

**DESENVOLVIMENTO DE INTERFACE GRÁFICA AMIGÁVEL  
PARA VALIDAÇÃO DE DADOS MAGNETOTELÚRICOS A  
PARTIR DO PROCESSAMENTO RHO+**

**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA  
(PIBIC/INPE/CNPq)**

Karolinne Santos Lima (Universidade de São Paulo, Bolsista PIBIC/CNPq)

E-mail: karolinne.lima@usp.br

Antonio Lopes Padilha (LAC/CTE/INPE, Orientador)

E-mail: antonio.padilha@inpe.br

Mauricio de Souza Bologna (IAG/USP, Co-orientador)

E-mail: mbologna@usp.br

Julho de 2019



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

DESENVOLVIMENTO DE INTERFACE GRÁFICA AMIGÁVEL  
PARA VALIDAÇÃO DE DADOS MAGNETOTELÚRICOS A PARTIR  
DO PROCESSAMENTO RHO+

Karolinne Santos Lima

Iniciação Científica do Curso de  
Graduação em Geofísica, orientada  
pelo Dr. Antonio Lopes Padilha e  
coorientada pelo Dr. Mauricio de  
Souza Bologna.

INPE  
São José dos Campos  
2019



# SUMÁRIO

	<b><u>Pág.</u></b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	iii
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....</b>	iv
<b>RESUMO.....</b>	v
<b>1 – INTRODUÇÃO.....</b>	01
<b>2 – OBJETIVOS.....</b>	02
2.1 Objetivos específicos.....	02
<b>3 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	03
3.1 Princípios do método MT.....	03
<b>4 – ÁREA DE ESTUDO.....</b>	07
4.1 Estudo da Bacia do Paraná.....	08
<b>5 – Processamento de dados MT.....</b>	14
5.1 Códigos usados.....	14
<b>6 – CONSISTÊNCIA DOS DADOS.....</b>	17
<b>7 – DIFICULDADES ENCONTRADAS.....</b>	19
<b>8 – ANÁLISES E RESULTADOS.....</b>	20
<b>9 – CONCLUSÕES.....</b>	21
<b>ANEXOS.....</b>	23
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	30

## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1 Perfil MT contendo 5 estações banda larga, a linha verde é o limite leste da Bacia do Paraná.....	07
2 Diferentes modelos de embasamento da Bacia do Paraná. Os triângulos são as estações sísmicas usadas no trabalho de Juliá et al. (2008). (a) Núcleo cratônico proposto por Cordani et al. (1984) a partir dos poços (quadrados pretos); (b) núcleos amalgamados propostos por Milani (1997) e Milani e Ramos (1998). O círculo preto é a localização do basalto Três-Lagoas; (c) bloco Paranapanema, proposto por Mantovani et al. (2005).....	09
3 Fatias horizontais do modelo de velocidade S obtido a 100 km. Os domínios tracejados indicam as províncias geocronológicas do cráton amazônico, onde "A" é equivalente a CAP (domínio mais antigo), "B" a MIP, "C" a VTP e "D" para RNJP (domínio mais jovem). O RSIP e o SP são muito pequenos para serem mostrados aqui. TBL denota o lineamento Transbrasiliano. A linha branca é onde está localizada as 5 estações (snb's).....	10
4 Fatias do modelo de densidade estimado para a área de estudo em diferentes profundidades. A-A', B-B' e C-C' são perfis de onde seções transversais verticais. FC: Condutor fóssil (hexágono verde) mapeado por VanDecar et al e onde estão as estações estudadas. (1995). Linhas grossas brancas são os contornos das províncias tectônicas. Para o nome completo das províncias tectônicas e ígneas. A linha verde é o limite do PMP. Círculos amarelos e verdes são os locais das intrusões alcalinas do GAP e APAP respectivamente. Círculo vermelho são as amostras de xenólitos.....	11
5 Comparação Fatias do modelo de velocidade a partir da inversão dos tempos de percurso de atraso da onda P. A-A', B-B' e C-C' são perfis de onde seções transversais verticais. FC: Condutor fóssil (hexágono verde) mapeado por	

VanDecar et al e onde estão as estações estudadas. (1995). Linhas grossas brancas são os contornos das províncias tectônicas. Para o nome completo das províncias tectônicas e ígneas. A linha verde é o limite do PMP. Triângulos amarelos são as estações sísmicas. Círculos amarelos e verdes são as intrusões alcalinas do GAP e APAP. Círculos vermelhos são as amostras de xenólitos.....	12
6 Gráfico de Resistividade Aparente por Períodos da estação snb027.....	15
7 Melhor curva sem sobreposição da estação snb027.....	16
8 Resultado da aplicação do RHOPPLUS nos dados da estação snb027a. A linha preta contínua é a estimativa da interpolação. A linha tracejada é o limite de confiança. Os círculos são os dados experimentais, sendo o preenchido os considerados e os não preenchidos os não considerados.....	18
9 Resultado da aplicação do RHOPPLUS nos dados da estação snb029a, onde as curvas calculadas e a original não se encontram claramente consistentes no final da banda D, a partir de 10s.....	18

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

MT – Magnetotelúricos

EM – Eletromagnético

TE – Transverso elétrico

TM – Transverso magnético

1D – Uma dimensão

2D – Duas dimensões

3D – Três dimensões

E – Elétrico

H – Magnético

## RESUMO

Este trabalho iniciado em março de 2019 teve como objetivo inicial desenvolver um código computacional baseado na linguagem Python, para selecionar graficamente dados de entrada e saída do código computacional Rhoplus. Com isto, esperava-se diminuir o tempo de processamento antes da inversão das respostas magnetotelúricas (resistividades aparentes e fases da impedância), pois atualmente esse processo é executado via terminal Shell. A qualidade de dados magnetotelúricos é, frequentemente, degradada por ruído eletromagnético cultural e pela banda morta do sinal natural. Aqui, o processamento Rhoplus, foi utilizado para interpolar trechos ruidosos de curvas magnetotelúricas de cinco estações de banda larga localizadas no Estado de São Paulo, na parte norte da Bacia do Paraná. Apesar de diversas tentativas, não foi possível implementar o código de seleção. Ao longo deste relatório reporto as dificuldades encontradas e as atividades e as atividades complementares que foram realizadas entre os meses de Março e Julho. Na etapa pós-processamento das séries temporais verifiquei a consistência dos dados com base na relação de dispersão em cada estação utilizando o Rhoplus. Um fato importante é que a consistência dos dados em geral não é obedecida para períodos acima de 10 segundos. Este fato complica a análise da estrutura de resistividade do embasamento da bacia, pois períodos longos trazem informações profundas. As dificuldades encontradas ao fazer esta comunicação entre o Rhoplus e o Python se deram ao fato de não conseguir compreender os scripts do arquivo .awk, extrair o conteúdo file do arquivo .awk e chamar este arquivo no Python.

## 1 – INTRODUÇÃO

O processamento de dados magnetotelúricos é realizado todo no terminal Shell. Tentando melhorar o acervo de *softwares* para este processamento, pensou-se em desenvolver uma aplicação que amplie as funcionalidades do já consolidado programa de modelagem 1D Rhoplus (PARKER; BOOKER, 1996). A aplicação busca a comunicação entre o programa Rhoplus e objetos nativos em Python

Para isso era necessário escolher as estações que seriam interessantes para aprofundar os estudos.

Este relatório apresenta os resultados de processamento usando o código robusto EMTF (Egbert, 1997), verificando a consistência dos dados através do Rhoplus de cinco estações localizadas na Bacia do Paraná.

## **2 – OBJETIVOS**

Os objetivos deste trabalho é escolher as melhores estações para futuramente desenvolver o programa que busca a comunicação entre o programa Rhoplus e objeto em Python. Possibilitando o processamento Rhoplus sem a necessidade de manipulação via terminal Shell.

### **2.1 Objetivos Específicos**

Os objetivos específicos relativos a esse trabalho foram:

- Escolher as cinco estações MT reais, com caráter geológico, que seriam interessantes para estudar;
- Processar as estações escolhidas utilizando o Rhoplus no terminal Shell.

### **3 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

#### **3.1 Princípios do método MT**

O método MT é uma técnica eletromagnética passiva utilizada para estimar a distribuição de condutividade elétrica do interior da Terra. Esta condutividade elétrica é determinada a partir da relação entre as componentes ortogonais do campo eletromagnético.

A fonte primária de sinais MT é o campo geomagnético externo cujas variações temporais induzem correntes elétricas em subsuperfície (correntes telúricas). Medidas simultâneas das variações temporais do campo eletromagnético total, efetuadas na superfície terrestre, constituem a base do método MT.

A penetração do sinal no interior terrestre depende do seu período de oscilação e da condutividade do meio. O uso de sinais naturais permite uma ampla faixa de investigação, desde dezenas de metros até dezenas de quilômetros de profundidade.

A seguir, descrevo resumidamente os aspectos teóricos do método com base no texto de Simpson & Bahr (2005).

Para o método MT é fundamental considerar as suas premissas e principais simplificações. A primeira é que os campos eletromagnéticos obedecem às equações de Maxwell. A segunda é que todo campo pode ser tratado como conservativo quando longe de suas fontes. Os campos gerados na ionosfera, ou seja, a grandes distâncias, são considerados como ondas planas e uniformes, e se propagam verticalmente no interior da Terra. A Terra não gera energia eletromagnética, somente dissipa ou absorve, comportando-se como um condutor ôhmico. Outra premissa importante na simplificação das equações do método é que as correntes de deslocamento são desprezadas em relação às correntes de condução.

A resistividade elétrica no interior da Terra tem uma ampla variação, o que torna as medidas MT muito sensíveis a anomalias. Como a condutividade da matriz das rochas é muito baixa, por conta dos silicatos que são maus condutores elétricos, a condutividade da rocha depende das componentes minoritárias interconectadas das rochas, tais como

fluidos salinos intersticiais, minerais altamente condutores como grafita e sulfetos, fusões parciais e voláteis (Jones, 1992).

Em meios homogêneos, em meios 1D, cuja variação de resistividade é apenas na direção vertical, ou em meios 2D, onde um dos eixos de medida está alinhado ao azimute (*strike*) geoeletrico, os campos EM são ortogonais e a impedância complexa  $Z$  pode ser descrita pela Equação (2.1):

$$Z_{xy}(\omega) = \frac{E_x(\omega)}{H_y(\omega)} \quad (2.1)$$

onde  $E_x$  é o campo elétrico na direção  $x$  (em geral a direção norte-sul do campo magnético),  $H_y$  é o campo magnético na direção  $y$  (ortogonal a direção  $x$ ),  $Z_{xy}$  é a impedância complexa e  $\omega$  a frequência angular.

