

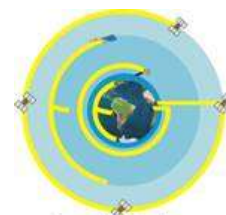
MODELOS ESTOCÁSTICOS E SÉRIES TEMPORAIS DE COORDENADAS

Doutoranda: Heloísa Alves da Silva

Orientador: Prof. Dr. João Francisco Galera Monico



Programa de Pós-Graduação
em Ciências Cartográficas



Grupo de Estudos em
Geodésia Espacial

TÓPICOS

- Introdução
- Cintilação ionosférica
- Modelagem estocástica no processamento de dados GNSS
- Séries temporais de coordenadas
- Resultados
- Conclusões e considerações finais

INTRODUÇÃO

- Posicionamento GNSS - Técnica mais utilizada nos levantamentos geodésicos e topográficos
- Posicionamento tenha uma alta acurácia (ordem milimétrica)
 - Modelo funcional e estocástico devem ser bem estabelecidos no ajustamento dos dados GNSS
 - Modelo funcional:
 - Descreve as propriedades determinísticas da realidade física.
 - Bem estabelecido por diversos autores (TEUNISSEN; KLEUSBERGER, 1998; LEICK, 2004; MONICO, 2008, entre outros)
 - Modelo estocástico:
 - Descreve as propriedades estocásticas na forma da MVC.
 - Maior complexidade – tema de diversas pesquisas (CONKER et al., 2002; AQUINO et al., 2009; SILVA, 2009; SILVA et al., 2010; AMIRI-SIMKOOEI; TIBERIUS; TEUNISSEN, 2008)

INTRODUÇÃO

- Processamento de dados GNSS – MMQ
 - Assume-se que as precisões das observações são iguais e estatisticamente independentes;
 - Modelos estocásticos não realísticos;
 - Precisões otimistas ao final do processamento.
- Implementação de modelagem estocástica mais adequada
 - Variação dos ângulos de elevação dos satélites
 - Efeitos de cintilação ionosférica

INTRODUÇÃO

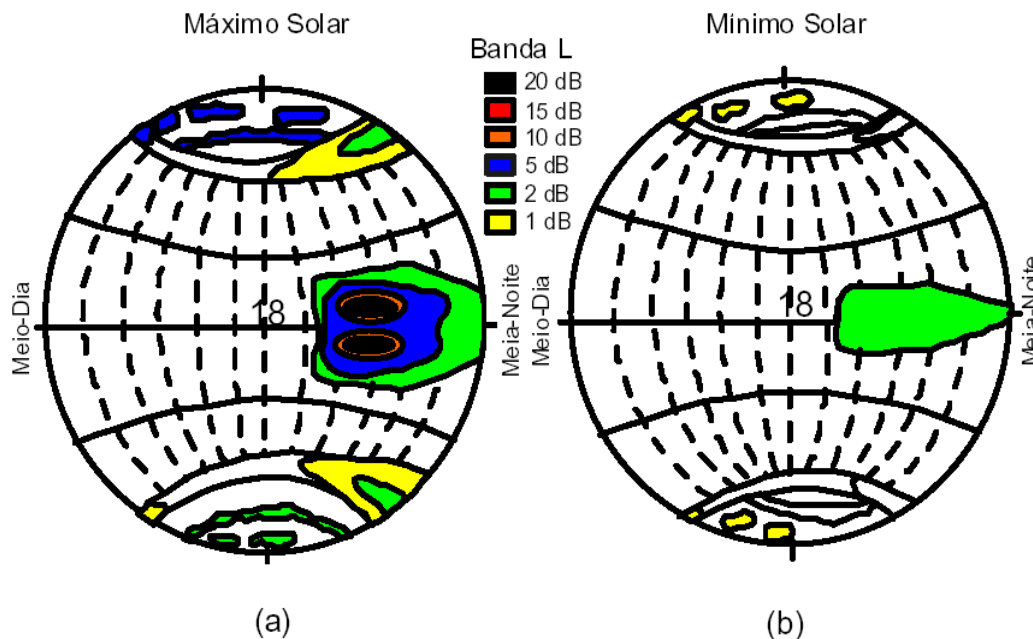
- Mesmo que a modelagem estocástica das observações seja a mais adequada possível, ainda podem restar alguns efeitos, os quais não foram modelados adequadamente e ficarão inclusos nas séries temporais das coordenadas GNSS.
- A caracterização desses ruídos pode ser baseada nas componentes das séries temporais:
 - *White noise, flicker noise e/ou random walk.*

