



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



# **PROCESSAMENTO DE DADOS DE SONDAGENS MAGNETOTELÚRICAS COLETADOS NA PROVÍNCIA BORBOREMA, REGIÃO NORDESTE DO BRASIL.**

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

Melissa Tami Makibara (IAG / USP, Bolsista PIBIC/CNPq)  
E-mail: *melissa.makibara@usp.br*

Ícaro Vitorello (LAC/CTE/INPE, Orientador)  
E-mail: *icaro@dge.inpe.br*

Mauricio de Souza Bologna (IAG / USP, Co-orientador)  
E-mail: *mauricio@iag.usp.br*

Julho de 2012

# Sumário

<i>1. Resumo do Projeto.....</i>	<i>2</i>
<i>2. Introdução.....</i>	<i>2</i>
2.1– Contexto geológico.....	3
2.2 – O método MT.....	4
2.3– Processamento de dados.....	5
<i>3. Atividades desenvolvidas entre julho / 2012 e julho / 2012.....</i>	<i>7</i>
3.1 – Processamento de dados.....	7
3.2 – Niblett - Bostick.....	11
3.3 - Reprocessamento: pré-seleção por coerência.....	12
3.4 - Conclusões preliminares.....	14
3.5 – Outras atividades.....	15
<i>4. Atividades para o próximo período.....</i>	<i>15</i>
<i>5. Referências bibliográficas.....</i>	<i>15</i>
<i>6. Anexos.....</i>	<i>17</i>

## **1. Resumo do Projeto**

Este projeto consiste na realização de estudos magnetotelúricos (MT) na região oeste da Província Borborema, Nordeste do Brasil, próximo ao lineamento Sobral - Pedro II. O método MT é uma técnica geofísica para estudar a distribuição de condutividade elétrica no interior da Terra. A Província Borborema possui uma história geológica complexa, cuja evolução tectônica tem sido interpretada principalmente em estudos geológicos e geocronológicos de amostras em superfície. Porém, há relativamente pouco conhecimento a respeito da composição e estrutura profunda da litosfera dessa região, o que impede um avanço maior do seu conhecimento. Neste contexto, estudos geofísicos, incluindo o método MT, têm sido aplicados na região com a finalidade de abranger o maior número de informações e contribuir significativamente para o desenvolvimento do conhecimento da área-

Como objetivo geral, este projeto anseia realizar mapeamentos da condutividade elétrica da crosta e manto superior através do processamento e da modelagem de dados MT e, quando possível, correlacionar essas feições com estruturas geológicas conhecidas em superfície. Serão utilizadas técnicas de análise espectral em séries temporais coletadas (processamento robusto), modelagens numéricas e interpretação preliminar dos resultados a partir de dados já coletados pelo Grupo de Geomagnetismo do INPE. Com esses procedimentos, espera-se identificar características geolétricas importantes, como condutores elétricos e direção de anisotropias que possam aprimorar a compreensão sobre a origem e evolução da Província Borborema na área em análise.

## **2. Introdução**

Após as leituras das referências bibliográficas sobre a geologia da Província Borborema e sobre o método MT, a principal atividade desenvolvida foi o processamento dos dados com uma técnica robusta que representa no estado da arte do processamento MT. Alguns procedimentos preliminares são necessários, como a preparação dos dados, arrumando seus formatos (verificar seção 4.1). A seguir, são calculados os coeficientes de Fourier e são combinados os auto espectros e espectros cruzados para que sejam calculadas as impedâncias MT e, a partir delas, calculadas as resistividades aparentes e fases em cada estações. Então, é possível plotar os gráficos e visualizar as resistividades aparentes e fases em função do período.

Após esta importante etapa, notou-se a descontinuidade na curva de resistividade aparente na faixa de frequência de  $10^{-4}$  até  $10^{-2}$  Hz. No intuito de melhorar as respostas obtidas, toda a etapa de processamento foi repetida, desta vez utilizando uma pré-seleção dos dados baseada na coerência entre os sinais elétricos e magnéticos. Ou seja, se um determinado ponto tem uma impedância calculada que está abaixo de uma porcentagem determinada de acordo com a coerência dos sinais, ele é ignorado. Assim, os resultados podem sofrer alguma melhora nas curvas de resistividade aparente e fase, principalmente na região mais rasa (frequências mais altas) e na região em torno de 1 Hz, como veremos a seguir.

### **2.1- Contexto geológico**

A Província Borborema abrange uma região de aproximadamente 450.000 km<sup>2</sup> e foi afetada por dois principais ciclos tectônicos, onde o primeiro ocorreu na transição do Mesoproterozóico para o início do Neoproterozóico (Orogenia Velhos Cariris), e o outro ao término da Orogenia Brasileira Neoproterozóica, resultante da amalgamação do Gondwana Ocidental. Além disso, existem outras características no embasamento da Província que podem estar conectadas à estágios importantes da amalgamação continental durante os meados do Paleoproterozóico e também durante o Arqueano. Devido a essas feições e ao plutonismo granítico encontrado na Província, propõe-se, também, que a mesma foi formada pelo processo de amalgamação no ocidente do Gondwana (Brito Neves et al., 2000).

A região é subdividida em domínios estruturais. Os principais são: Domínio Médio Coreaú (MCO), Domínio Central do Ceará (CC), Domínio do Rio Grande do Norte (RGND), Domínio Central ou Domínio da Zona Transversal (TZ), Domínio do Sul (SD).

A Província Borborema possui entre uma e duas dezenas de perfis com estações MT. Cada perfil tem número variado de estação (geralmente de 20 a 30 estações cada um), e o espaçamento entre elas varia entre 15 e 20 km. Neste trabalho, será utilizado um subconjunto de dados de três perfis. A figura abaixo mostra os perfis MT atualmente existentes na província.