Porém em meios multidimensionais, a ortogonalidade entre os campos elétrico e magnético se desfaz, e impedância torna-se uma grandeza tensorial. O tensor de impedâncias contém os elementos  $Z_{xx}$ ,  $Z_{xy}$ ,  $Z_{yx}$ ,  $Z_{yy}$ , que se relacionam linearmente às componentes ortogonais dos campos eletromagnéticos  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $H_x$  e  $H_y$ , medidas na superfície da Terra.

A partir da impedância derivam-se as principais respostas MT, resistividade aparente  $\rho_a$  e fase  $\phi$ . Como a permeabilidade magnética das rochas varia muito pouco em comparação a resistividade elétrica, podemos aproximá-la a uma constante e igual à permeabilidade magnética no vácuo ( $\mu_0$ ).

$$\rho_{a,xy}(\omega) = \frac{1}{\omega\mu_0} (Z_{xy}(\omega))^2 \quad (2.2)$$

onde  $\omega$  é a frequência em radianos por segundo e  $\rho_a$  é em ohm.m.

A fase é dada por

$$\varphi_{xy}(\omega) = \arctan\left(\frac{\text{Im}(Z_{xy}(\omega))}{\text{Re}(Z_{xy}(\omega))}\right) \quad (2.3)$$

onde  $\phi$  é dada em graus.

A fase reflete variações da resistividade no meio. Para semi-espacos homogêneos o valor da fase é de  $45^\circ$  e a resistividade aparente é igual à resistividade do meio para todos os períodos. Para meios estratificados a fase assume valores entre  $0^\circ$  e  $90^\circ$ , a depender do contraste de resistividade. Quando há um aumento da resistividade em profundidade há um decréscimo da fase e o inverso ocorre quando há uma diminuição da resistividade. E, além disso, há um afastamento entre as componentes XY e YX das respostas MT quando as estruturas deixam de constituir uma situação unidimensional.

O tensor de impedância possui informações sobre a dimensionalidade e direção das estruturas geoeletricas. Para um meio 1D, os elementos da diagonal principal da matriz são nulos, enquanto os elementos da diagonal secundária são iguais em magnitude, porém com sinais contrários. Já em meios 2D, os elementos da diagonal principal da matriz continuam sendo nulos (desde que um dos eixos do sistema de coordenadas de medida, x ou y, esteja alinhado com o azimute geoeletrico), porém os elementos da diagonal secundária agora são diferentes. Assim, para meios 3D, todos os elementos da matriz diferem entre si, que é o caso mais comum na natureza, porém é o mais complexo e de difícil análise, sendo comum a aproximação para os casos 1D e 2D.

No caso de um modelo 2D em que as medidas são feitas no sistema de coordenadas do azimute geoeletrico (*strike*), o modo de propagação em que o campo elétrico é paralelo ao azimute é chamado de transversal elétrico (TE) e quando o campo elétrico é perpendicular ao *strike* é denominado transversal magnético (TM).

A propagação dos campos EM no interior da Terra é função da condutividade do meio e da frequência da onda incidente. Respostas EM de qualquer profundidade podem ser obtidas simplesmente por estender o período da sondagem MT. Esse princípio é incorporado na relação de profundidade pelicular. A uma profundidade  $\delta(T)$  os campos

EM são atenuados de  $e^{-1}$  (37%) da sua amplitude na superfície terrestre. Em estudos da Terra  $\mu$  é normalmente considerado o valor no vácuo, então temos aproximadamente:

$$\delta(T) \approx 500\sqrt{T\rho_a} \quad (2.5)$$

onde  $\delta(T)$  é a profundidade de investigação em metros em um dado período T e  $\rho_a$  é a resistividade aparente ou a média da resistividade de um semi-espaço homogêneo.

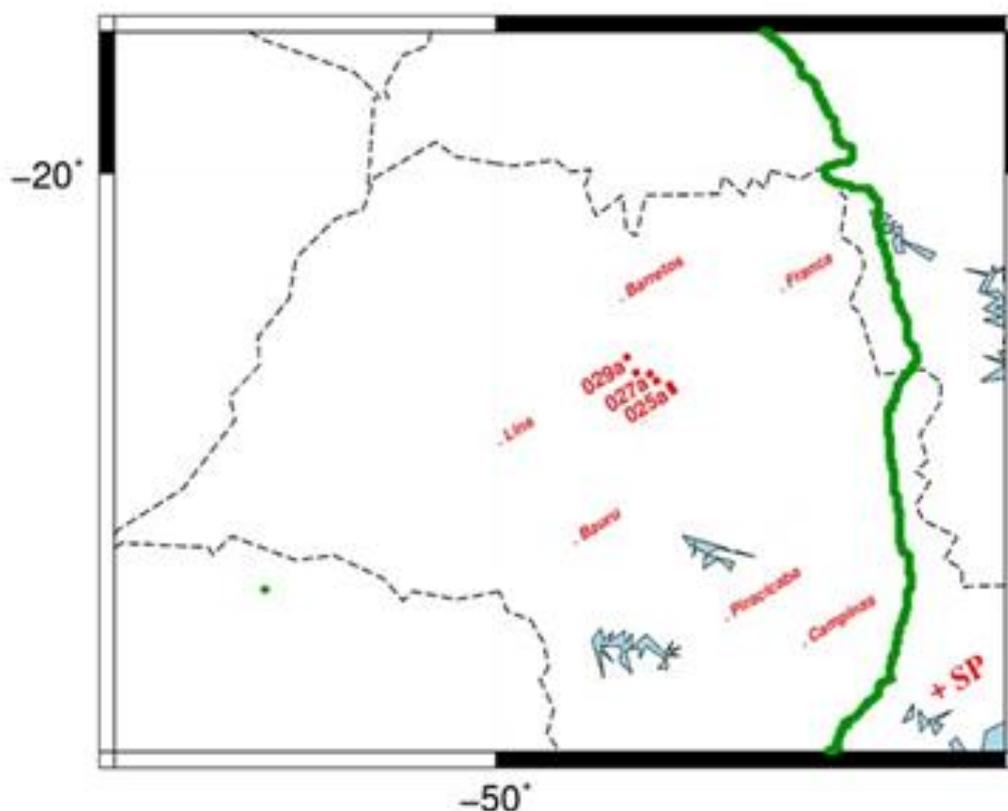
#### 4 – ÁREA DE ESTUDO

A Bacia do Paraná engloba parte do Brasil, Argentina, Paraguai e Uruguai, totalizando uma área de aproximadamente 1,5 milhão de km<sup>2</sup>. A bacia tem sido amplamente estudada com relação à geologia e geoquímica de suas rochas, mas ainda carece de informações mais detalhadas sobre as propriedades físicas de seu embasamento para que se possa avançar no conhecimento de sua origem e evolução.

O perfil das sondagens magnetotelúricas (MT) foi realizado na direção NW-SE. Está localizado no Estado de São Paulo, na borda leste da Bacia do Paraná. Na Figura 1 a linha verde representa o limite da Bacia do Paraná.

Composto por 5 estações MT banda larga separadas. Estas sondagens foram coletadas previamente pelo Grupo de Geomagnetismo do INPE.

Figura 1 – Perfil MT contendo 5 estações banda larga, a linha verde é o limite leste da Bacia do Paraná.



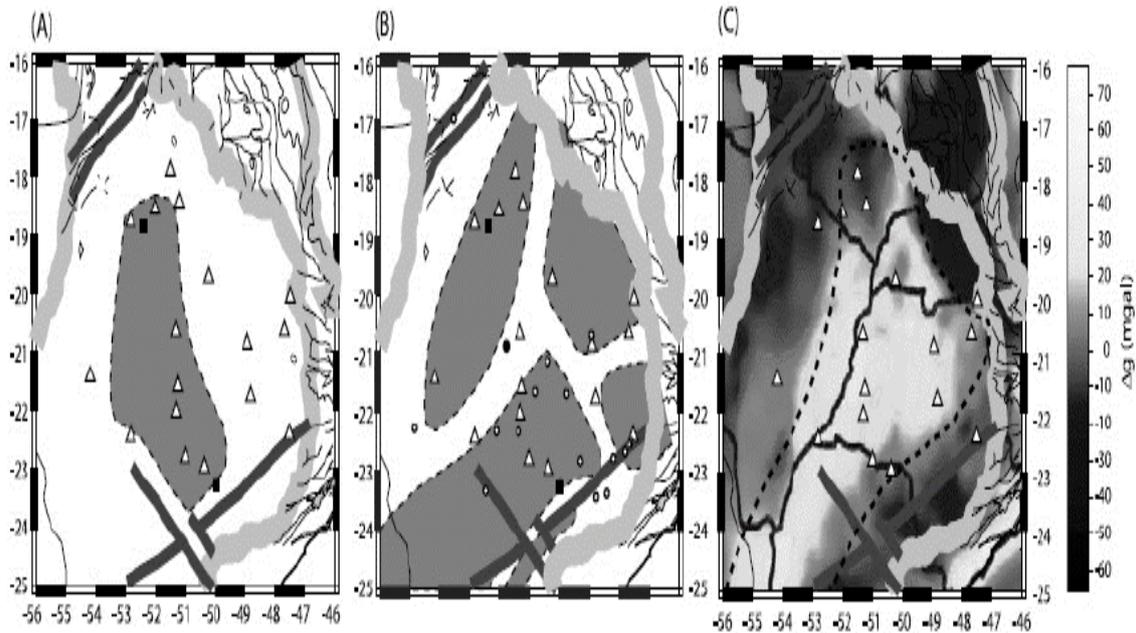
Fonte: Produção do autor.

#### 4.1 Estudos da Bacia do Paraná

O embasamento da Bacia do Paraná foi associado a um núcleo cratônico central por Cordani et al. (1984), como vemos na Fig. 2a, envolto por faixas móveis brasileiras, áreas de encurtamento e espessamento crustal litosférico, a partir de estudos geocronológicos (K-Ar e Rb-Sr) em testemunhos de poços perfurados pela Petrobras e Paulipetro. Este núcleo cratônico analisado como um poço a leste, onde tinha um argilito inalterado datado pelo método Rb-Sr em 900-1000 Ma, indicando uma crosta tectônica estável embaixo da camada sedimentar, e outro a oeste, onde tinha um anfibólio de idade pré-brasileira datada pelo método K-Ar em ~2,1 Ga. Dez anos depois, o embasamento da bacia foi sugerido por Milani (1997) e Milani e Ramos (1998) como diversos núcleos cratônicos que teriam sido amalgamados na formação do Gondwana, como podemos ver na Fig. 2b.