INTRODUÇÃO

- Determinação dessas componentes pode-se utilizar diversos métodos:
 - Análise de potência espectral;
 - Método de *Allan variance* (GAMBIS, 2002);
 - MMQ (Método dos Mínimos Quadrados) (AMIRI-SIMKOOEI; TIBERIUS; TEUNISSEN, 2008).
- Nesse trabalho serão apresentados:
 - Modelos estocásticos relacionados ao processamento de dados GNSS;
 - Conceitos relacionados às séries temporais com aplicação nas séries de coordenadas GNSS;
 - Algumas metodologias envolvidas na caracterização dos ruídos nas séries temporais de coordenadas GNSS;
 - Resultados preliminares.

CINTILAÇÃO IONOSFÉRICA

- As cintilações ionosféricas ocorrem devido a pequenas irregularidades na camada da ionosfera provocando variações de amplitude, de fase, de polarização e no ângulo do sinal GNSS (DAVIES, 1990; CONKER et al., 2002).



São mais fortes:

- Regiões equatoriais
- Regiões de altas latitudes
- Regiões polares

CINTILAÇÃO IONOSFÉRICA

- Nas regiões equatoriais - relacionadas à anomalia equatorial
 - Bolhas ionosféricas são formadas nesta região logo após o pôr-do-sol. Pequenas irregularidades nessas bolhas são formadas, tornando-se uma fonte de intensa cintilação.
- A magnitude e a frequência das cintilações são correlacionadas com o ciclo solar
- Projeto CIGALA/CALIBRA
- Classificação da cintilação ionosférica (TIWARI et al., 2011):
 - Índice de amplitude (S4)

Forte cintilação	$S4 \geq 1,0$
Moderada cintilação	$0,5 \leq S4 \leq 1,0$
Fraca cintilação	$S4 \leq 0,5$

MODELAGEM ESTOCÁSTICA NO PROCESSAMENTO DE DADOS GNSS

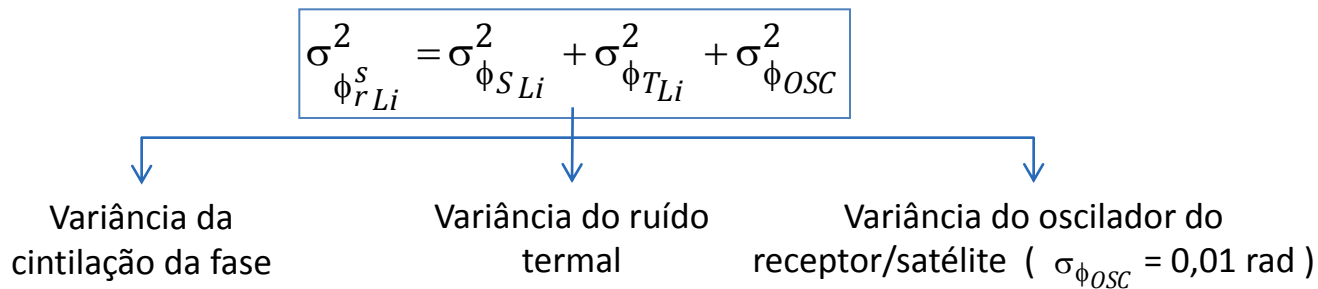
- Modelo estocástico de diferentes precisões

$$\Sigma_{\phi_r^s} = \begin{bmatrix} \sigma_{\phi_1^{s_i}}^2 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\phi_2^{s_i}}^2 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\phi_1^{s_{i+1}}}^2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{\phi_2^{s_{i+1}}}^2 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \sigma_{\phi_1^{s_n}}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \sigma_{\phi_2^{s_n}}^2 \end{bmatrix}$$