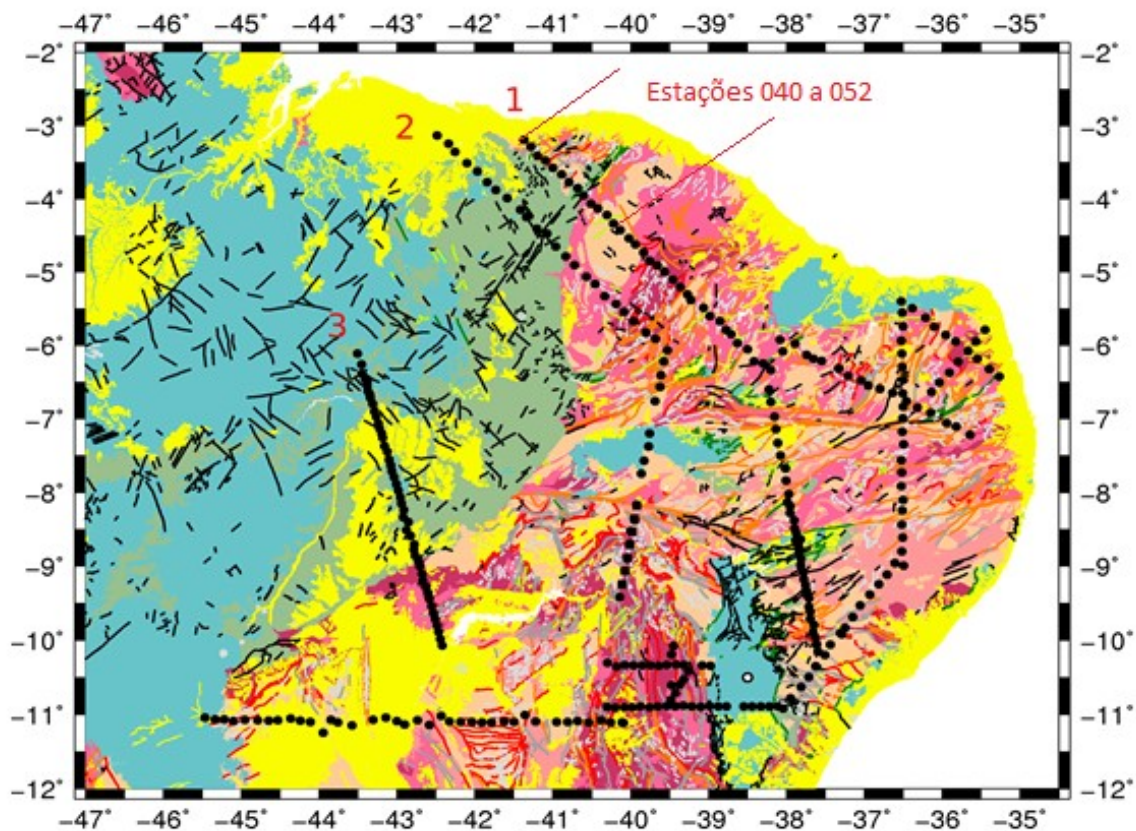


Figura 1: Perfis MT da Província Borborema com foco nas estações processadas do perfil 1, mostradas mais adiante.

Este trabalho discutirá os resultados do processamento robusto de 13 estações MT situadas nas vizinhanças do lineamento Sobral-Pedroll, que tem sido considerado uma extensão do lineamento Trans-Brasiliiano no Estado do Ceará.

## 2.2 - O método MT

O método geofísico MT foi proposto inicialmente por Tikhonov (1950) e Cagniard (1953). É um método passivo, que utiliza as variações do campo geomagnético como fonte de sinal para mapear a condutividade elétrica do interior da crosta e do manto superior terrestre. Para isto, são realizadas medições na superfície da Terra dos campos elétrico e magnético em duas componentes horizontais ortogonais. Em estudos regionais, a componente vertical do magnético é também usualmente medida. O arranjo esquemático do método MT é mostrado na figura 2.

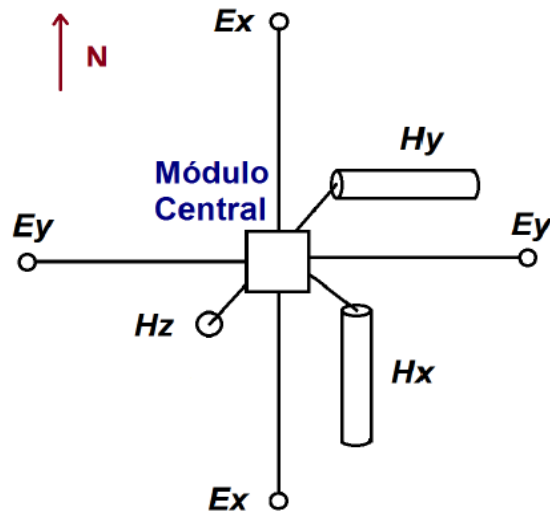


Figura 2: Ilustração de sondagem MT (vista em planta). Geralmente N é o norte magnético.

Quanto menor a frequência (ou maior o período), maior a profundidade de investigação, que pode variar de alguns metros à dezenas de quilômetros. Tempestades elétricas e a interação do vento solar com a magnetosfera geram os sinais captados pelas sondagens MT, que variam sua faixa de frequência entre  $10^{-4}$  a  $10^4$  Hz. As tempestades elétricas são responsáveis por gerar sinais de frequência maior que 1 Hz, e o vento solar com frequências menores. Em torno desta faixa frequência ocorre um mínimo local na amplitude de sinal. Ela é denominada “banda morta”, pois ocorre uma baixa relação sinal/ruído.

O processo de difusão eletromagnética define o comportamento do campo MT no interior terrestre. Logo, ocorre uma atenuação, descrita pelo conceito de profundidade pelicular (“skin depth”), do sinal com a distância que varia com o período do sinal. Para um campo se propagando verticalmente em um meio homogêneo temos:

$$Z_s = 30\sqrt{T\rho} \quad (1)$$

onde  $Z_s$  é profundidade na qual o campo atenua-se por  $1/e$ ,  $T$  é o período em horas e a resistividade ( $\rho$ ) em ohm.metro.

