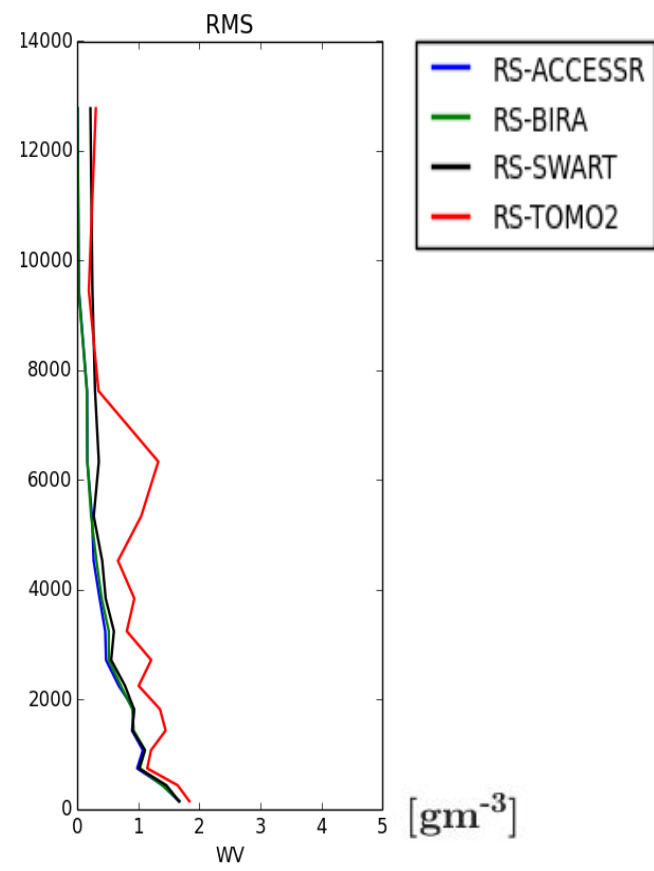
step 2



step 3



step 4



X CONFERÊNCIA NACIONAL DE CARTOGRAFIA E GEODESIA

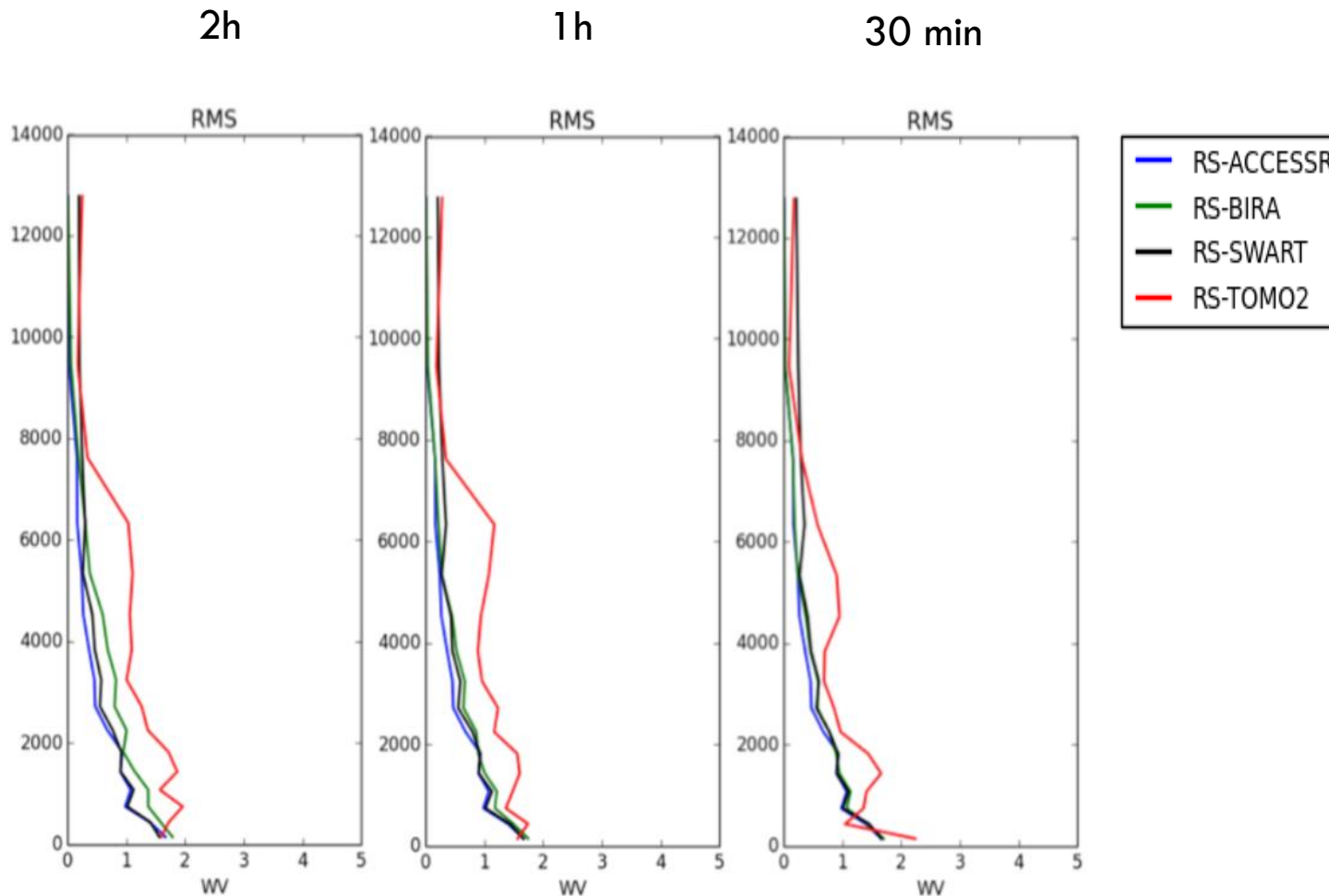
INFORMAÇÃO GEOESPACIAL PARA OS OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

02 – 03 NOV. INSTITUTO POLITÉCNICO DA GUARDA



ORDEM
DOS
ENGENHEIROS

Stacked data with initialization every 6h



$$\begin{matrix}
 t=0 \\
 t=30
 \end{matrix}
 \begin{pmatrix}
 I_{11} & 0 & 0 & I_{14} & 0 & 0 \\
 0 & I_{22} & I_{23} & I_{24} & I_{25} & 0 \\
 0 & I_{32} & 0 & 0 & I_{35} & I_{36} \\
 0 & 0 & I_{33} & 0 & 0 & I_{46} \\
 I_{11} & 0 & 0 & I_{14} & 0 & 0 \\
 0 & I_{22} & I_{23} & I_{24} & I_{25} & 0 \\
 0 & I_{32} & 0 & 0 & I_{35} & I_{36} \\
 0 & 0 & I_{33} & 0 & 0 & I_{46}
 \end{pmatrix}
 \cdot
 \begin{pmatrix}
 WV_1 \\
 WV_2 \\
 WV_3 \\
 WV_4 \\
 WV_5 \\
 WV_6
 \end{pmatrix}
 =
 \begin{pmatrix}
 SIWV_1 \\
 SIWV_2 \\
 SIWV_3 \\
 SIWV_4 \\
 SIWV_1 \\
 SIWV_2 \\
 SIWV_3 \\
 SIWV_4
 \end{pmatrix}$$