É difícil determinar a composição do embasamento devido a sua cobertura vulcano-sedimentar e porque faltam informações de poços profundos espalhados de maneira homogênea sobre toda a bacia. Em 2005 Mantovani et al. definiram seus limites através de dados gravimétricos e tomografia sísmica que sugeriam uma litosfera cratônica pela espessura (Snoko e James, 1997, Assumpção et al., 2002), o que recuperou a idéia do núcleo central. Na Fig. 2c vemos o bloco Paranapanema que seria como uma área de anomalia Bouguer residual positiva. Depois, Juliá et al. (2008), usou uma técnica da função do receptor numa rede de estações sísmicas no norte da Bacia do Paraná (triângulos na Fig. 2), propuseram que havia *underplatings* máficos preferencialmente ao longo das zonas de sutura entre os blocos cratônicos propostos por Milani (1997) e Milani e Ramos (1998).

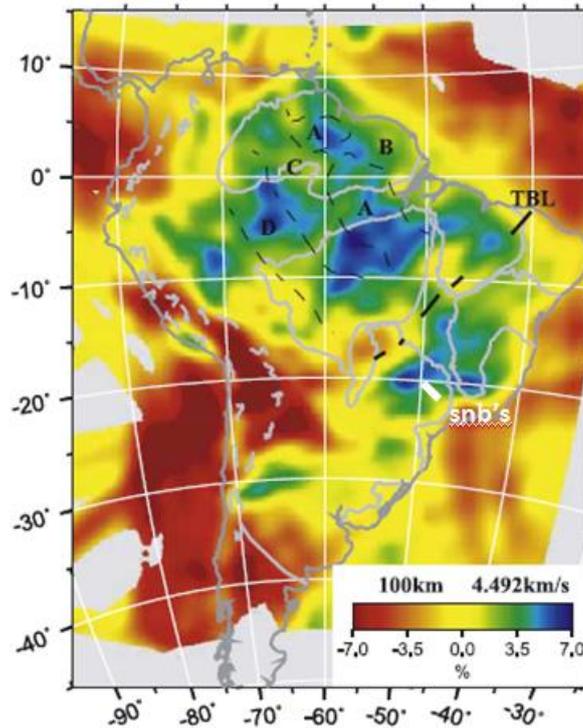
Figura 2 – Diferentes modelos de embasamento da Bacia do Paraná. Os triângulos são as estações sísmicas usadas no trabalho de Juliá et al. (2008). (a) Núcleo cratônico proposto por Cordani et al. (1984) a partir dos poços (quadrados pretos); (b) núcleos amalgamados propostos por Milani (1997) e Milani e Ramos (1998). O círculo preto é a localização do basalto Três-Lagoas; (c) bloco Paranapanema, proposto por Mantovani et al. (2005).



Fonte: Adaptada de Juliá et al. (2008).

A crosta é mais espessa nas anomalias de alta velocidade de propagação de ondas sísmicas (Feng et al., 2007), as cinco estações estudadas neste trabalho têm aproximadamente 3,5% de 4.492 km/s como observamos na Fig. 3, o que pode ser considerado como uma alta velocidade de onda S.

Figura 3 - Fatias horizontais do modelo de velocidade S obtido a 100 km. Os domínios tracejados indicam as províncias geocronológicas do cráton amazônico, onde "A" é equivalente a CAP (domínio mais antigo), "B" a MIP, "C" a VTP e "D" para RNJP (domínio mais jovem). O RSIP e o SP são muito pequenos para serem mostrados aqui. TBL denota o lineamento Transbrasiliano. A linha branca é onde estão localizadas as 5 estações (snb's).



Fonte: Adaptada de Feng et al. (2007)

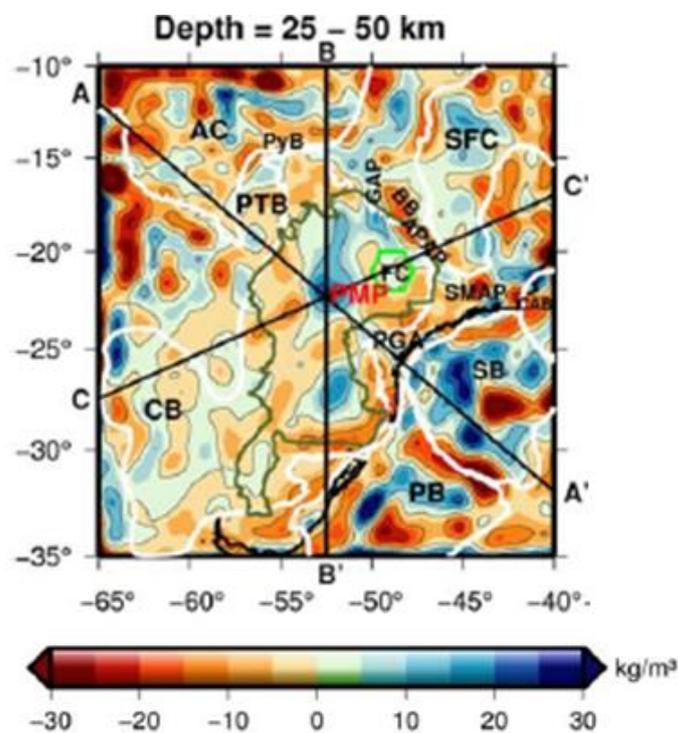
As siglas da Fig. 3 significam: CAP indica a Província da Amazônia Central, com mais de 2.3 Ga; MIP é a província de Maroni-Itacaiúnas, 2.2-1.95 Ga; VTP é a província do Ventuari-Tapajo, com 1.95 a 1.8 Ga; RNJP é a província de Rio Negro - Juruena, 1.8-1.55 Ga; RSIP é a província de Rondônia – San Ignácio, 1.5–1.3 Ga; e SP é a província de Sunsa, 1.25-1.00 Ga.

A bacia do Paraná parece estar sustentada por altas velocidades de 100 km (Figura 3). Analisando as datas radiométricas de duas amostras do embasamento e a geometria das faixas envolventes, um núcleo proterozóico "cratônico" foi deduzido abaixo da bacia do Paraná (Cordani et al., 1984). Depois, Milani e Ramos (1998) mostraram evidências de uma zona rifte na bacia bem como atividade ígnea precoce que não são condizentes com

um núcleo cratônico totalmente estável. Se houve algum episódio de rift durante a evolução da bacia isto não afetou a litosfera espessa em uma escala regional que tomografia de ondas de superfície pudesse detectar e a rigidez flexural litosférica na bacia do Paraná parece ser tão alta quanto nas áreas cratônicas.

Chaves et al. (2016) combinaram um modelo de densidades e perturbação na velocidade de propagação de ondas P. As cinco estações estudadas estão localizadas no hexágono verde, que é o local onde de um condutor fóssil, neste local a densidade é alta, como observamos na Fig. 4 e velocidade da onda P de -0,5%, que podemos considerar como baixa e vemos na Fig. 5.

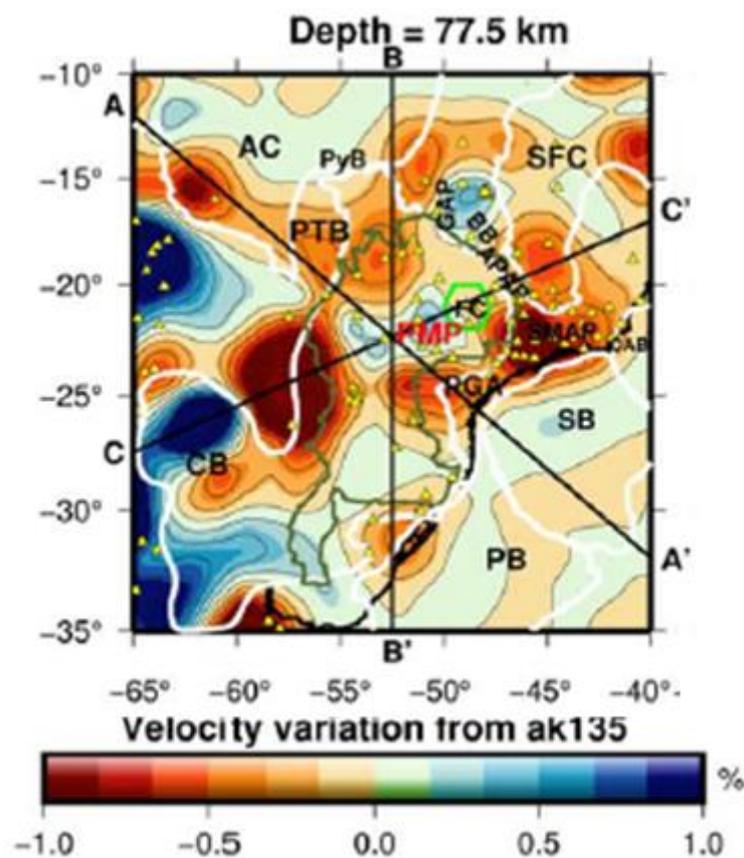
Figura 4 - Fatias do modelo de densidade estimado para a área de estudo em diferentes profundidades. A-A', B-B' e C-C' são perfis de onde seções transversais verticais. FC: Condutor fóssil (hexágono verde) mapeado por VanDecar et al e onde estão as estações estudadas. (1995). Linhas grossas brancas são os contornos das províncias tectônicas. Para o nome completo das províncias tectônicas e ígneas. A linha verde é o limite do PMP. Círculos amarelos e verdes são os locais das intrusões alcalinas do GAP e APAP, respectivamente. Círculo vermelho são as amostras de xenólitos.



Fonte: Chaves et al. (2016)

Anomalias de alta densidade de aproximadamente  $15 \text{ kg/m}^3$  estão presentes entre 20 e 50 km profundidade, o que pode indicar uma região cratônica.

Figura 5 - Fatias do modelo de velocidade a partir da inversão dos tempos de percurso de atraso da onda P. A-A', B-B' e C-C' são perfis de onde seções transversais verticais. FC: Condutor fóssil (hexágono verde) mapeado por VanDecar et al e onde estão as estações estudadas. (1995). Linhas grossas brancas são os contornos das províncias tectônicas. Para o nome completo das províncias tectônicas e ígneas. A linha verde é o limite do PMP. Triângulos amarelos são as estações sísmicas. Círculos amarelos e verdes são as intrusões alcalinas do GAP e APAP. Círculos vermelhos são as amostras de xenólitos.



Fonte: Chaves et al. (2016)

Observamos perturbações de baixa velocidade que é persistentes ao longo das bordas do PMP até 400 km de profundidade, englobando o FC, isto ocorre porque a onda P se desloca em meio líquido, numa região cratônica não há quase presença de fluidos.