### 2.3- Processamento de dados

A primeira etapa do processamento de dados consiste em obter os auto espectros e espectros cruzados das componentes dos campos elétrico e magnético a partir dos

coeficientes de Fourier das séries temporais. A partir da relação desses espectros, são determinadas quatro impedâncias complexas em função da frequência, ou seja, o tensor MT.

Em um meio homogêneo, 1-D, ou quando um dos eixos de medida está alinhado com o azimute (“strike”) de uma estrutura 2-D, a impedância é dada pela relação abaixo:

$$Z_{xy}(\omega) = \frac{E_x(\omega)}{H_y(\omega)} \quad (2)$$

onde  $\omega$  é a frequência angular (essa relação é válida assumindo uma frente de ondas plana). E, dessa relação, é possível obter resistividade aparente ( $\rho$  em ohm.m):

$$\rho_{xy}(\omega) = \frac{1}{\omega \mu_0} (Z_{xy}(\omega))^2 \quad (3)$$

e fase ( $\phi$  em graus):

$$\phi_{xy}(\omega) = \arctan\left(\frac{E_x(\omega)}{H_y(\omega)}\right) = \arg(Z_{xy}) \quad (4)$$

onde  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética do espaço livre. Esses cálculos são feitos também para as componentes yx, xx e yy.

Dessas relações é possível representar graficamente a resistividade aparente e fase através de curvas em função do período.

Em muitos casos, nem o sinal da fonte natural, nem as fontes de ruído dominantes são bem modelados como processos gaussianos estacionários, então a tradicional aproximação por mínimos quadrados para a estimativa das impedâncias MT geralmente falha catastroficamente (Egbert et al., 1999). Para contornar este problema, técnicas robustas tem sido desenvolvidas. Neste trabalho é utilizado o código robusto de Gary Egbert que representa o estado da arte em termos de processamento MT.

### **3. Atividades desenvolvidas entre julho / 2012 e julho / 2012**

#### **3.1 - Processamento de dados**

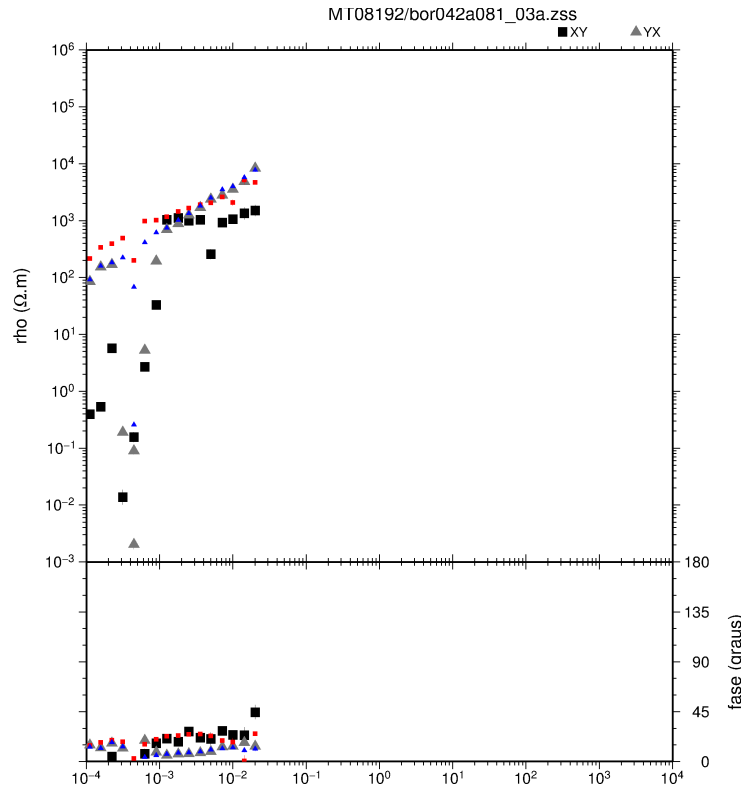
O primeiro passo foi transformar os dados do formato do equipamento (ats) para o ASCII e gerar arquivos .asc e .sp. A série temporal é dividida em quatro bandas e o processamento é feito individualmente para cada uma delas sendo 40.960 Hz, 4.096 Hz, 64 Hz e 2 Hz, para a banda A, B, C e D, respectivamente. Cada uma dessas bandas são processadas em janelas diferentes, de acordo com a tabela abaixo:

*Tabela 1: Tamanho das janelas para cada banda de frequência.*

<i>Tamanho da Janela</i>	<i>Bandas: padrão</i>
0064	D
0128	C, D
0256	C
1024	B,C
4096	A, B
8192	A, B

Então, a banda A, por exemplo, foi processada em duas janelas diferentes: 4096 e 8192. E também, a mesma banda possui algumas coletas, por exemplo 1, 2, 3, etc. A partir de então, foram obtidos os coeficientes de Fourier (em arquivos .f5) e as impedâncias (em .zss) de onde já foi possível plotar as curvas de resistividade aparente e fase, como se vê na figura abaixo. Como cada estação tem vários dados de cada banda, plotando cada uma delas, é possível realizar comparações entre elas e ver qual a que representa mais suavidade e continuidade. Vamos ver o exemplo da estação 042:





*Figura 3: Comparação entre dados de bor042a081\_02a (cinza e preto) e bor042a081\_03a (azul e vermelho) da banda A processados na janela 8192.*

Neste exemplo, vemos que os dados em colorido são melhores e mais contínuos que os dados em preto e cinza, sendo ambos da banda A. Então, a comparação se segue e apenas um dos dados de cada banda é escolhido para que se una todos os outros, formando uma única curva que representa a estação.