X CONFERÊNCIA NACIONAL DE CARTOGRAFIA E GEODESIA

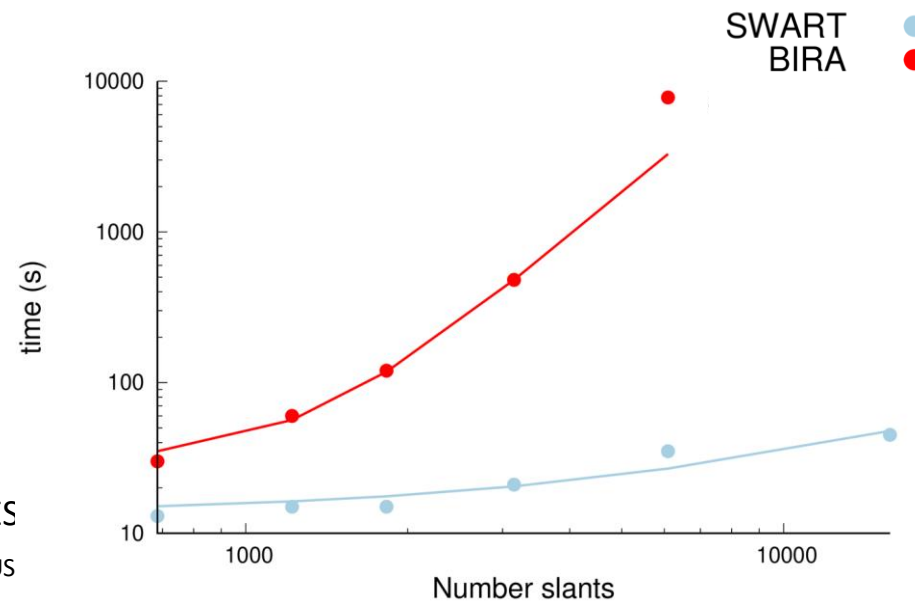
INFORMAÇÃO GEOESPACIAL PARA OS OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

02 – 03 NOV. INSTITUTO POLITÉCNICO DA GUARDA

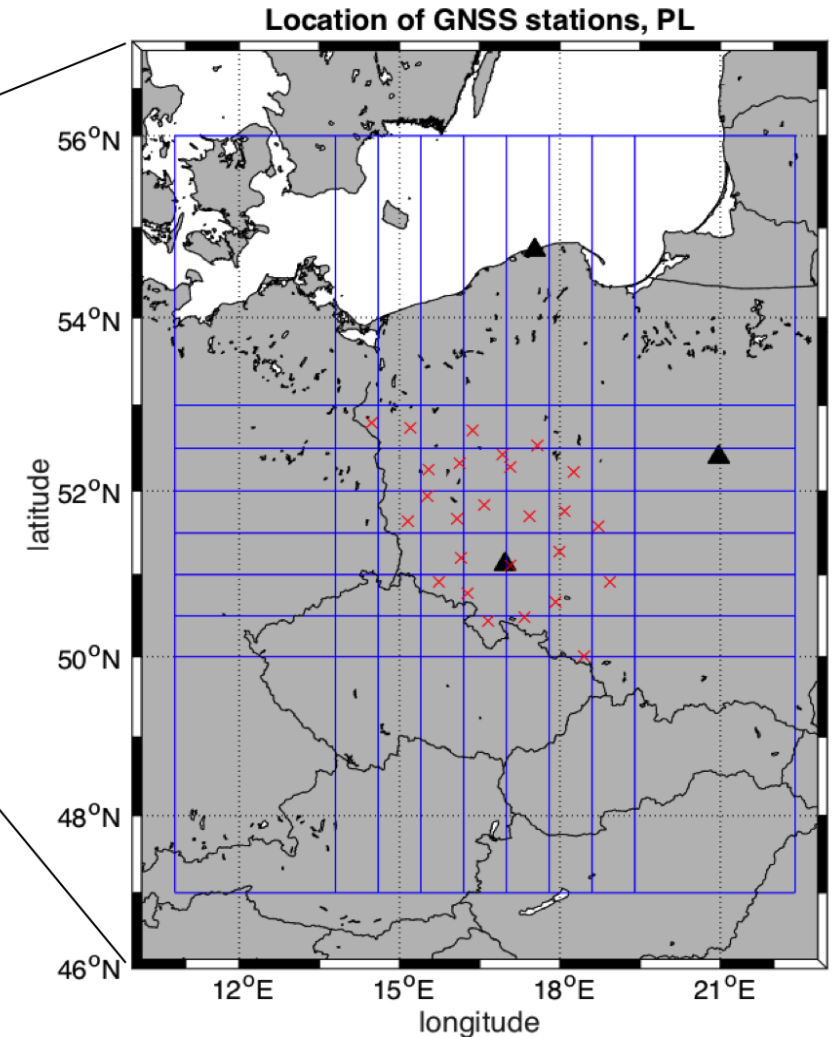
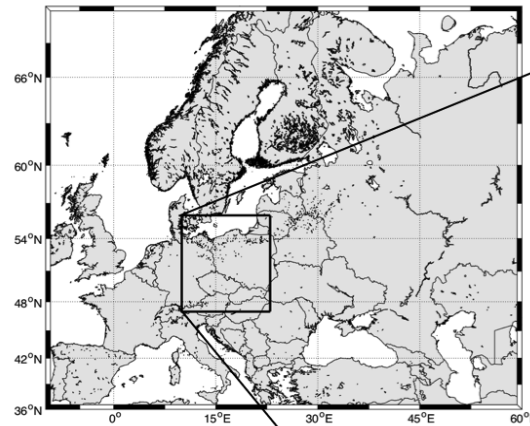