MODELAGEM ESTOCÁSTICA NO PROCESSAMENTO DE DADOS GNSS

Modelo em função da cintilação ionosférica:

- Extração de parâmetros da cintilação ionosférica;
- Baseado nos modelos de Conker et al. (2002).



$$\sigma_{\phi_{TL1}}^2 = \frac{B_{nL1} \left[1 + \frac{1}{2\eta(c/n_0)_{L1-CA}(1-2S_4^2(L1))} \right]}{(c/n_0)_{L1-CA}(1-2S_4^2(L1))}$$

Onde:

B_n – largura de banda do PLL de L1 de terceira ordem igual a 10 Hz;

$(c/n_0)_{L1-CA}$ – forma fracionária da densidade da razão sinal-ruído, sendo igual a $10^{0,1(C/N_0)_{L1-CA}}$

η – tempo de integração de pré-deteção, sendo igual a 0,02 s para GPS e 0,002 para WAAS (*Wide Area Augmentation System*);

Essa equação é válida desde que $S_4^2(L1) < 0,707$.

MODELAGEM ESTOCÁSTICA NO PROCESSAMENTO DE DADOS GNSS

- Modelo em função da cintilação ionosférica:
 - Extração de parâmetros da cintilação ionosférica;
 - Baseado nos modelos de Conker et al. (2002).

$$\sigma_{\phi_S}^2 = \frac{\pi T}{k f_n^{p-1} \operatorname{sen}\left(\frac{[2k+1-p]\pi}{2k}\right)}$$

Onde:

T – potência espectral a 1 Hz;

p – inclinação da PSD (*power spectral density*) para $f \gg f_0$, sendo f_0 a frequência correspondente a máxima dimensão da irregularidade na ionosfera;

k – ordem do *loop* (1, 2 ou 3);

f_n – frequência natural do *loop* em Hz.

Essa equação é válida desde que $2k-p > 0$ e $p > 1$.

SÉRIES TEMPORAIS DE COORDENADAS GNSS

- Uma série temporal, com observações $\{Z_t, t=1, \dots, N\}$, pode ser decomposta como:

$$Z_t = T_t + S_t + a_t$$

- Tendências e sazonalidades: podem ser obtidas, a partir do ajuste de funções lineares, quadráticas, exponenciais ou trigonométricas (estimativa a partir do MMQ)
- Uma forma de analisar uma série temporal é escrevê-la na forma de um sinal e um ruído:

$$Z_t = F(t) + a_t \quad \text{com } t = 1, \dots, N$$

White noise

$$S_w(f) = \Phi_0$$

Flicker noise

$$S_f(f) = \frac{N_f}{f}$$

Random walk noise

$$S_r(f) = \frac{N_r}{f^2}$$

SÉRIES TEMPORAIS DE COORDENADAS GNSS

- Caracterização dos ruídos - Allan variance

- A expressão exata para AVAR é rigorosamente dada para um conjunto de dados infinito. Entretanto, o conjunto de dados é praticamente finito e a AVAR pode ser expressa por:

$$\sigma_y^2(\tau) = \left\langle \sigma_y^2(N, T, \tau) \right\rangle = \frac{1}{N} \frac{\sum_{t=1}^N (y_{i+1} - y_i)^2}{2}$$

Onde:

y_i – valor médio;

N – número de dados;

T – intervalo amostral;

τ – intervalo da média;

$\langle \rangle$ – representam o valor esperado.

- Gráfico da AVAR é normalmente construído numa escala log-log.

Tipo de ruído	Ângulo de inclinação do gráfico de log-log da potência espectral (α)	Ângulo de inclinação do gráfico de log-log do Allan variance ($(-\alpha - 1)/2$)
Random Walk	-2	0,5
Flicker	-1	0
White Noise	0	-0,5
Super Flicker	1	-1
Super White	2	-1,5

SÉRIES TEMPORAIS DE COORDENADAS GNSS

- Caracterização dos ruídos – MMQ (AMIRI-SIMKOOEI; TIBERIUS; TEUNISSEN, 2008)

- Modelo funcional da série temporal

$$E\{y(t)\} = y_0 + rt + \sum_{k=1}^q a_k \cos(\omega_k t) + b_k \sin(\omega_k t)$$

onde, y_0 , r , a_k e b_k são desconhecidos (incógnitas).