A área da Fig. 4 e Fig. 5 engloba o cráton de São Francisco (SFC), cráton Amazônico (AC), bacia do Chaco-Paraná (CB), bacia de Pelotas (PB), bacia de Santos (SB), bacia de Campos (CAB), bacia do Pantanal (PTB), cinturão do Paraguai (PyB), cinturão Brasília (BB), Província Alcalina do Alto Paraná (APAP), Província de Alcalino (GAP), Província Alcalina da Serra do Mar (SMAP) e Arco de Ponta Grossa (PGA). O mapa sobreposto da região do Atlântico Sul mostra os locais de (contorno vermelho) a Província Magmática do Paraná (PMP), Rio Grande Rise (RGR), Walvis Ridge (WR), Província Magmática de Etendeka (EMP), (linha verde) Cume Meio Atlântico.

O Condutor fóssil (FC) foi descoberto por um estudo telesísmico que revelou a presença de uma pluma fóssil no manto superior profundo abaixo do Brasil, que ao que parece ficou geograficamente fixo em relação ao continente. Isto implica que o manto superior e a litosfera sob a América do Sul ficaram acoplados desde o colapso de Gondwanaland.

## 5 – PROCESSAMENTO DE DADOS MT

### 5.1 Códigos usados

Os dados MT deste trabalho foram processados usando o código robusto de Gary Egbert (Egbert, 1997), que é subdividido em duas sub-rotinas principais.

A primeira delas é a DNFF, que calculam os espectros do campo elétrico (E) e magnético (H) dividindo cada série temporal em diversas janelas igualmente espaçadas de tamanhos  $2^n$ , onde  $n = [6, 14]$ . Na prática, apliquei para cada banda (A, B, C, D e F) a sub-rotina DNFF nas diferentes janelas, conforme tabela 1, obtendo-se os coeficientes de Fourier (em arquivos .f5) das séries temporais registradas. A partir destes coeficientes apliquei a segunda sub-rotina que é a TRANMT, que estima os elementos do tensor de impedância (em arquivos .zss). A partir das impedâncias estimadas, finalmente fiz os gráficos de resistividades aparentes e fases das respostas MT principais (modos XY e YX).

Tabela 1: Tamanho das janelas espectrais utilizadas para o processamento de cada banda de frequência.

<b>Banda</b>	<b>Tamanho da Janela (número de pontos)</b>
A	1024; 4096; 8192; 65596
B	256; 1024; 4096; 8192; 65596
C	64; 128; 256; 1024; 4096
D	64; 128; 256; 1024
F	8192; 16384

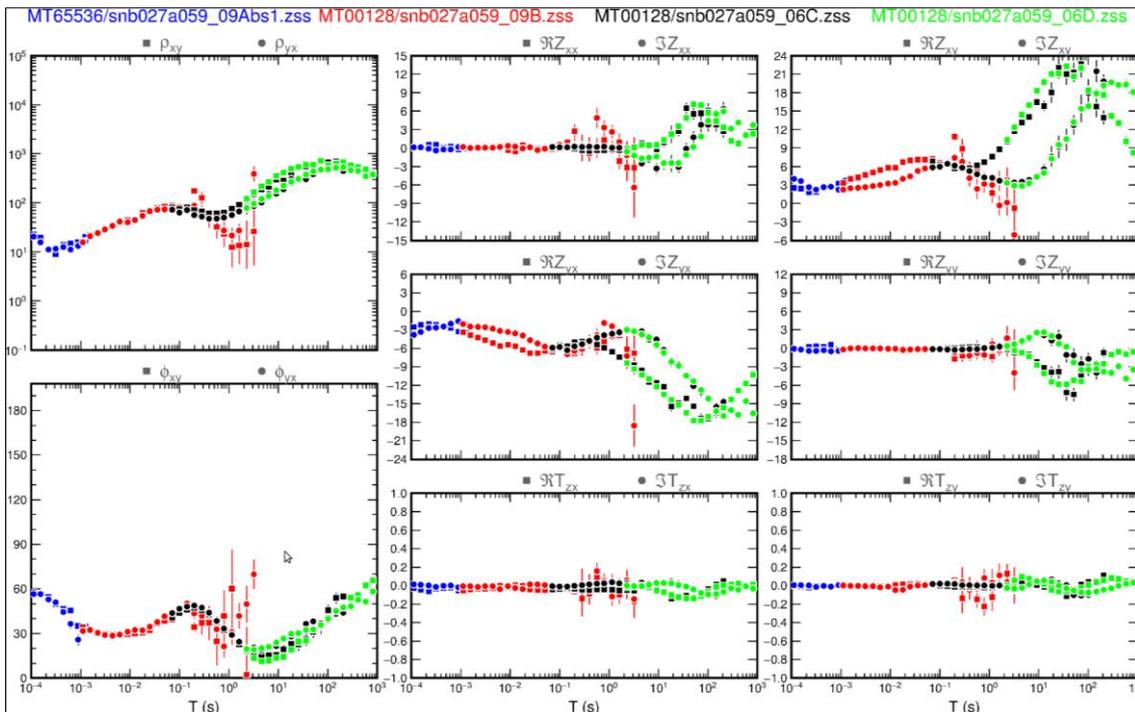
Como a propagação do campo eletromagnético no interior da Terra é tratada como um processo de difusão e os espectros foram suavizados em torno de frequências alvo durante o processamento, espera-se que as variações das resistividades aparentes e fases sejam suaves com a variação do período do sinal. A suavidade foi o principal critério para a escolha da janela mais apropriada das respostas. Ou seja, a melhor janela era a que gerasse curvas de resistividade e fase com variações menos abruptas possíveis.

Depois de escolher a melhor janela de cada banda, eu as uni para comporem uma única curva. A seleção das janelas para união das bandas seguiu, além da suavidade, o critério da continuidade entre elas. Assim, ocasionalmente, descartei algumas das janelas por não apresentarem continuidade entre uma banda e outra.

A banda de uma determinada estação tem geralmente vários disparos. Então, para cada banda e cada janela espectral utilizada, plotei e comparei os gráficos. Escolhendo dentre todos os resultados o melhor, ou seja, as curvas mais contínuas, suaves e com erros pequenos de cada banda.

Esse procedimento de análise foi feito em todos os dados de cada banda, sendo apenas um dos dados de cada banda escolhido, após uni todas as bandas que representa a estação, formando uma única curva, como na figura 6, vou mostrar a estação 27, pois ela teve a melhor continuidade e suavidade das 5 estações escolhidas.

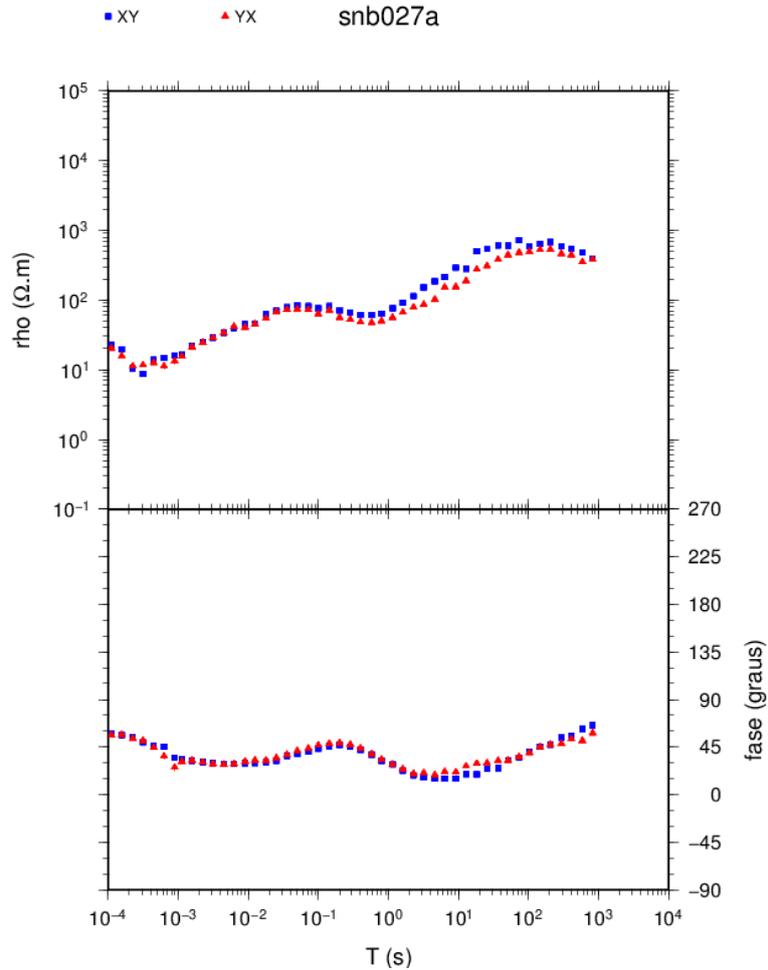
Figura 6 – Gráfico de Resistividade Aparente por Períodos da estação snb027.



Fonte: Produção do autor.

Na Figura 6 há sobreposição de pontos na transição entre as bandas, para retirar tais pontos, considerei que o início da banda é geralmente melhor do que o final de outra banda, pois o final é sempre mais incerto e ruidoso.

Figura 7 - Melhor curva sem sobreposição da estação snb027a.



Fonte: Produção do autor.

Então gerei a Figura 7, que agora não há sobreposição de pontos na transição entre as bandas. Nessa estação pode-se ver que a curva tem uma boa continuidade ao longo de todo o espectro de frequências. A boa sobreposição dos modos XY e YX, tanto na fase quanto na resistividade, sugere que a estrutura investigada pode ser tratada como 1D, ou seja, a variação da resistividade elétrica ocorre somente com a profundidade.