ORDEM
DOS
ENGENHEIROS

Tomography	No stacking	Stacked data (30 min)	Stacked data (1h)	Stacked data (2h)	Pseudo Observations Stacked data (30 min)	Pseudo Observations Stacked data (2 h)	Pseudo Observations Stacked data (2 h)
Number of slants	685	1219	1826	3151	6094	15756	15756
Matrix size	685*1792	1219*1792	1826*1792	3151*1792	6094*1792	15756*1792	15756*2150
SWART (seconds)	13	15	15	21	35	45	51
BIRA (seconds)	30	60	120	480 (8 min)	7800 (130 min)	Not computed	Not computed



CdE II



GNSS processing strategy	
Software	Bernese 5.2
Strategy	Precise Point Position (PPP)
Elevation cut-off	3°
Mapping function	VMF1
ZTD/gradients interval	2.5 min/1h
ZD post-fit residuals	Yes
Products	CODE final

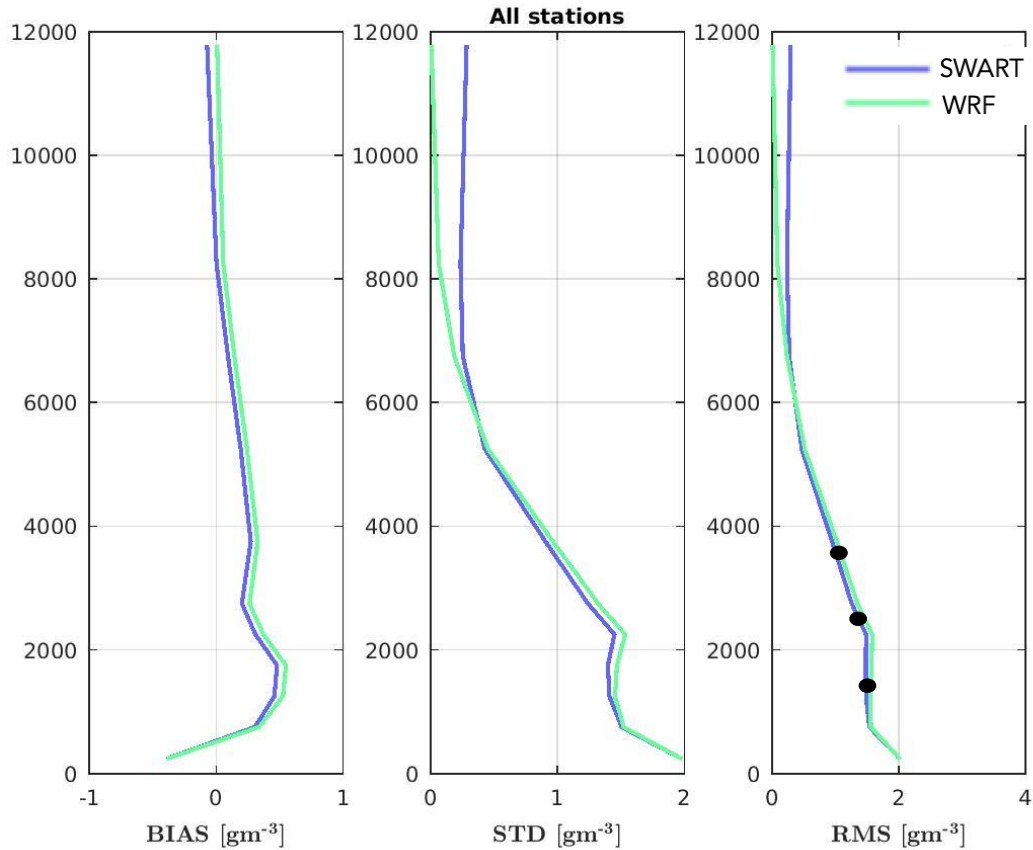
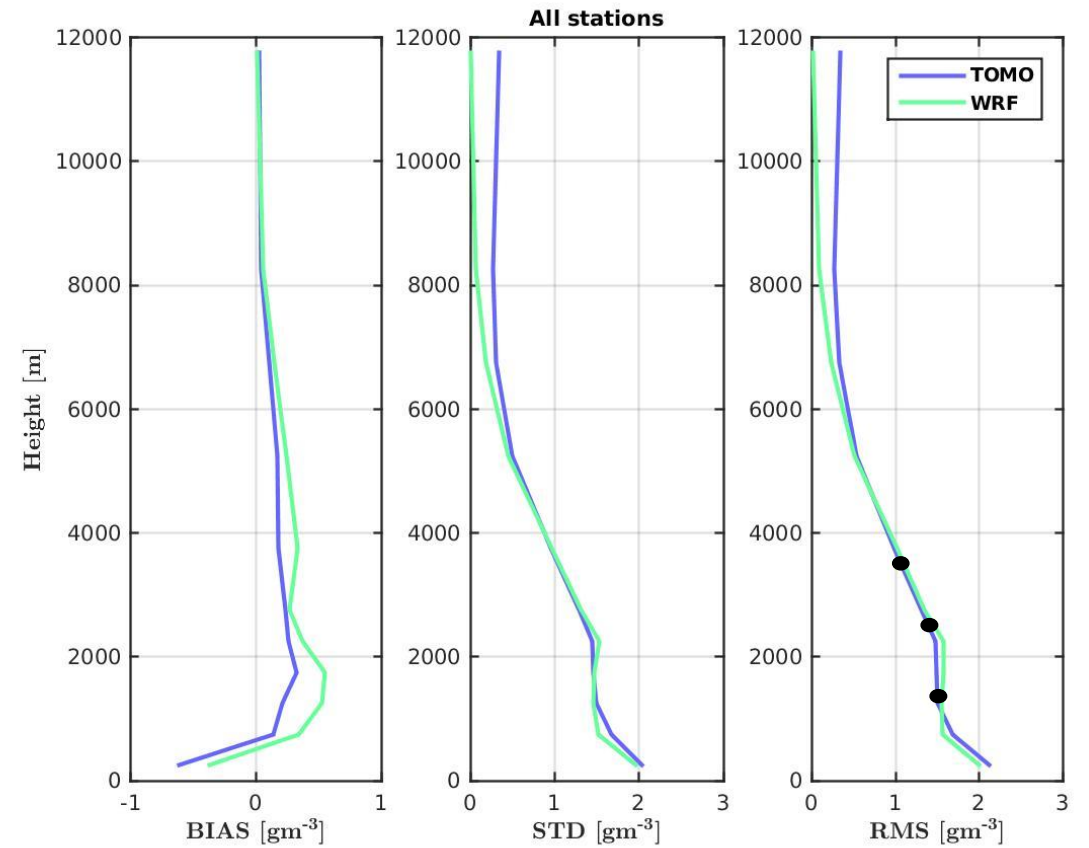
05 de maio a 29 de junho de 2013 (56 dias)