- A solução é dada a partir do MMQ

$$E\{\underline{y}\} = A\underline{x} + \sum_{k=1}^q A_k x_k$$
$$D\{\underline{y}\} = \Sigma_y$$

- Porém, ω_k também é desconhecida e nesse caso tem-se que encontrar um conjunto de frequências $\omega_1, \dots, \omega_q$, conseqüentemente a matriz design A_k e em particular o valor de q (estimação harmônica pelo MMQ)

SÉRIES TEMPORAIS DE COORDENADAS GNSS

- Caracterização dos ruídos – MMQ (AMIRI-SIMKOOEI; TIBERIUS; TEUNISSEN, 2008)
 - Modelo estocástico da série temporal

$$\Sigma_y = \sigma_w^2 I + \sigma_f^2 Q_f + \sigma_{rw}^2 Q_{rw}$$

onde, Q_f e Q_{rw} são as matrizes cofatoras de flicker noise e random walk.

- Os elementos de Q_f podem ser dados por:
- A matriz Q_{rw} é dada por (dados igualmente espaçados):

$$q_{ij}^{(f)} = \begin{cases} \frac{9}{8} & \text{se } \tau = 0 \\ \frac{9}{8} \left(1 - \frac{\log \tau}{\log 2} + 2 \right) & \text{se } \tau \neq 0 \end{cases}$$

$$Q_{rw} = f_s^{-1} \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 2 & \dots & 2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 2 & \dots & m \end{bmatrix}$$

$$f_s = \frac{m-1}{T}$$

- Estimação das componentes σ_w^2 , σ_f^2 e σ_{rw}^2 pelo MMQ
 - Modelo estocástico apropriado – teste estatístico de hipóteses