## 6 – CONSISTÊNCIA DOS DADOS

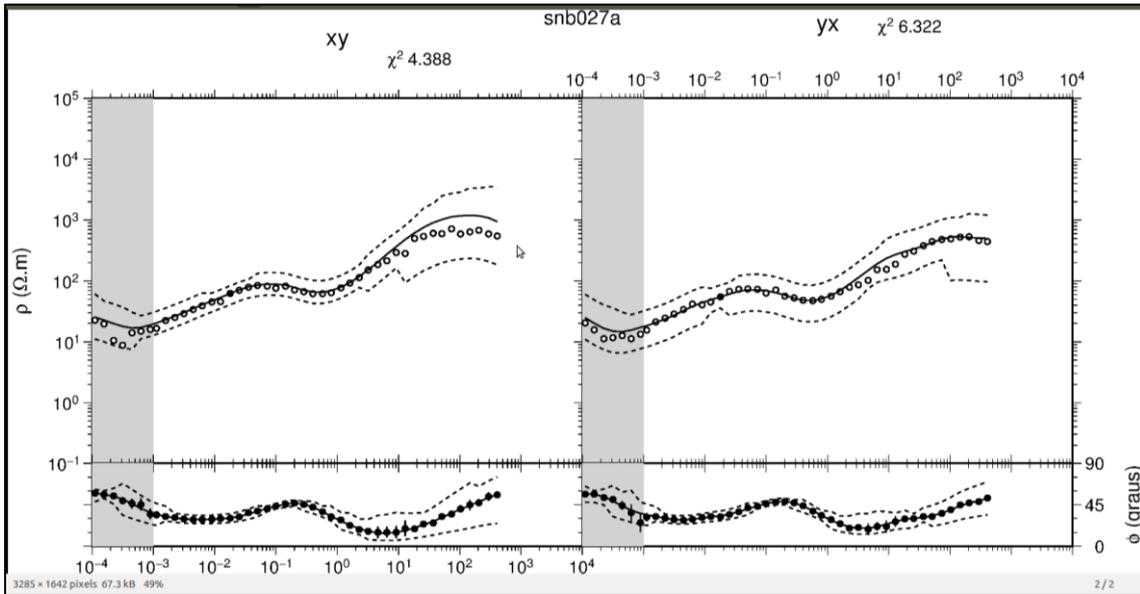
Uma forma de checar a consistência das respostas MT em certa estação é comparar a curva de resistividade aparente com a curva de resistividade derivada da fase, conforme previsto nas relações de dispersão (Vozoff, 1991, pg. 654).

Por esta relação, basta fornecer apenas um valor de resistividade aparente em uma dada frequência. Isso é executado pelo programa computacional RHOPPLUS (Parker e Booker, 1996), que obtém respostas MT sintéticas com base nos modelos de condutividade unidimensionais que minimizam o  $\chi^2$  (chi-quadrado) por uma série de funções delta. Quando as curvas de resistividade aparente e fase violam a relação da dispersão, geralmente pode-se suspeitar de problemas instrumentais ou fortes distorções 3D.

A imagem gerada no Rhoplus tem uma linha preta contínua que é a estimativa da interpolação. Há uma linha tracejada que é o limite de confiança. Apresenta os dados experimentais que são os círculos, sendo que os círculos preenchidos são os considerados e os que não estão preenchidos não são considerados.

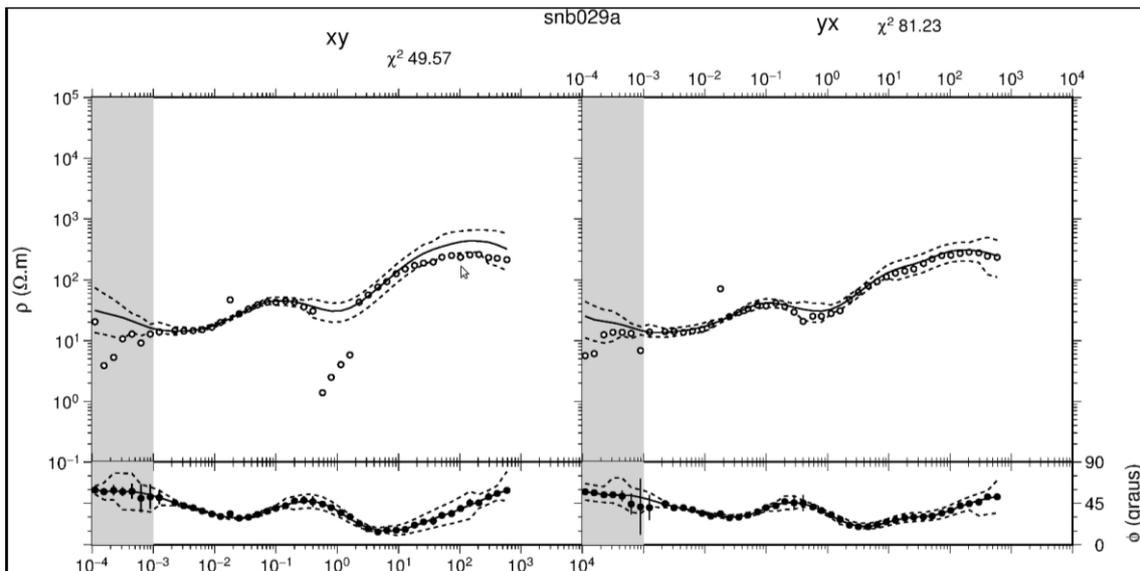
Aplicando RHOPPLUS em todas as estações, de uma forma geral as curvas se mostraram consistentes, conforme exemplificado na Figura 8. Em algumas estações, porém, o ajuste foi mais problemático em períodos acima de 10 segundos, ou seja, até o começo da banda D. Isto pode ser explicado pelo grande erro da fase, sendo um exemplo disso mostrado na Figura 9.

Figura 8 - Resultado da aplicação do RHOPPLUS nos dados da estação snb027a. A linha preta contínua é a estimativa da interpolação. A linha tracejada é o limite de confiança. Os círculos são os dados experimentais, sendo o preenchido os considerados e os não preenchidos os não considerados.



Fonte: Produção do autor.

Figura 9 - Resultado da aplicação do RHOPPLUS nos dados da estação snb029a, onde as curvas calculadas e a original não se encontram claramente consistentes no final da banda D, a partir de 10 s.



Fonte: Produção do autor.

## **7 – DIFICULDADES ENCONTRADAS**

Inicialmente o objetivo principal deste trabalho era desenvolver uma comunicação entre o programa Rhoplus e objetos nativos em Python. Então estes objetos poderiam ser manipulados através de uma interface gráfica amigável e intuitiva, possibilitando o processamento Rhoplus sem a necessidade de manipulação via terminal Shell. Isto facilitaria o processo para o usuário.

Porém tive dificuldades ao fazer esta comunicação entre o Rhoplus e o Python, então busquei tutoriais e apostilas para me aprofundar na programação com Python, mas não obtive muito êxito.

Para realizar o processamento do Rhoplus usamos funções do arquivo .awk, portanto seria necessário desenvolver um software GUI. Este software teria botões que chamariam scripts awk em Python. Porém para chamar estes scripts seria preciso extrair o conteúdo file do arquivo .awk antes. Como os scripts awk não foram feitos por mim, tive dificuldades em compreendê-lo e depois teria que transformar para a sintaxe subprocess, o que eu não consegui.

## 8 – ANÁLISES E RESULTADOS

Em três das cinco estações processadas, há dados de boa qualidade em uma ampla faixa de frequências, entre  $10^{-4}$  e  $10^3$  s. Até o período de 0,1 s tanto a curva do modo XY, quanto à curva do modo YX são praticamente coincidentes, o que sugere um meio homogêneo (1D), para períodos maiores, os modos XY e YX são divergentes, o que condiz com um meio 2D ou 3D. Sendo um meio relativamente resistivo, pois suas resistividades aparentes são da ordem de 100 – 1000  $\Omega$ -m.

Nas estações snb026a e snb029a ocorreu uma distorção nas curvas processadas em torno de  $\sim 200$  s (60 Hz) e sua origem pode estar relacionada ao sinal eletromagnético artificial gerado por redes elétricas próximas da estação MT. Ela e seus harmônicos podem gerar falsas e abruptas variações nas respostas, podendo ser observada na primeira parte do anexo.

Verifiquei que a consistência dos dados em geral não é obedecida para períodos acima de 10 segundos. Este período é próximo das bandas C e D que estão mais ruidosas e trazem complicações para a análise, pois são elas que trazem informações profundas, que são as mais importantes para este trabalho.

## 9 – CONCLUSÕES

Ao realizar as análises, podemos concluir que a maioria das estações tem uma elevação da resistividade no início, indicando uma mudança na geologia, e a partir do que se sabe sobre a Bacia do Paraná pode ser quando passa dos sedimentos do Grupo Bauru para os basaltos da formação Serra Geral. Depois a resistividade torna a decair quando sugerindo sedimentos pré-vulcânicos, que são condutivos. Por fim onde a resistividade volta a crescer sugere que há um embasamento.

A proposta de uma litosfera cratônica com base em datação do seu embasamento, dados gravimétricos, além de dados de tomografia sísmica que sugeriam uma litosfera cratônica pela espessura e das altas velocidades de propagação de ondas, esteve em aparente contradição devido à diminuição na resistividade, o que não devia ocorrer em regiões cratônicas. No entanto, uma modificação na estrutura elétrica em crátons estáveis antigos pode ser decorrente de processos geodinâmicos nas zonas de subducção de litosfera oceânica sob a litosfera da Bacia do Paraná. Essa hipótese está de acordo com o que Chaves et al. (2016) encontraram a partir de um modelo combinado de densidades e perturbação na velocidade de propagação de ondas P. O estudo mostrou anomalias de velocidade da onda sísmica P positivas e aumento de densidade do manto decorrente de processos de refertilização desde o Neoproterozoico e durante o Paleozoico.

Portanto através das comparações com outros artigos que estudaram a Bacia do Paraná citados neste trabalho, observei que na localização das estações pode ser considerada uma região cratônica.

As dificuldades encontradas ao fazer esta comunicação entre o Rhoplus e o Python se deu ao fato de não conseguir compreender os scripts do arquivo .awk, extrair o conteúdo file do arquivo .awk e chamar este arquivo no Python.

Através desta Iniciação Científica aprendi os comandos básicos do Sistema Operacional Linux, a usar o pacote GMT (Generic Mapping Tools), me familiarizei com o ambiente computacional do Laboratório de Sondagens Magnetotélúricas do IAG-USP, além de

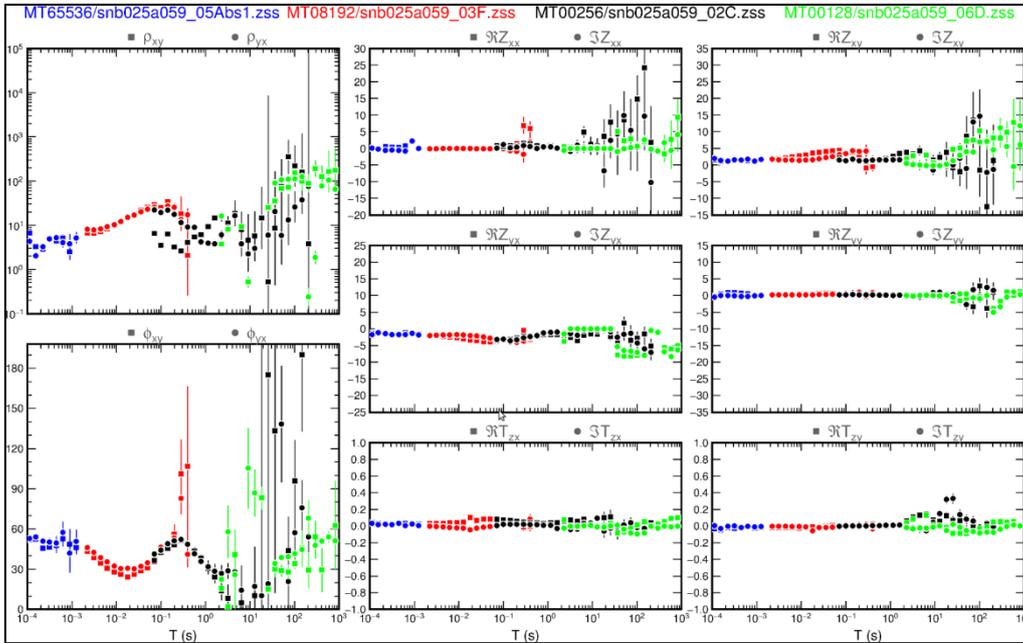
me aprofundar no Método MT e nas suas técnicas de análise de dados, como também na programação em Python.

