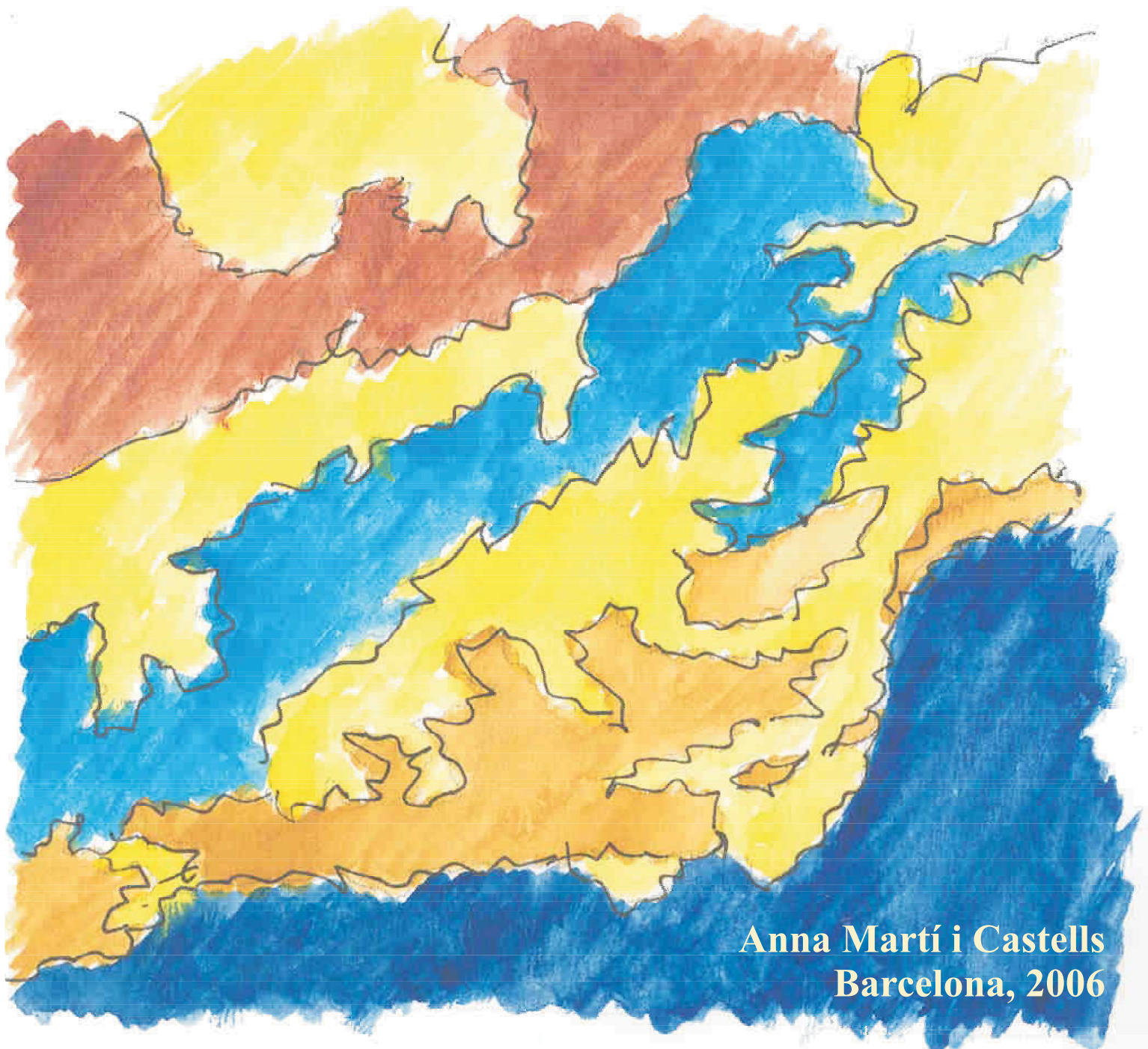


**Ph.D. Thesis**

**Universitat de Barcelona  
Departament de Geodinàmica i Geofísica**

**A Magnetotelluric Investigation of Geoelectrical  
Dimensionality and Study of the  
Central Betic Crustal Structure**



**Anna Martí i Castells  
Barcelona, 2006**



Universitat de Barcelona  
Departament de Geodinàmica i Geofísica

# **A Magnetotelluric Investigation of Geoelectrical Dimensionality and Study of the Central Betic Crustal Structure**

Memòria presentada per Anna Martí i Castells per optar al Títol de Doctora en Física

Aquesta tesi ha estat realitzada dins el Programa de Doctorat Ciències de la Terra, bienni 1999-2001, de la Universitat de Barcelona, sota la direcció de la Dra. Pilar Queralt i Capdevila i el Dr. Eduard Roca i Abella.