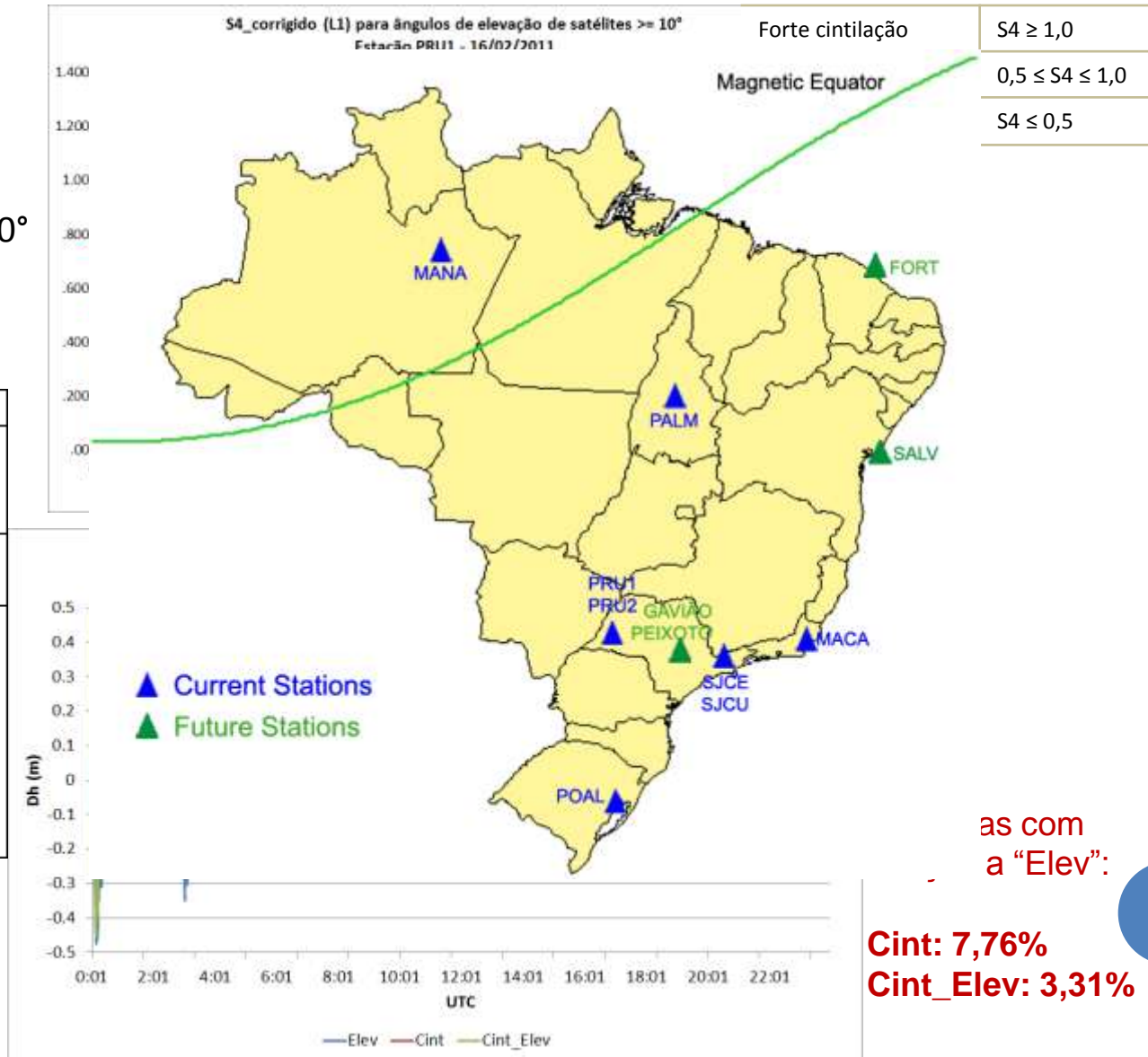
RESULTADOS

→ MODELAGEM ESTOCÁSTICA NO PROCESSAMENTO DE DADOS GNSS

PPP_RT
(Marques, 2012)