Futuramente desenvolveremos o programa que busca a comunicação entre o programa Rhoplus e objeto em Python. Possibilitando que o processamento Rhoplus seja realizado sem a necessidade de manipulação via terminal Shell.

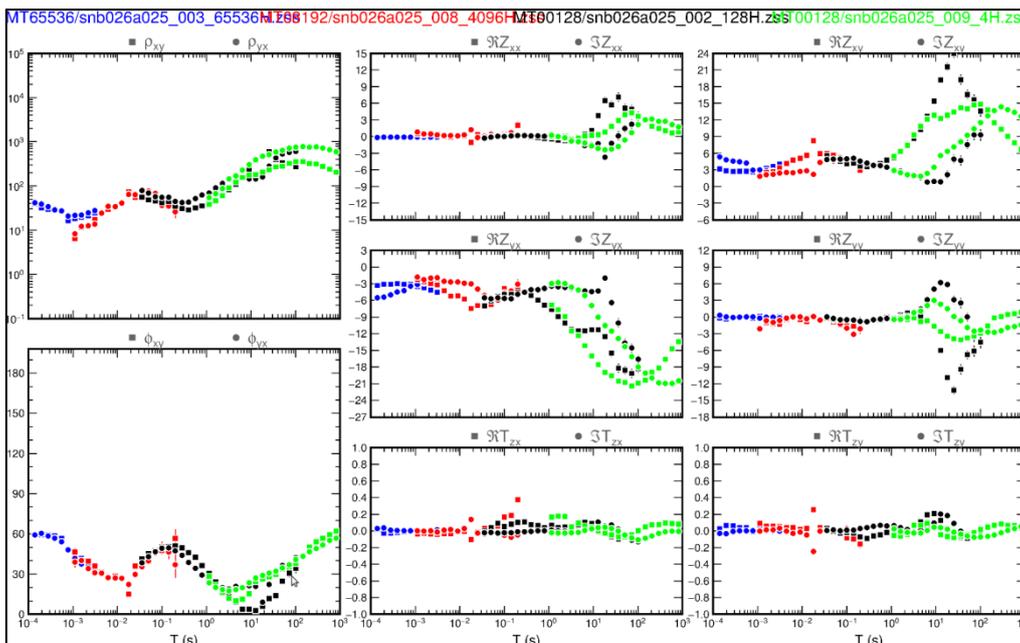
ANEXOS

1) Curvas de Resistividade Aparente, Fase da Impedância