Anna Martí i Castells

Barcelona, maig de 2006

Dra. Pilar Queralt i Capdevila

Dr. Eduard Roca i Abella

Part d'aquesta tesi ha rebut el finançament dels següents projectes i institucions:

Tomografia geolèctrica: Desarrollo para la caracterización de acuíferos (CICYT), 2002-2005.  
Acció Integrada (ACI- Agència de Gestió d'Ajuts Universitaris i de Recerca) UB - DIAS  
(Dublin Institute for Advanced Studies, Irlanda), 2003.  
Ajut de la Facultat de Geologia de la Universitat de Barcelona, per a la campanya d'MT a les  
Bètiques, 2004.  
Grup de Recerca de Geodinàmica i Anàlisi de Conques (2005SGR-00397).  
Acció Especial de Suport a la Recerca- Universitat de Barcelona, 2006.

*Als meus pares*



# Table of Contents

List of Tables .....	i
List of Figures .....	iii
Nomenclature, Abbreviations and Terminology .....	ix

Resum .....	1
-------------	---

<b>Introduction .....</b>	<b>21</b>
---------------------------	-----------

## **Part I. Introduction to the Magnetotelluric Method**

<b>Chapter 1: The Magnetotelluric Method .....</b>	<b>27</b>
1.1 Introduction .....	27
1.2 Governing Equations .....	28
1.3 Magnetotelluric Transfer Functions .....	32
1.3.1 Impedance Tensor and Magnetotelluric Tensor.....	32
1.3.2 Geomagnetic Transfer Function.....	33
1.4 Earth MT Dimensionality Models .....	34
1.4.1 1D.....	34
1.4.2 2D.....	35
1.4.3 3D.....	38
1.4.4 The Galvanic Distortion Phenomenon.....	38
1.5 Electromagnetic Sources in MT .....	41
1.6 Instrumentation.....	44
1.7 Time Series Processing.....	46
1.7.1. General overview.....	46
1.7.2. Common processing techniques.....	50
1.8 Modelling and Inversion of MT Data.....	51

<b>Chapter 2: Geoelectric Dimensionality and Rotational Invariants of the Magnetotelluric Tensor.....</b>	<b>53</b>
2.1. Introduction .....	53
2.2. Fundamental Rotational Invariants of the Magnetotelluric Tensor .....	54
2.3 Two-Dimensionality and Strike Direction: Swift's Angle and Skew.....	56
2.4 Bahr Parameters.....	57
2.5 WAL Rotational Invariant Parameters .....	58
2.6 The Magnetotelluric Phase Tensor .....	64
2.7 Problems and Present Limitations on the Determination of Dimensionality .....	68

## **Part II. Methodological Contributions to geoelectric dimensionality**

<b>Chapter 3: Error Analysis and Threshold Values in WAL Rotational Invariants.....</b>	<b>71</b>
3.1. Dimensionality Criteria Using Real Data .....	71
3.2. Estimation of the Invariants and their Errors.....	72
3.2.1. Error Estimation Approaches.....	73
a. Classical Error Propagation.....	73
b. Random Gaussian Noise Generation.....	73