Informação sobre as soluções GNSS-STD (Kacmarík et al. 2017)

CdE II

SWART (Inicialização a cada 24h) vs WRF

SWART (Inicialização a cada 1h) vs WRF

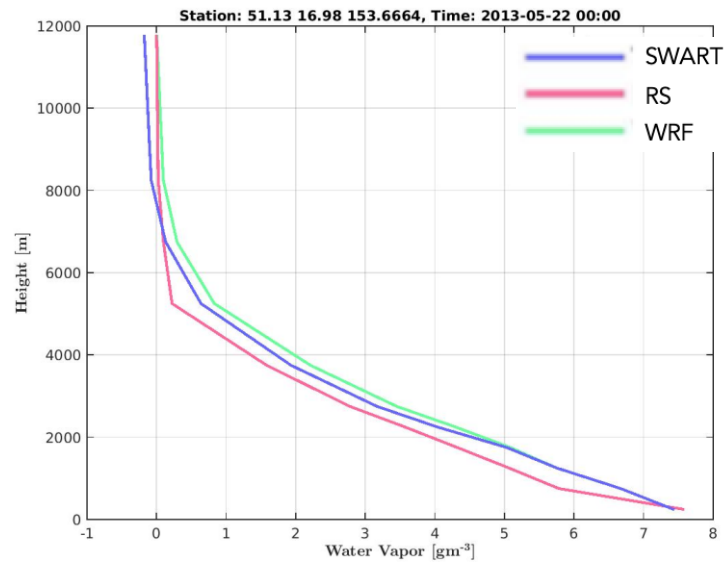


RMS		Height (m)	RMS	
SWART	WRF		SWART	WRF
0.94	1.02	3750	0.97	1.02
1.48	1.57	2750	1.47	1.57
1.47	1.56	1750	1.49	1.56