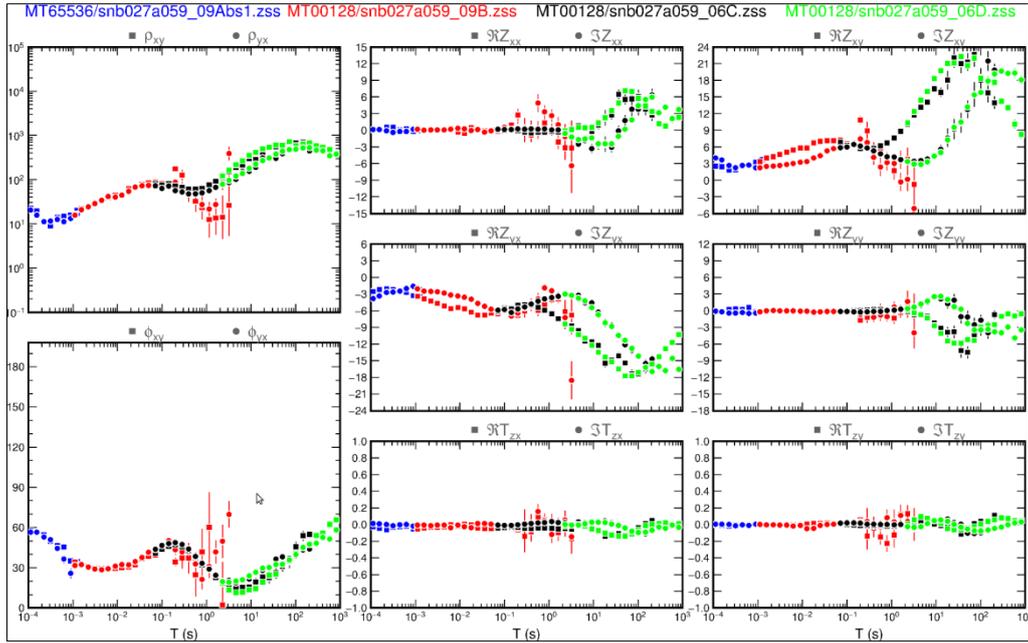
Snb025a



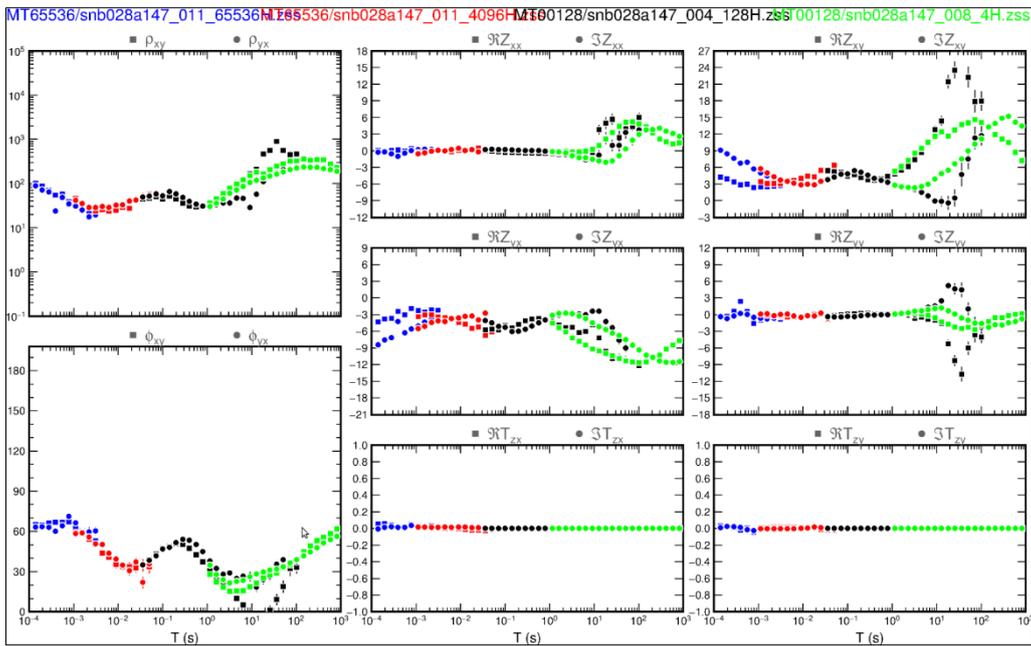
Snb026a



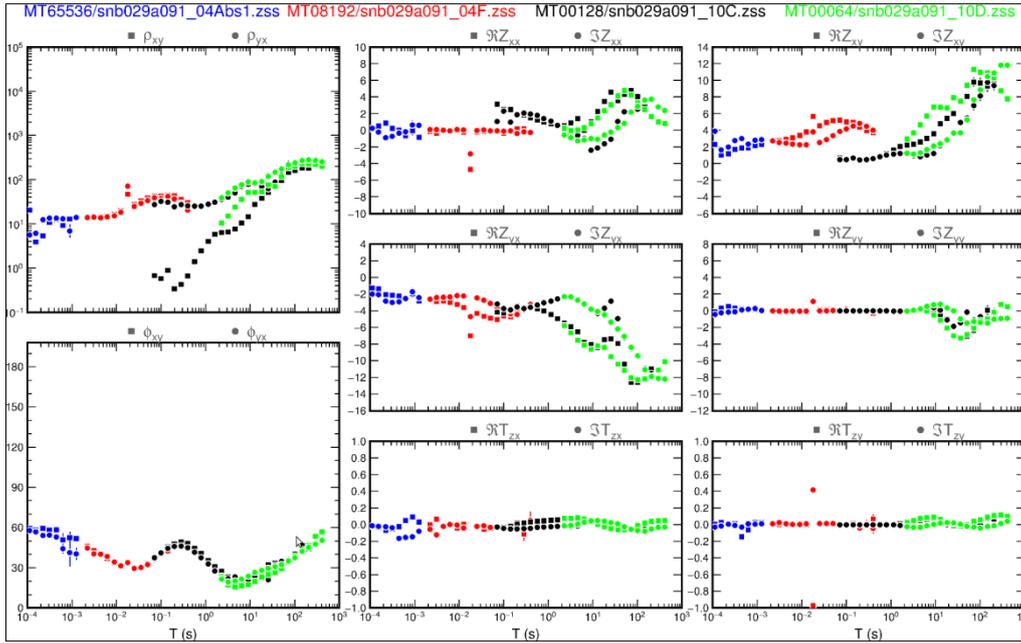
### Snb027a



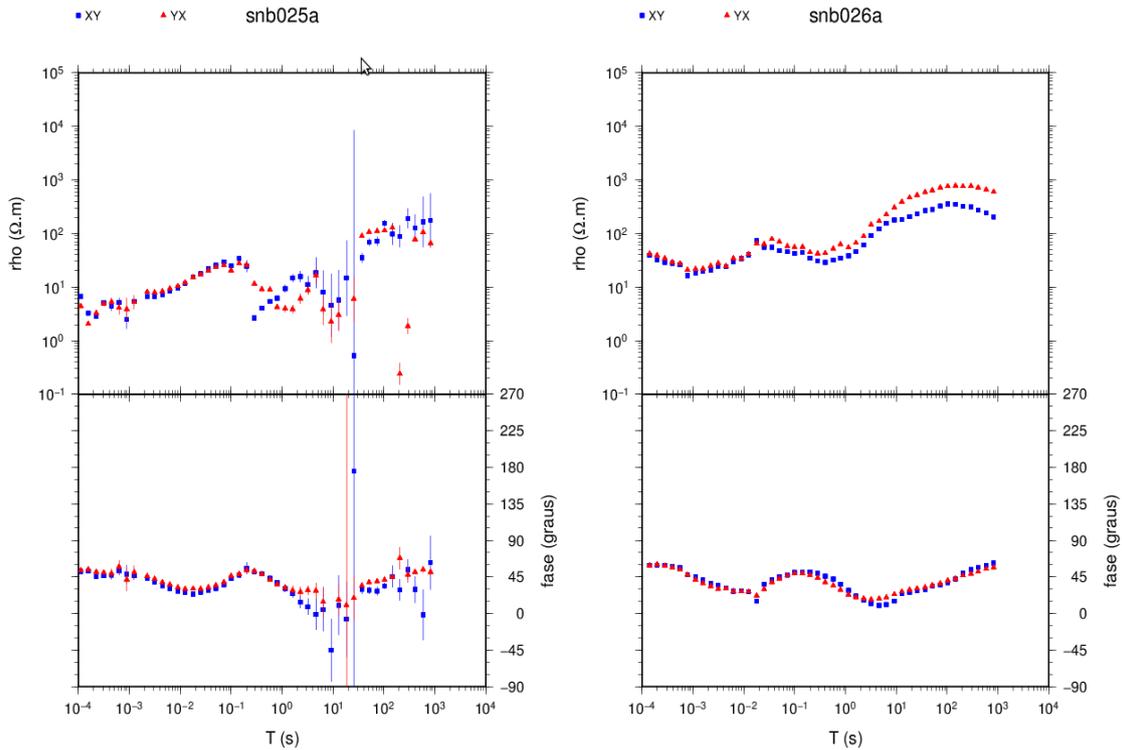
### Snb028a

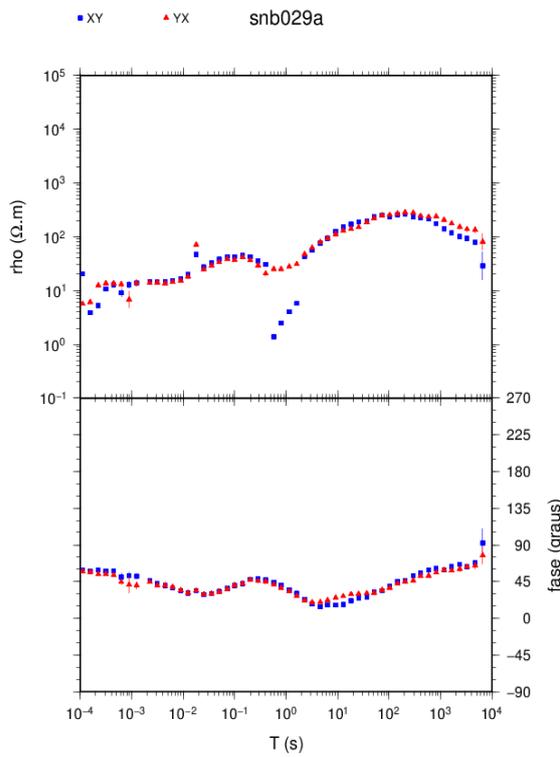
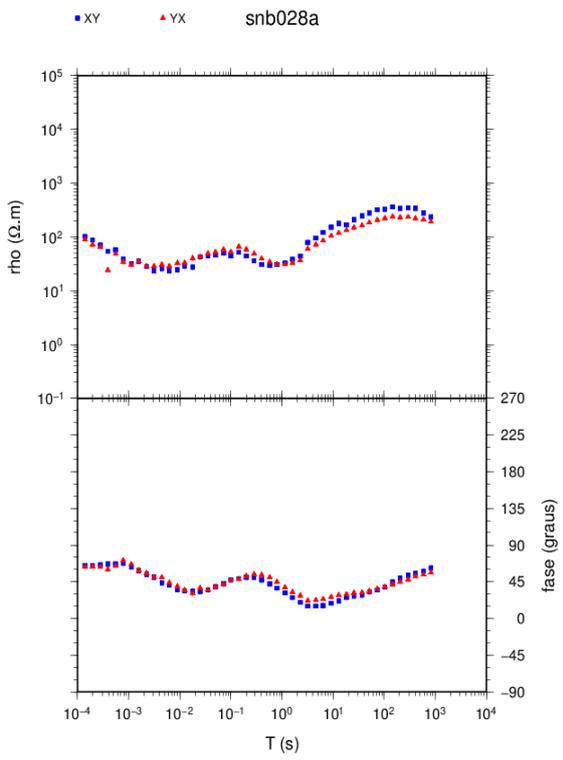
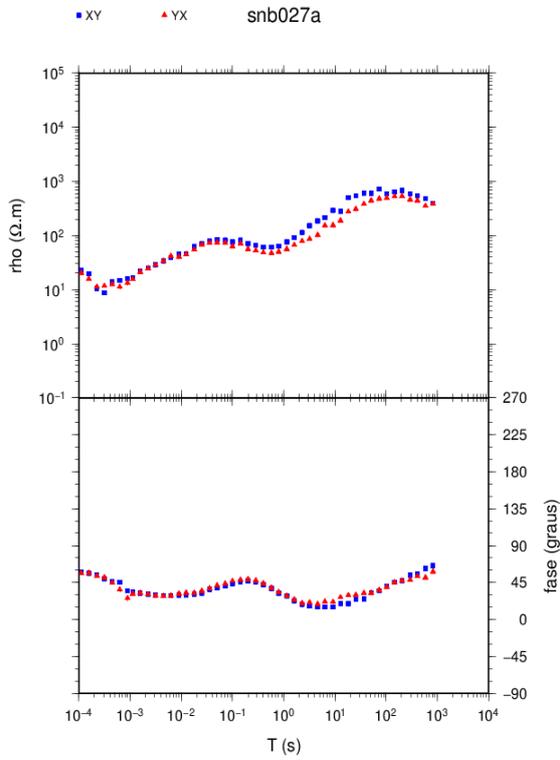