c. Resampling Methods.....	74
3.2.2 Example 1 .....	76
3.2.3 Example 2 .....	81
3.2.4 Concluding remarks on error estimation.....	81
3.3. The Threshold Value .....	83
3.4. Practical Criteria.....	90
3.5. WALDIM Program.....	90
3.6. Conclusions .....	91
<b>Chapter 4: Improving Bahr’s Invariant Parameters Using the WAL Approach.....</b>	<b>93</b>
4.1 Introduction .....	93
4.2 Bahr and WAL Methods.....	94
4.3 Analytical Relationships and Equivalencies for Ideal Cases.....	96
4.4 Threshold Values.....	98
a) Analytical Development .....	99
b) Statistical Development.....	100
4.5 Bahr-Q Method.....	101
4.6 Application to Synthetic and Real Data.....	102
Set 1: Synthetic Data.....	102
Set 2: COPROD2 Dataset: Site 85_314.....	106
Set 3: BC87 Dataset: Site 4.....	107
4.7 Conclusions .....	111
<b>Chapter 5: Applications of the Magnetotelluric Phase Tensor and Comparison with other Methods.....</b>	<b>113</b>
5.1 The Phase Tensor for Different Dimensionality Cases .....	113
5.2 Application to Synthetic and Real Datasets.....	116
5.2.1 Synthetic model dataset .....	116
5.2.2 The COPROD2 dataset: site 85_314 .....	122
5.2.3 The BC87 dataset .....	122
5.3 Comparison with the WAL Method .....	125
5.4 Comparison with Groom and Bailey Decomposition.....	128
5.5 Fitting the Phase Tensor Data to a 2D Model.....	130
5.6 Conclusions .....	133
<b>Part III. Magnetotelluric Study of the central Betic Crustal Structure</b>	
<b>Chapter 6: Geological and Geophysical Settings.....</b>	<b>137</b>
6.1 Geological Setting .....	137
6.1.1 Geodynamic Models of the Betic-Alboran-Rif Region .....	142
6.2 Geophysical Knowledge of the Central Betic Chain .....	144
6.2.1 Gravimetry .....	145
6.2.2 Magnetism.....	146
6.2.3 Seismic Refraction Profiles.....	147
6.2.4 Seismic Reflection Profiles.....	148
6.2.5 Seismicity and Seismic Tomography.....	150
6.2.6 Heat-flow .....	151
6.2.7 Magnetotellurics .....	152
6.2.8 Summary .....	153



<b>Chapter 7: Data Acquisition and Processing: Evaluation of MT Responses</b> .....	<b>155</b>
7.1 Betics 94-95 Survey.....	155
7.1.1 Description.....	155
7.1.2 Time series reprocessing.....	157
7.2 Betics 2004 Survey.....	161
7.2.1 Acquisition.....	161
7.2.2 Time series processing.....	163
7.3 Evaluation of MT Responses.....	165
7.4 Conclusions.....	167
<b>Chapter 8: Geoelectric Dimensionality Analysis of the Betics MT Data</b> .....	<b>169</b>
8.1 WAL Dimensionality Analysis.....	169
8.1.1 WAL invariants and errors, related angles and parameters.....	170
8.1.2 WAL dimensionality analysis of the Betics MT dataset.....	175
8.2 Multisite, Multifrequency Tensor Decomposition Analysis (Strike Code).....	179
8.3 The Magnetotelluric Phase Tensor.....	184
8.4 Modelling Strategies.....	185
8.5 Conclusions.....	187
<b>Chapter 9: 2D Modelling</b> .....	<b>189</b>
9.1 Sensitivity Study of the Previous 2D Model.....	189
9.2 New 2D Models of the Internal Zones.....	193
9.2.1 Review of inversion codes.....	193
9.2.2 Two-dimensional profiles.....	195
9.2.3 Data set-up.....	196
9.2.4 Inversions and models.....	198
9.2.5 RLM2DI inversions results.....	198
9.2.6 NS1 profile inversions using REBOCC and DetREBOCC codes.....	202
9.3 Conclusions.....	205
<b>Chapter 10: 3D Modelling of the Central Betics Geoelectric Structure</b> .....	<b>207</b>
10.1 Data Set-Up.....	207
10.2 Model Mesh and Initial Model.....	208
10.3 Trial and Error Process.....	210
10.4 Final Model.....	211
10.4.1 Comparison with 2D conductivity models.....	216
10.5 Comparison of Responses and Misfits.....	218
10.5.1 Dimensionality of the 3D model.....	220
10.6 Sensitivity Tests.....	221
10.6.1 Model mesh.....	221
10.6.2 Position, extension and size of the conductive body CF3.....	221
10.7 Model Evaluation.....	226
10.8 Comparison with other Geophysical Data.....	227
10.9 Interpretation.....	230
10.9.1 CF3 high conductivity.....	233
10.9.2 Regional geodynamic implications.....	237
10.10 Conclusions.....	238
<b>Conclusions</b> .....	<b>239</b>
<b>Future perspectives</b> .....	<b>243</b>
<b>Agraïments</b> .....	<b>245</b>