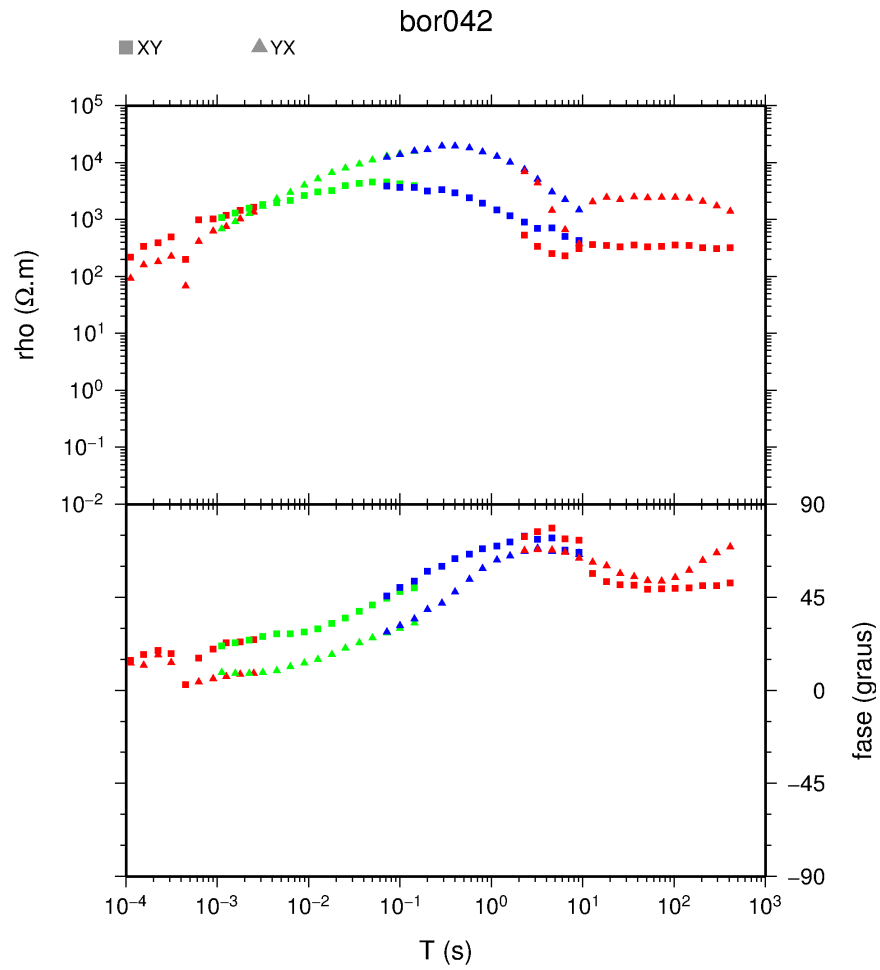
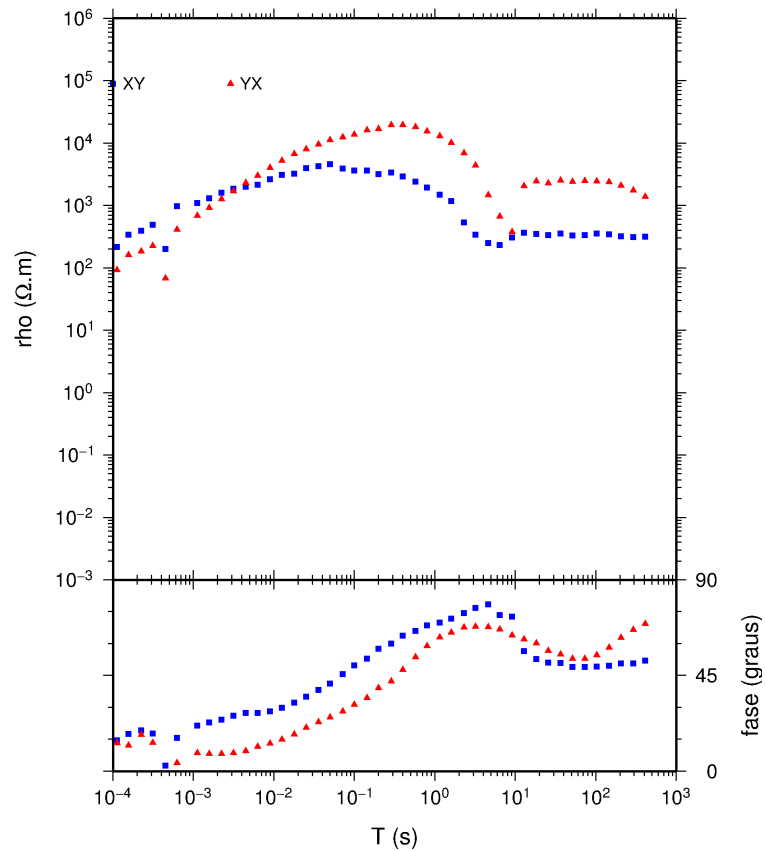


Figura 4: Melhores curvas de cada banda da estação 042.

Como vemos, existem pontos que se sobrepõem na transição entre as bandas. Então, é feito mais um procedimento para retirar tais pontos, levando sempre em consideração que o início de uma banda possui geralmente melhor medição do que o final de outra banda.



*Figura 5: Curva de resistividade aparente e fase da estação 042.*

Aqui, podemos visualizar que, para cada componente (xy e yx) existe uma única curva característica da estação, formada pela melhor coleta de dados de cada banda. Desta estação, é possível verificar que a resistividade aumenta com o período, porém, em torno de 10 s, vemos que ocorre uma queda nos valores, mostrando que esta parte da região é condutiva.

### 3.2 - Niblett - Bostick

Uma prévia análise da penetração do sinal em cada estação foi feita usando a transformada Niblett-Bostick (Jones, 1983). Esta se baseia no princípio da penetração pelicular (skin depth) para converter as respostas MT (resistividade aparente e fase) em perfis de resistividade em função da profundidade. A vantagem deste procedimento é a extrema simplicidade os cálculos envolvidos, que depende apenas dos próprios dados.

$$\rho_{NB}(h) = \rho_a(T) \left( \frac{\pi}{2\Phi(T)} - 1 \right) \quad (5)$$

Além de ser uma expressão mais simples, possui a vantagem de se calcular  $\rho_{NB}$  usando diretamente a fase que, em geral, é menos afetada por ruídos do que a resistividade. Por esses motivos, esta foi a expressão adotada no cálculo da transformada Niblett-Bostick deste trabalho, apesar de possuir interpretação limitada.

A transformada de Niblett-Bostick de uma das estações analisadas é mostrada na figura 6.