- Máscara de elevação= 10°
- Combinação ion-free
- Estimativa da troposfera

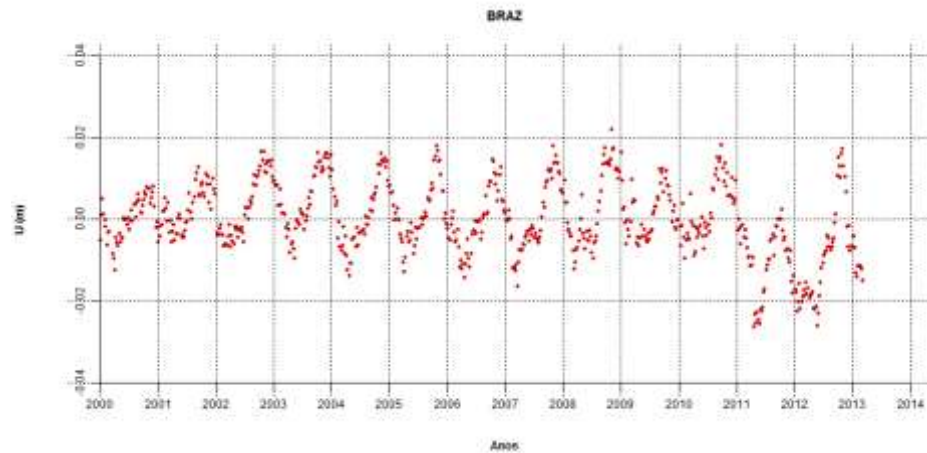
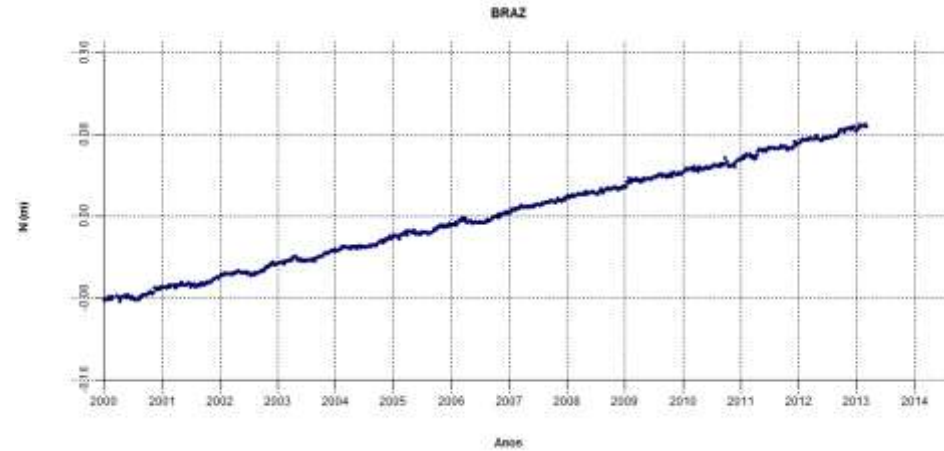
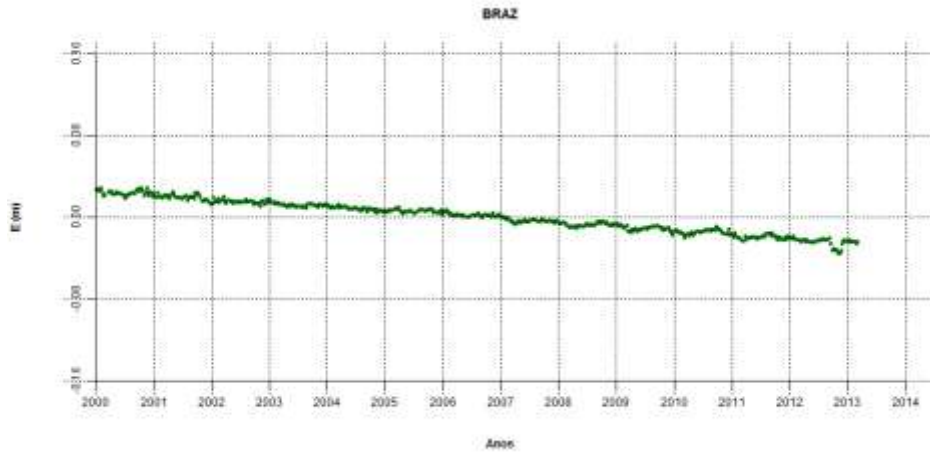
Mod_Elevação
$\sigma^2 = \sigma_{obs}^2 \cdot \left(\frac{1}{\sin(elev)} \right)$
<i>obs = C1, P2, L1 ou L2</i>
<i>elev = ângulo de elevação do satélite</i>
$\sigma_{C1}^2 = (0.8 \text{ m})^2$
$\sigma_{P2}^2 = (1.0 \text{ m})^2$
$\sigma_{L1}^2 = (0.008 \text{ m})^2$
$\sigma_{L2}^2 = (0.010 \text{ m})^2$