**References**.....247

**Appendixes**

A. Expressions of the Errors of WAL Invariants and Strike Angles using Classical Error Propagation ..... 259

B. The COPROD2 Dataset: Geological Setting and Responses from Site 85\_314..... 263

C. The BC87 dataset: Geological Setting and Main Features of the MT Responses ..... 267

D. Betics Dataset Locations and Responses ..... 269

E. Data and Model bet3D-140 Responses ..... 291

F. Single Value Decomposition (SVD) of Distortion Matrix  $C$  ..... 305

**The Dimensionality Sudoku**.....307

# List of Tables

Table 1.1: Recording bands for the Metronix ADU-06 system, indicating their corresponding sampling frequency/period and recorded ranges. ....	45
Table 2.1: Bahr method criteria to characterise the geoelectric dimensionality and distortion types.....	58
Table 2.2: Dimensionality criteria according to the WAL invariants values of the magnetotelluric tensor (Modified from Weaver <i>et al.</i> , 2000).....	62
Table 3.1: Estimations of $I_5$ and Q and their errors at two periods from the COPROD2 dataset. True: True values and classical error propagation. Random: means and standard deviations from Random Gaussian generation (approach <b>b</b> ), for n=10, n=100 and n=1000. Bootstrap: N resamplings of the initial samples from the Random approach. *: Cases with a significant bias between statistical and true values.....	78
Table 4.1: Dimensionality cases according to Bahr and WAL rotational invariants. In case 3, red and green colours refer to Bahr and WAL criteria respectively. The WAL method can distinguish cases 3a) from 3b) whereas the Bahr method cannot. ....	94
Table 4.2: Example showing how both methods, using the threshold values established by the authors, lead to different interpretations. ....	95
Table 4.3: Threshold values $\tau_{\kappa_s}$ , $\tau_{\mu_b}$ , $\tau_{\eta}$ and $\tau_{\Sigma}$ , for $r=1$ , $\tau_W=0.1$ and $\tau_Q=0.1$ .....	101
Table 4.4: The Bahr-Q method criteria to characterise geoelectric dimensionality. ....	102
Table 4.5: Bahr parameters and Q, with their corresponding thresholds values, derived from $\tau_W=0.1$ , for tensors A-G from Set 1 (in parenthesis, the dimensionality according to the WAL method). In grey, parameters values greater than the threshold. ....	104
Table 4.6: Dimensionality obtained for tensors A-G using the Bahr method and B-Q method. ....	104
Table 4.7: Dimensionalities obtained from the Groom and Bailey, Bahr, WAL and B-Q methods for site 85_314, COPROD2 set. The B-Q method uses $\tau_{\kappa_s}$ , $\tau_{\mu_b}$ , $\tau_{\eta}$ and $\tau_{\Sigma}$ obtained from $\tau_{WAL}=0.1$ , and $\tau_Q=0.1$ (Table 4.3). The grey area represents the range of periods for which G&B decomposition resulted in large errors. ....	106
Table 4.8: B-Q parameters and dimensionality obtained from the Bahr, B-Q and WAL methods for the data from site 4, BC87 dataset. Parameters shaded in grey are those with values greater than the threshold. ....	108
Table 5.1: Synopsis and numerical examples of the phase tensor and SVD parameters for particular dimensionality cases.....	114
Table 7.1 Site b01 information stored in the worksheet, as an example of the information entered for all sites. ....	159
Table 7.2: Information on the Betics 2004 survey sites: dates and duration of the recordings, equipment used and comments (only an example from site b60 is shown) on the different acquisition runs and recorded bands. Comments are placed on the triangle marks.....	162
Table 8.1: Results from site b23 WAL analysis ( $\tau=0.15$ and $\tau_Q=0.1$ ) and G&B decomposition, using Strike code: 1) Analysis separated in seven period bands, allowing all parameters free. 2) All periods together, all parameters free. 3) Two different analyses at short and long period bands, according to WAL dimensionality results: a) Short periods, fixing distortion parameters to zero (2D without distortion). b) Long periods, allowing all parameters to be free ( $b_1$ : one band, $b_2$ : two bands). Grey backgrounds indicate large misfit values ( $\chi^2/\chi^2_{95\%} \geq 1$ , poor agreement between the data and a 2D or 3D/2D description). ....	181
Table 8.2: Strike analysis 2) results at sites that were identified as possibly 3D/2D in analysis 1). Data has been disposed in ascending Strike value order. ....	183
Table 9.1: Summary of the sites and profiles used to create 2D models from the Internal Zone subset, indicating the inversion code applied, the inverted data (ss: static shift correction), and the rms of the resulting model. ....	198