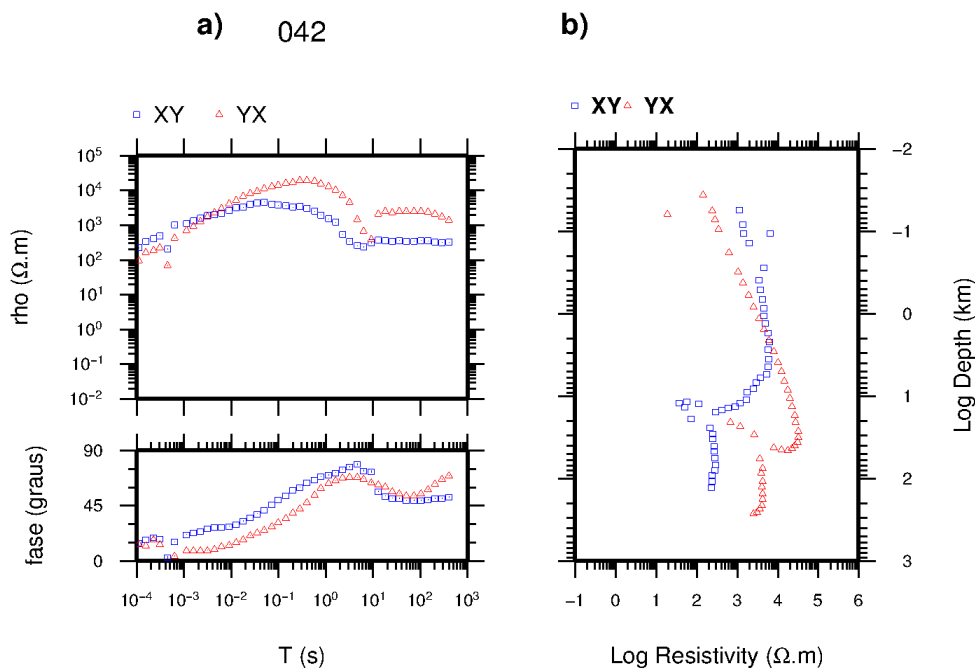


Figura 6: transformada de Niblett-Bostick da estação 042.

Vemos a partir da figura 6 que a resistividade aumenta de acordo com a profundidade até por volta de 10 km, onde ocorre uma descontinuidade deste crescimento, tornando a região condutiva.

### 3.3 - Reprocessamento: pré-seleção por coerência

Geralmente as repostas são mais ruidosas em uma faixa de frequência denominada “banda morta”, que é uma zona em torno de 1 Hz com baixa relação sinal/ruído. O passo seguinte é tentar melhorar tais discontinuidades através, primeiramente, de uma pré-seleção dos dados levando em conta a coerência dos sinais. Primeiramente é escolhido um percentual abaixo do qual as impedâncias não são levadas em conta, neste caso foi de 70%, e um número máximo de pontos, abaixo do número da janela. A imagem é plotada sempre com o intuito de comparar com o dado anterior e verificar se ocorreu alguma melhoria. O número máximo de pontos foi diminuído outras duas vezes e as imagens comparadas novamente. Tendo o melhora nos resultados, foi realizado o ajuste fino, onde é aumentada a porcentagem para 75% e diminuída para 65%. Após estes procedimentos, todas as etapas de plotar as melhores curvas de cada banda são repetidas. Logo, esta estação 042 com a aplicação desta pré-seleção possui melhora na faixa de frequência da banda A, como vemos na figura 7.

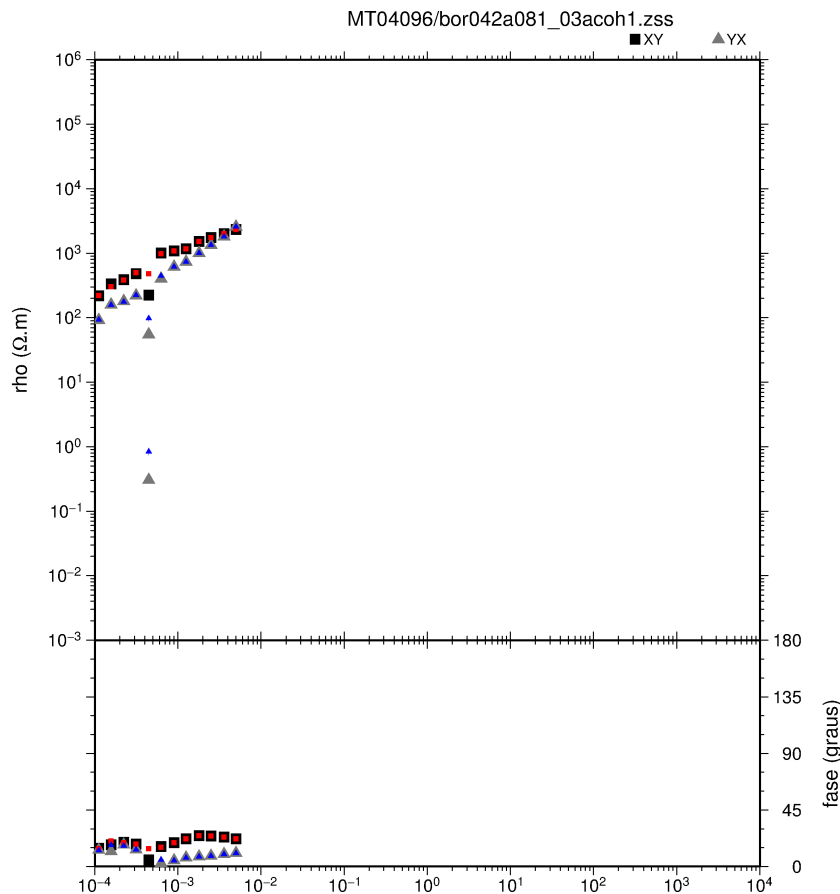
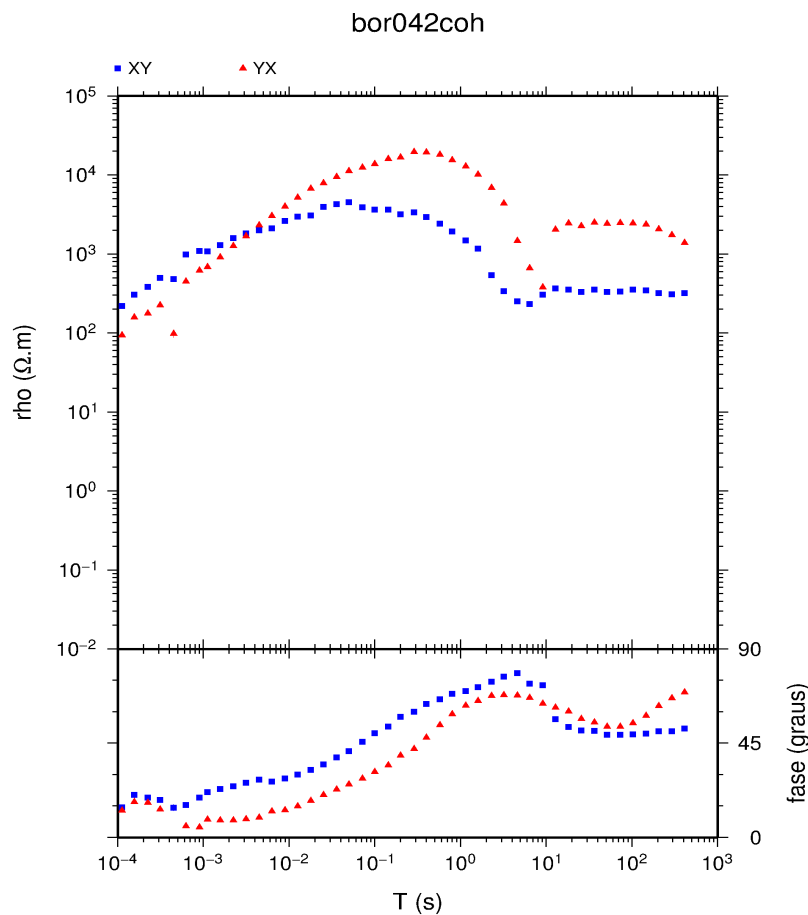