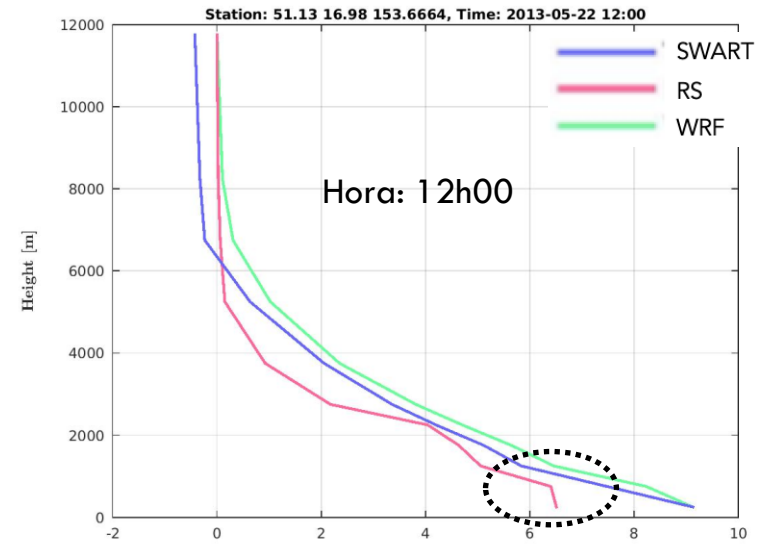


CdE II

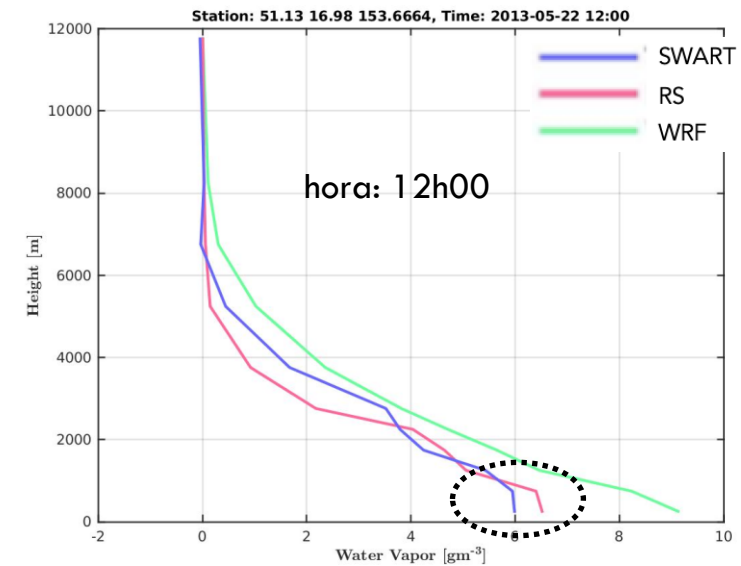
Data: 2013-05-22
Hora: 00h00



Inicialização a cada 1h



Inicialização a cada 24h



X CONFERÊNCIA NACIONAL DE CARTOGRAFIA E GEODÉSIA

INFORMAÇÃO GEOESPACIAL PARA OS OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

02 – 03 NOV. INSTITUTO POLITÉCNICO DA GUARDA

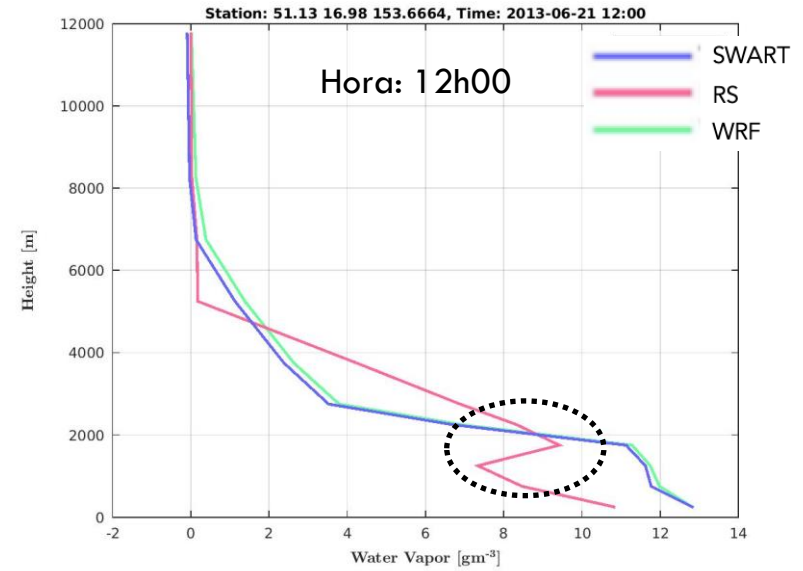
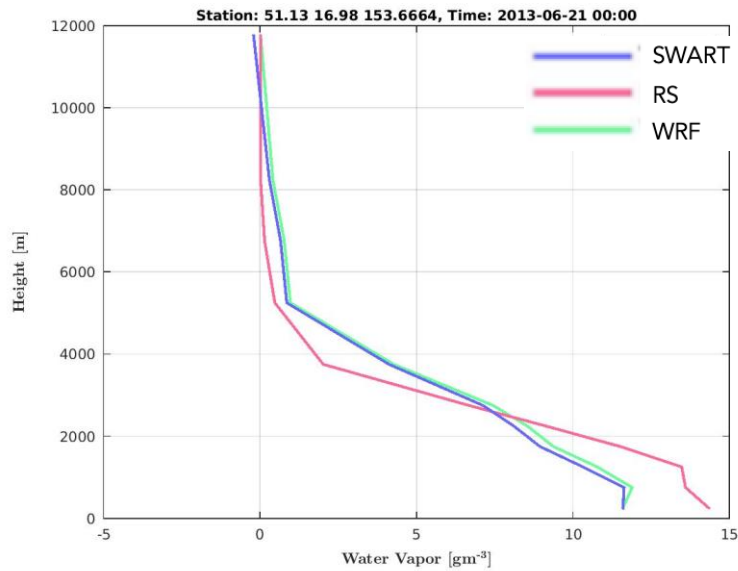