Table 10.1: rms values of the determinant resistivity and phase between data responses and the original model (bet3D-140) and resized model responses.....	221
Table 10.2: rms values of the determinant resistivity and phase between data and model responses of bet3D-140 and the 5 models with modifications in the vertical extent of the conductive body CF3.....	225
Table 10.3: rms values of the determinant resistivity and phase between data and models responses of bet3D-140 and models bet3D-sep-2.8-3.8 and bet3D-sep-2-3.8, introducing a separation between CF1, F2 and CF3 bodies.....	226
Table D.1: Betics MT dataset site information: Site identification, geographic and geologic location, geographical coordinates, altitude and whether tipper was recorded or not. Evaluated responses: # of periods estimated and period range used in the dimensionality analysis; data quality (see forthcoming text) and % of periods used in modelling. Grey: sites rejected due to the impossibility of doing adequate data processing (not enough long time series, highly contaminated segments or extremely low coherence values).....	269
Table D.2: Band names and sampling frequencies of periods employed in data acquisition using Metronix MS-03 (sites b01 to b41) and Metronix MS-06 (sites b51 to b60) systems. Bands from both systems are aligned according to their sampling frequencies proximity.....	271
Table D.3: Quality data criterion according to $Q_D$ , which considers coherence values and data errors.....	272