Figura 7: comparação dos dados da banda A da estação 042 sem a aplicação da seleção por coerência em preto e cinza e aplicando a seleção em colorido.

Vemos pela figura 7 que os dados que possuem a aplicação da seleção por coerência possui um ponto que torna o resultado mais contínuo que o anterior. As melhorias também são esperadas na faixa de frequência da “banda morta”, porém, no caso desta estação, não ocorreu tal melhora como esperado. Algumas estações não obtiveram nenhuma melhora.

Então, dando continuidade ao processamento, novamente foi feita a plotagem de todas as bandas unificadas, gerando uma única curva característica de resistividade e fase de cada estação. A figura 8 mostra a estação 042, citada sempre como exemplo.



*Figura 8: Curvas de resistividade aparente e fase da estação 042 reprocessadas levando em conta a seleção dos pontos por coerência.*

Na figura 8, vemos que a característica essencial da estação 042 não foi alterada. Houve melhora de um ponto com a pré-seleção por coerência, mas a curva continua sendo resistiva em períodos curtos e mais condutiva para períodos mais longos.

Também foram feitas as transformadas de Niblett-Bostick das curvas com aplicação de coerência.

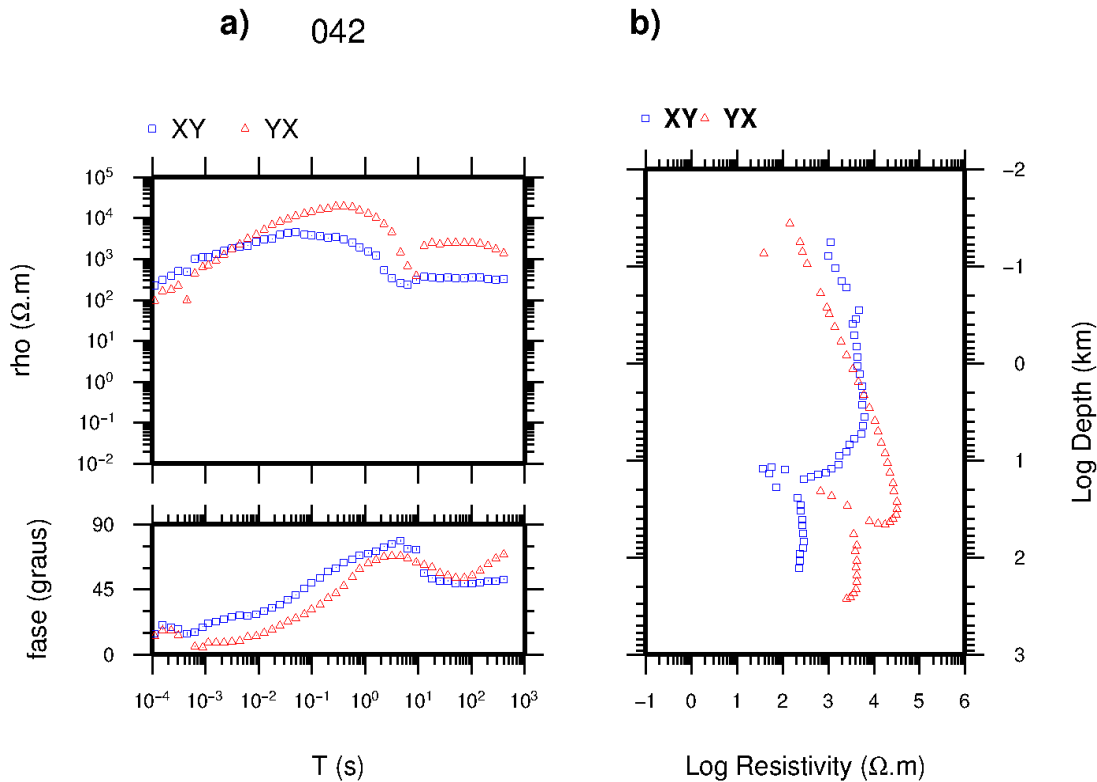


Figura 9: Transformada de Niblett-Bostick da estação 042 dos dados obtidos com ajuste utilizando coerência.