ORDEM
DOS
ENGENHEIROS

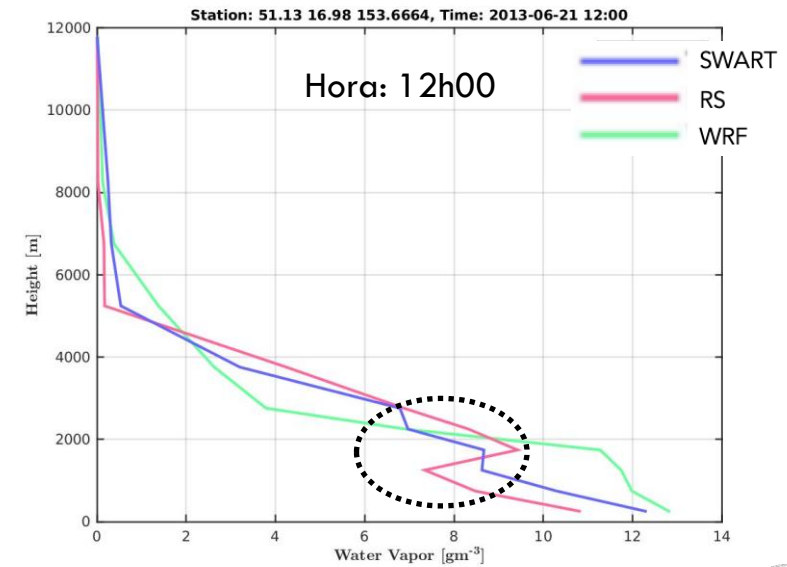
CdE II

Data: 2013-06-21
Hora: 00h00

Inicialização a cada 1h



Inicialização a cada 24h



X CONFERÊNCIA NACIONAL DE CARTOGRAFIA E GEODESIA

INFORMAÇÃO GEOESPACIAL PARA OS OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

02 – 03 NOV. INSTITUTO POLITÉCNICO DA GUARDA



ORDEM
DOS
ENGENHEIROS

CONCLUSÕES

- Os resultados dos estudos e testes realizados em comparação com outros sistemas tomográficos revelaram o SWART como uma técnica tomográfica confiável.
- O SWART é um sistema tomográfico para estimar o vapor de água atmosférico com capacidades para atuar em tempo real.
- Os diversos testes realizados enfatizam a importância de dados prévios para inicialização da tomografia com impactos nas soluções.
- Quando uma variabilidade acentuada é observada nos perfis da RS, e não prevista pelo WRF, o SWART é capaz de reproduzir tais variações.
- O GNSS revela ser uma tecnologia valiosa na previsão de fenómenos atmosféricos com destaque para os eventos extremos e de rápida evolução. Esta capacidade de monitorizar é muito relevante para a análise e compreensão de fenómenos atmosféricos.



X CONFERÊNCIA NACIONAL DE CARTOGRAFIA E GEODESIA

INFORMAÇÃO GEOESPACIAL PARA OS OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

02 – 03 NOV. INSTITUTO POLITÉCNICO DA GUARDA



ORDEM
DOS
ENGENHEIROS



FIM!

Agradeço a vossa atenção.