# List of Figures

Figure 1.1: Electrical conductivity of Earth materials (modified from Palacky, 1987).....	29
Figure 1.2: Sketch of an Earth model with reference frame axes used in an MT survey and in the analyses of their responses. (x, y, z): measurement system coordinates. x and y are the horizontal axes, where x usually points towards North and y points towards East. The z axis points vertically inward. Commonly, a reference frame rotated around the z axis ( $x'$ , $y'$ , z) is also used. $\theta$ indicates the angle between the $x'$ and x axes. ....	38
Figure 1.3: Schematic representation of the known electromagnetic spectrum. The box corresponds to the part of the spectrum used in magnetotellurics, where the MT sources, targets and investigation depths are indicated. ....	42
Figure 1.4: Power spectrum of natural magnetic field variations. The inset depicts the minimized signal power in the dead band. (Modified from Junge, 1996). ....	43
Figure 1.5: Metronix ADU-06 data logger. ....	45
Figure 2.1: Reference frames used to define the magnetotelluric tensor components: xyz are the axes of the original frame. $x'y'z$ are the new axes after a $\alpha$ clockwise rotation, around the z-axis. ....	54
Figure 2.2: Graphical representation of real and imaginary Mohr circles, generated after a complete rotation of $M_{12}$ and $M_{11}$ components of the MT tensor. Green: real circle and related parameters and angles. Red: idem for imaginary. ....	61
Figure 2.3: Graphical representation of the phase tensor. The lengths of the principal axes are $\Phi_{Max}$ and $\Phi_{min}$ and $\alpha_p - \beta_p$ is the azimuth of the ellipse major axis. N and E correspond to x and y coordinates axes respectively (Modified from Caldwell <i>et al.</i> , 2004). ....	67
Figure 2.4: Phase tensor properties and representations of particular 1D and 2D dimensionality cases. ....	67
Figure 3.1: Plots of $n=10$ and $n=100$ realizations (diamonds) of invariants $I_5$ and Q at periods $T=0.67$ s (high noise level, upper panel), $T=0.0208$ s (medium noise level, middle panel) and $T=21.32$ s (low noise level, lower panel) from site 85_314 (COPROD2 dataset). The mean and standard deviations of these realizations are displayed at the right end of each plot (dot with error bar). Horizontal lines at each plot indicate the true value of the invariant. The shaded areas correspond to the confidence intervals, as obtained from classical error propagation (approach a). ....	77
Figure 3.2: Invariant values at site 85_314 from the COPROD2 dataset and their errors computed in three ways: classical error propagation, Random Gaussian Noise (1000 realizations) and bootstrap resampling (400 realizations from an original sample with 100 elements for each invariant). $I_3$ and $I_4$ (a), (b) and (c); $I_5$ and $I_6$ (d), (e) and (f), $I_7$ (g), (h) and (i) and Q (j), (k) and (l). ....	80
Figure 3.3: Invariant values corresponding to site b23 from the Betic dataset and their errors computed using the three approaches. For random Gaussian Noise, $n=1000$ . In the bootstrap 400 realizations from an original sample with 100 elements for each invariant were used. $I_3$ and $I_4$ (a), (b) and (c); $I_5$ and $I_6$ (d), (e) and (f), $I_7$ (g), (h) and (i) and Q (j), (k) and (l). ....	82
Figure 3.4: Different possibilities for the invariant values and their errors ( $\tau$ = threshold value). (a) $I_k - \sigma_k < \tau$ and $I_k + \sigma_k < \tau$ ; (b) $I_k - \sigma_k > \tau$ and $I_k + \sigma_k > \tau$ ; (c) $I_k < \tau$ and $I_k + \sigma_k > \tau$ ; (d) $I_k > \tau$ and $I_k - \sigma_k < \tau$ and (e) $I_k + \sigma_k > 1$ . Only in case (a) is invariant $I_k$ considered to be zero. ....	84
Figure 3.5: Dimensionality cases for site 85_314 from the COPROD2 dataset using different threshold values: 0.08, 0.10, 0.12, 0.15, 0.20 and 0.30, considering data errors. ....	85
Figure 3.6: Dimensionality cases for sites b01, b23 and b40 from the Betics MT dataset using different threshold values: 0.08, 0.10, 0.12, 0.15, 0.20 and 0.30. ....	86
Figure 3.7: Strike directions and distortion parameters for site b01: (a) analysis A, (b) analysis B. ....	87
Figure 3.8: Strike directions and distortion parameters for site b23: (a) analysis A, (b) analysis B. ....	88
Figure 3.9: Strike directions and distortion parameters for site b40: (a) analysis A, (b) analysis B, (c) and (d): xy and yx apparent resistivities and phases computed directly from the MT tensor and $I_1$ and $I_2$ invariants. ....	89
Figure 3.10: General overview flowchart of WALDIM program. ....	92