Assim como na figura 8, a figura 9 mostra que também não ocorreram melhorias significativas na transformada de Niblett-Bostick da estação 042 com a pré-seleção por coerência.

### 3.4 - Conclusões preliminares

Como podemos verificar nas figuras que mostram as curvas de resistividade aparente e fase de cada estação, a banda A parece ser sempre mais ruidosa. No entanto, ela traz informações muito rasas (da ordem algumas dezenas de metros). Em períodos mais longos, que são mais importantes para este trabalho, os dados são consistentes. Vê-se que o meio é relativamente resistivo. As resistividades aparentes mesmo em períodos longos são da ordem de 100-1000 ohm-m. Também, observa-se que o meio em torno dessas estações é heterogêneo, uma vez que as fases xy e yx são distintas em todas as 13 estações processadas.

Do reprocessamento de dados, é possível ver melhorias na continuidade das curvas de resistividade aparente e fase, principalmente em regiões que representam frequências maiores, por serem mais rasas e o ruído ser considerável. Algumas estações permaneceram como antes, pois nem sempre é possível obter com sucesso a melhoria de dados, como desejado. Porém, este é apenas um dos métodos que podemos aplicar para a possível melhoria dos dados.

Da transformada de Niblett-Bostick, vemos que a região superior é resistiva e entre 3 e 10 km de profundidade, ocorre uma descontinuidade, onde a região passa a ser condutiva.

### **3.5 - Outras atividades**

Fez-se a leitura e tradução do artigo de Gary Egbert: "Transfer Function Estimation for Electromagnetic Induction Studies: Evolution and State-of-the-Art " (1999), onde aprendeu-se os motivos matemáticos pelos quais é utilizado o código robusto do autor neste projeto e não o método de mínimos quadrados.

### **4. Atividades para o próximo período**

Representação gráfica das funções de transferência do campo magnético em termos de vetores de indução;

Rotação do tensor de impedâncias para verificar se há algum strike geoeletrico e, assim, determinar sua direção.

### **5. Referências bibliográficas**

Brito Neves, B. B., Santos, E. J., Van Schmus, W. R., 2000, Tectonic history of the Borborema Province, northeastern Brazil. In: Cordani, U. G, Milani, E. J., Thomaz-Filho, A., Campos, D. A. (Ed.), Tectonic Evolution of South America, p.151-182.

Cagniard, L., 1953, Basic theory of the magneto-telluric method of geophysical prospecting. Geophysics, 18, 605-635.

Egbert, G.D., 1997. Robust multiple-station magnetotelluric data processing. Geophysical



Journal International, 130, 475-496.

Egbert, G.D., 1999. Transfer Function Estimation for Electromagnetic Induction Studies: Evolution and State-of-the-Art.

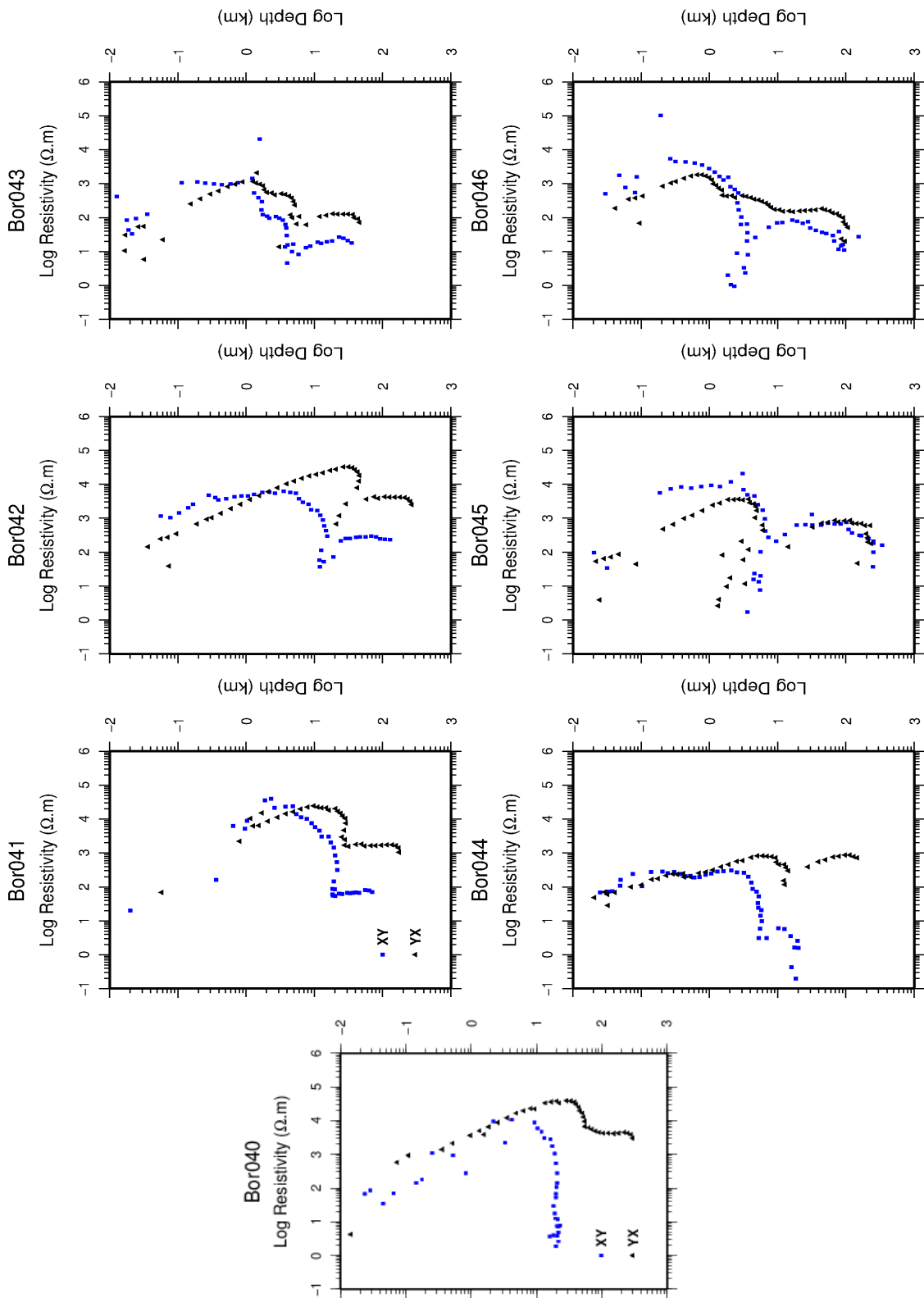
Jones, A.G., 1983. On the equivalence of the Niblett and Bostick transformations in the magnetotelluric method. *Journal of Geophysics*, 53, 72-73.