## Snb029a

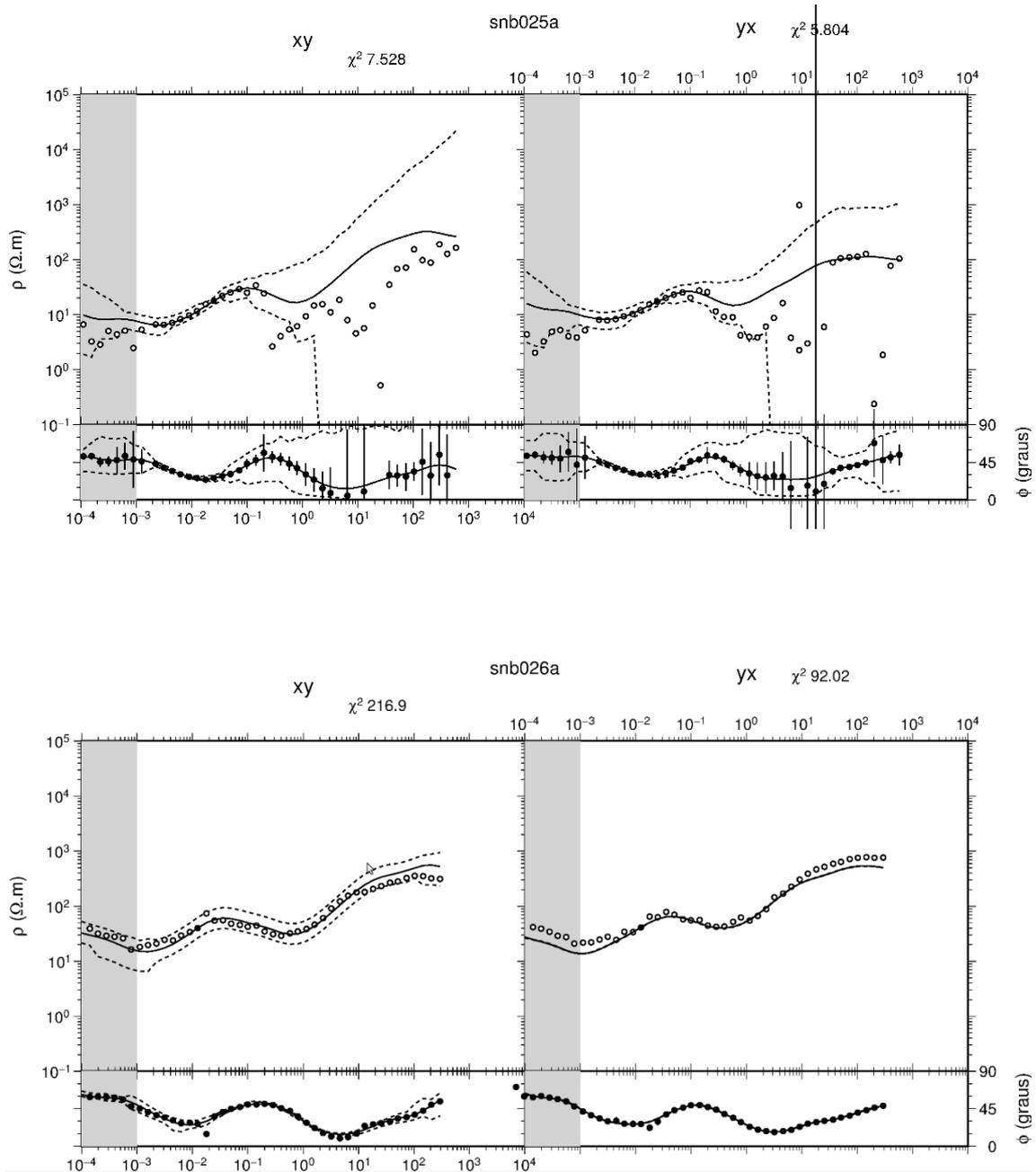


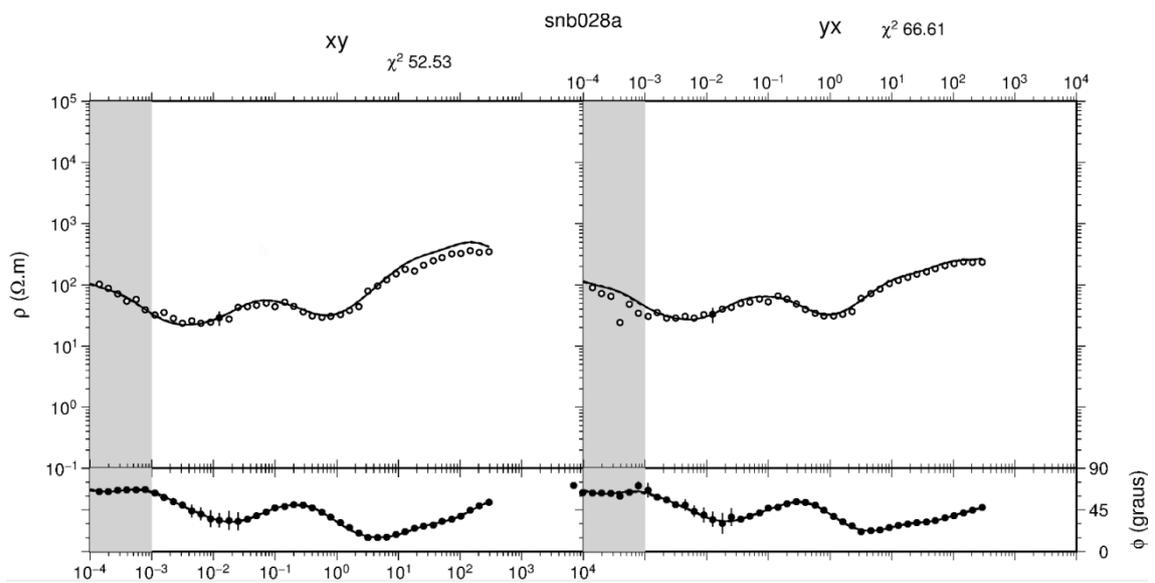
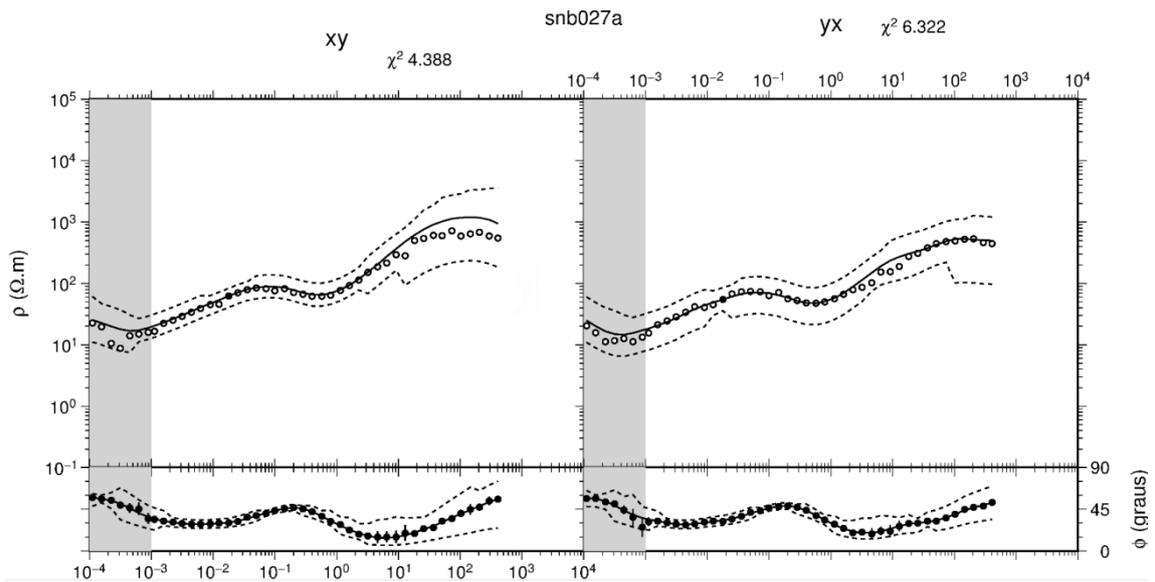
## 2) Curvas de Resistividade Aparente e Fase

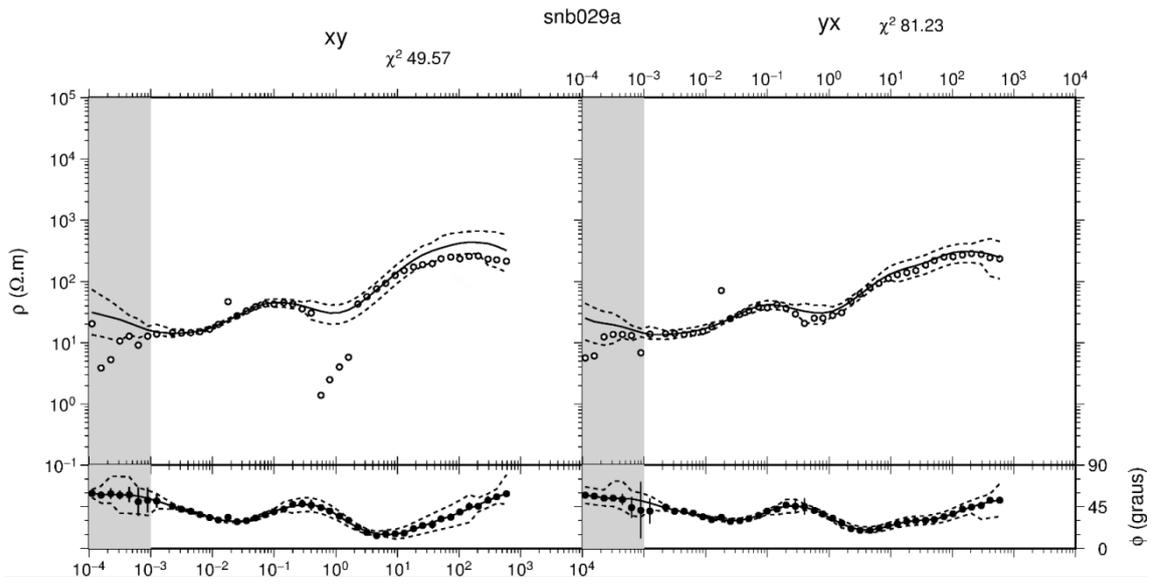




### 3) Consistência dos dados através do RHOPLUS







## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSUMPCÃO, M.; JAMES, D.; SNOKE, A. **Crustal thicknesses in SE Brazilian Shield by receiver function analysis: Implications for isostatic compensation.** Journal of Geophysical Research: Solid Earth, v. 107, n. 1, jan. 2002.

CHAVES, C.; USSAMI, N.; RITSEMA, J. **Density and P-wave velocity structure beneath the Paraná Magmatic Province: Refertilization of an ancient lithospheric mantle.** Geochemistry, Geophysics, Geosystems, v. 17, n. 8, p. 3054-3074, 2016.

CORDANI, U. G.; BRITO NEVES, B. B.; FUCK, R. A.; PORTO, R.; THOMAZ FILHO, A.; CUNHA, F. M. B. da. **Estudo preliminar de integração do Pré-Cambriano com os eventos tectônicos das bacias sedimentares brasileiras.** PETROBRAS, Cenpes, Sintep III, Série Ciência-Técnica-Petróleo, v. 15, pp. 1-70, 1984.

EGBERT, G. D. **Robust multiple-station magnetotelluric data processing.** Geophysical Journal International, v. 130, n. 2, p. 475-496, 1997.

FENG, M.; LEE, S. van der; ASSUMPCÃO, M. **Upper mantle structure of South America from joint inversion of waveforms and fundamental mode group velocities of Rayleigh waves.** Journal of Geophysical Research, v. 112, B04321, 16 p., 2007.

JONES, A. G. **On the Equivalence of the “Niblett” and “Bostick” Transformations in the Magnetotelluric Method.** J. Geophys. v. 53, p. 72-73, 1983.

JULIÁ, J.; ASSUMPCÃO, M.; ROCHA, M. P. **Deep crustal structure of the Paraná Basin from receiver functions and Rayleigh-wave dispersion: Evidence for a fragmented cratonic root.** Journal of Geophysical Research, v. 113, B08318, 2008.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; IAN, H. **Geofísica de exploração.** Tradução de Maria Cristina Moreira Coelho. São Paulo: Oficina de textos, 2009. 438 p. Original inglês.

MANTOVANI, M. S. M.; QUINTAS, M. C. L.; SHUKOWSKY, W.; BRITO NEVES, B. B. **Delimitation of the Paranapanema Proterozoic Block: A Geophysical Contribution.** Episodes, v. 28, n. 1, p. 18-22, 2005.

MILANI, E. J. **Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana Sul-ocidental.** Tese de Doutorado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2v, 1997.

MILANI, E. J.; RAMOS, V. **Orogenias paleozoicas no domínio sul-ocidental do Gondwana e os ciclos de subsidência da Bacia do Paraná.** Revista Brasileira de Geociências, v. 28, n. 4, p. 473-484, 1998.

MINEI, C. **Imageamento Crustal e Litosférico no Nordeste da Bacia do Paraná por Sondagens Magnetotelúricas.** Dissertação de Mestrado – Instituto de Astronomia, Geofísica e C. Atmosféricas, Universidade de São Paulo. São Paulo, Brasil. 2015. 140 p.

MOLINA, E. C.; USSAMI, N. **Interpretação dos dados gravimétricos da parte norte da Bacia do Paraná.** Rev. Bras. Geociências, v. 19, p. 187-196, 1989.

NUNES, H. O. **Imageamento das estruturas geolétricas da litosfera na porção norte da Bacia do Paraná pelo método magnetotelúrico.** Dissertação de Mestrado – Instituto de Astronomia, Geofísica e C. Atmosféricas, Universidade de São Paulo. São Paulo, Brasil. 2010. 126 p.

PARKER, R. L.; BOOKER, J. R. **Optimal one-dimensional inversion and bounding of magnetotelluric apparent resistivity and phase measurements.** Physics of the Earth and Planetary Interiors, v. 98, p. 269-282, 1996.

SIMPSON, F.; BAHR, K. **Practical Magnetotellurics.** Cambridge University Press, Cambridge, 2005. 270 p.

SNOKE, J. A.; JAMES, D. E. **Lithospheric structure of the Chaco and Paraná basins of South America from surface-wave inversion.** Journal of Geophysical Research, v. 102, n. B2, p. 2939–2951, fev., 1997.

VANDECAR, J. C., D. E. JAMES, AND M. ASSUMPCÃO, **Seismic evidence for a fossil mantle plume beneath South America and implications for plate driving forces**, *Nature*, 378, p. 25–31, 1995.

VOZOFF, K. **The magnetotelluric method**. In: NABIGHIAN, M. (ed), *Electromagnetic methods in applied geophysics*. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma, vol. 2, part B, 1991, p. 641-711.