as com
a "Elev":
Cint: 7,76%
Cint_Elev: 3,31%

RESULTADOS

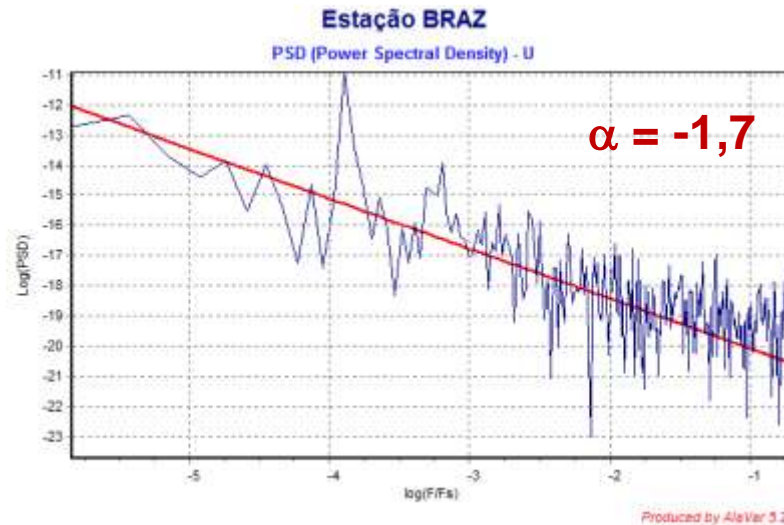
→ ANÁLISE DE SÉRIES TEMPORAIS DE COORDENADAS GNSS



RESULTADOS

→ ANÁLISE DE SÉRIES TEMPORAIS DE COORDENADAS GNSS

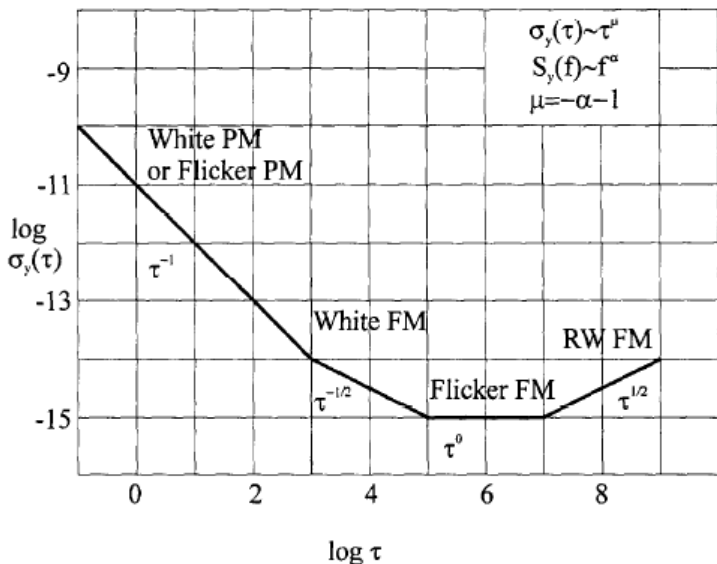
Tipo de ruído	Ângulo de inclinação do gráfico de log-log da potência espectral (α)
Random Walk	-2
Flicker	-1
White Noise	0
Super Flicker	1
Super White	2



RESULTADOS

→ ANÁLISE DE SÉRIES TEMPORAIS DE COORDENADAS GNSS

Sigma Tau Diagram



Produced by AltiVar 5.2



Produced by AltiVar 5.2



Produced by AltiVar 5.2

CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

- Modelagem estocástica no processamento de dado GNSS
 - Três tipos de experimentos:
 - Modelagem considerando somente os ângulos dos satélites
 - Modelagem considerando somente os efeitos de cintilação ionosférica
 - Modelagem considerando considerando os efeitos de cintilação e os ângulos de elevação quando $S4 > 0,707$ (L1)

CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

- Modelagem estocástica no processamento de dado GNSS
 - Tanto o segundo quanto o terceiro experimento obtivemos melhorias (7,7 % e 3,3 %, respectivamente)
 - Mais análises devem ser realizadas
 - Haja vista que no primeiro caso, os satélites que tiverem S4 maior que o limiar não são utilizados no processamento...geometria dos satélites...
 - No segundo experimento o satélite é mantido mas é realizada uma ponderação em função do ângulo de elevação. Verificou-se uma pequena melhoria em relação ao utilizar somente a modelagem em função do ângulo de elevação.
- Outras estações da rede Cigala/Calibra – efeitos de cintilação ionosférica na região equatorial (Tese)

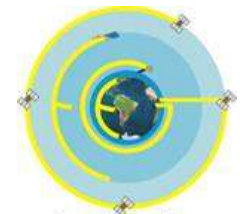
CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

- Análise de séries temporais
 - Caracterização dos ruídos através da variância de Allan
 - PSD: random walk
 - AVAR:
 - E e N: random walk e flicker noise
 - U: white noise, flicker noise e random walk
- Caracterização dos ruídos pelo MMQ e outras temas relacionados a análise das séries temporais de coordenadas GNSS (Tese)

AGRADECIMENTOS



Programa de Pós-Graduação
em Ciências Cartográficas



Grupo de Estudos em
Geodésia Espacial



OBRIGADA PELA ATENÇÃO!