Nunes, H. O., 2007, Imageamento das estruturas geelétricas da litosfera na Província Borborema pelo método magnetotelúrico, Trabalho de graduação II, USP - SP.

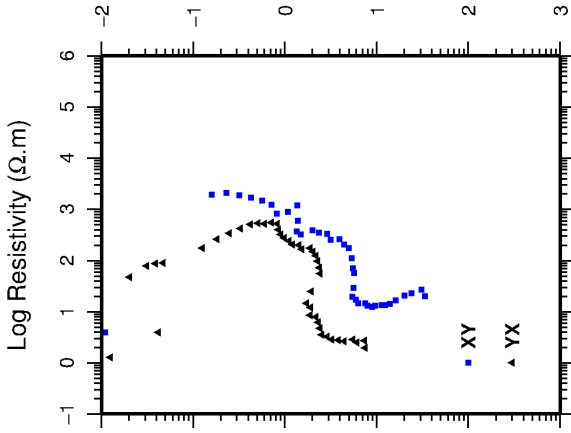
Tikhonov, A. N., 1950, On determining electrical characteristics of the deep layers of the earth's crust. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 73, 295- 297.

## 6. Anexos

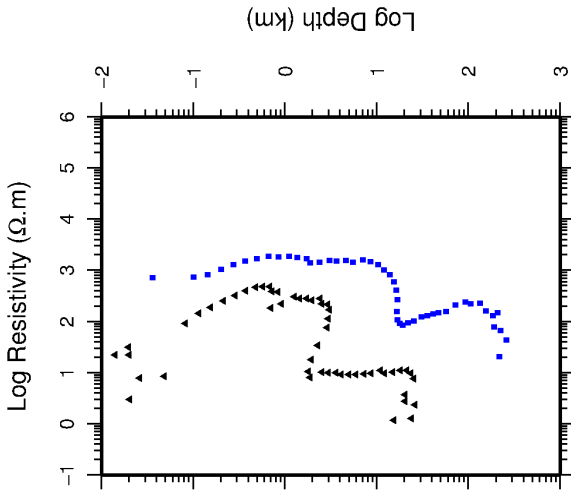
Curvas de resistividade aparente e fase a transformada de Niblett - Bostick das estações 040 a 052 com a aplicação da pré-seleção por coerência.



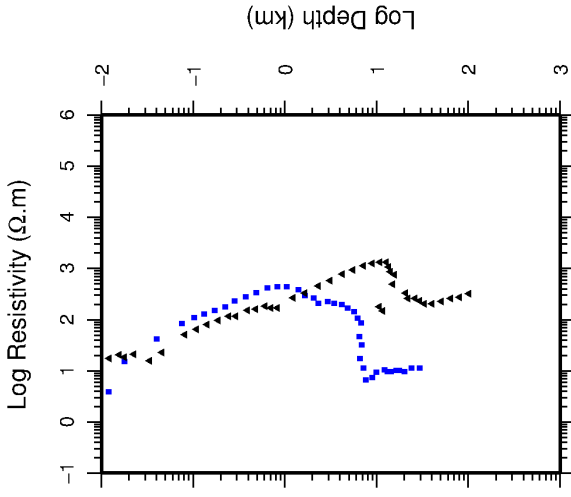
Bor047



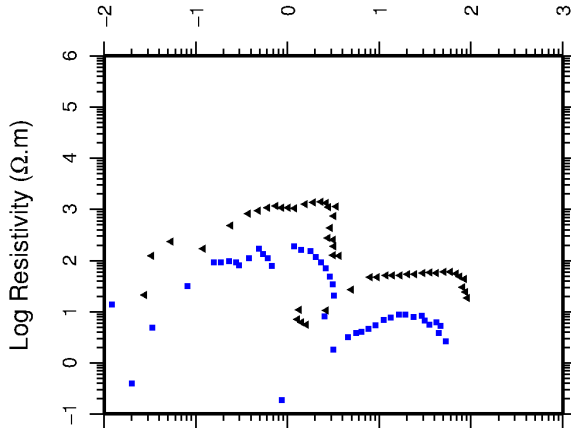
Bor048



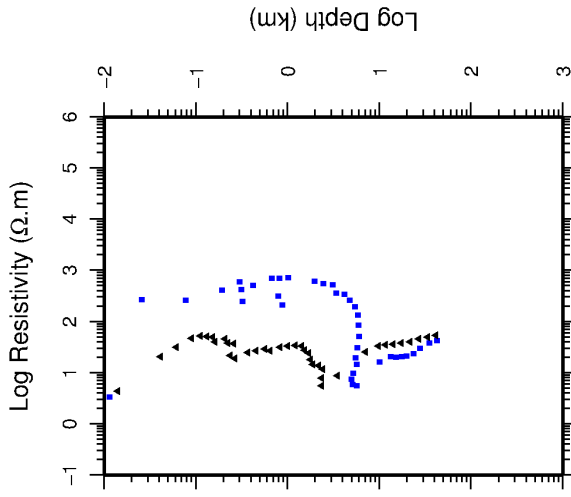
Bor049



Bor050



Bor051



Bor052