Figure 4.1: Bahr thresholds values obtained analytically for different values of the WAL threshold ( $\tau_w$ ) and $r$ . Note that $\tau_w$ is represented on a linear scale and $r$ on a logarithmic scale. ....	99
Figure 4.2: Synthetic model from Weaver <i>et al.</i> (2000). a) Plane view at $z=0$ , b) Vertical cross section at $x'=0$ . ....	103
Figure 4.3: Invariants $I_3 - I_7$ and $Q$ , with their error bars, for 20 recorded periods of site 4 from BC87 dataset. 1% noise level (a, b, c and d) and 10% noise level (e, f, g and h). For invariants $I_7$ and $Q$ (d and h) the biases between the true and statistical values are also presented (continuous line). Horizontal continuous line: threshold value $\tau_w=0.1$ .....	109
Figure 4.4: Bahr parameters with their error bars, for 20 recorded periods of site 4 from the BC87 dataset. Upper line: 1% noise. Lower line: 10% noise. ....	110
Figure 5.1: Representation of the phase tensor ellipses corresponding to the synthetic examples A, B, C and D displayed in Table 5.1. ....	116
Figure 5.2: 3D electrical conductivity regional model used to generate synthetic responses. Black line on XY view indicates the position of the profile. ....	117
Figure 5.3: Ellipse representations of the phase tensor for SIT dataset responses, along with the direction given by $\alpha_p$ , plotted along the profile of the synthetic model for the 11 computed periods. ....	118
Figure 5.4: Cross sections of the phase tensor parameters corresponding to the three datasets computed from the synthetic model, plotted along the profile for the 11 computed periods. Upper panel: original dataset SIT, without errors or distortion. Lower panels: datasets in which distortion has been applied, and error added. Left: SIT1, with 1% error. Right: SIT2.5, with 2.5% error. The plotted parameters are $\Phi_{Max}$ , $\Phi_{min}$ , $\alpha_p$ , $\beta_p$ , $\Phi_{Max}-\Phi_{min}$ and $\sigma_{\alpha_p}$ (only for the datasets with errors). ....	119
Figure 5.5: Normalised biases of $\alpha_p$ for SIT1 and SIT2.5 datasets. The normalised biased is computed as the difference between the statistical and true values divided by the true value of $\alpha_p$ . ....	120
Figure 5.6: Values of phase tensor parameters for the 100 realizations obtained at site 12 and site 14 at $T=1$ s, with 1% error. ....	121
Figure 5.7: Phase tensor ellipses plotted for site 85_314 from COPROD2 dataset, for the different periods registered. ....	122
Figure 5.8: Cross sections of phase tensor related angles plotted along BC87 profile and the registered periods. $\varphi_{Max}$ and $\varphi_{min}$ are the arctangents of parameters $\Phi_{Max}$ and $\Phi_{min}$ . ....	123
Figure 5.9: Phase tensor ellipses plotted for site 4 from the BC87 dataset for the different periods registered. Arrows indicate the direction given by angle $\alpha_p$ . ....	124
Figure 5.10: Plots of $\varphi_{Max}$ , $\varphi_{min}$ , $\alpha_p$ and $\beta_p$ with their error bars for the registered periods of site 4 from the BC87 dataset. ....	125
Figure 5.11: Cross-sections of $\Phi_{Max} - \Phi_{min}$ (from the phase tensor) and WAL invariant $Q$ , for the registered periods along the SIT dataset profile. ....	126
Figure 5.12: Cross-sections of $\varphi_{Max} - \varphi_{min}$ (in radians, from the phase tensor) and WAL invariant $Q$ , for the registered periods. a) SIT dataset (non-distorted data), b) SIT1 dataset (distorted data with 1% error added). ....	126
Figure 5.13: Graphical representations of $Q$ invariant (from WAL) and $\varphi_{Max} - \varphi_{min}$ for site 85_314 from the COPROD2 dataset and site 4 from the BC87. ....	127
Figure 5.14: Groom and Bailey decomposition parameters using different analysis, corresponding to site 4 from BC87 dataset. (a): Non-distortion: data rotated to the direction that minimises diagonal components of the MT tensor (Jones <i>et al.</i> , 1993). (b): G&B decomposition, allowing galvanic distortion, rotating the data $60^\circ$ (Jones <i>et al.</i> , 1993). (c): G&B decomposition, allowing all parameters free. ....	129
Figure 5.15: $\alpha_p$ - $\beta_p$ directions obtained along line BC87c from the phase tensor data. ■: $18^\circ$ (Strike used in the Groom and Bailey decomposition). ....	132
Figure 6.1: Simplified tectonic map of the Western Mediterranean region with the main Alpine compressive chains and Neogene extensional basins (Roca, 2004). ....	138
Figure 6.2: Geological sketch map of the Betic Chain. ....	139
Figure 6.3: Sketch of the relationships between the Internal and External (South Iberian cover) zone units and the Iberian Massif basement in the Central Betics. The scheme proposed is a	

hybrid solution between the different geometries from West to East. (Modified from Frizon de Lamotte, 2004 with data from Navarro-Vilá and García-Dueñas, 1980 and Balanyá, 1991).....	141
Figure 6.4: Sketch of the superposition of two subduction modes in the formation of the Betic-Gibraltar arc, according to Doglioni <i>et al.</i> (1999). .....	143
Figure 6.5: Main tectonic models proposed to explain the opening of the Alboran Basin and coeval thrusting and extension along the Gibraltar Arc (Calvert <i>et al.</i> , 2000) .....	144
Figure 6.6: Bouguer gravity anomalies map of a Southern sector of the Betics (modified from Torné and Banda, 1992). .....	145
Figure 6.7: Total field magnetic anomalies map (data from Ardizzone <i>et al.</i> , 1989) of the Betics and southwestern sector of Iberian Massif. Isomagnetic values in nT. ....	146
Figure 6.8: Location of seismic refraction and reflection profiles in the Betics.....	147
Figure 6.9: Seismic profile BT-3, cross-section and interpretation (Jabaloy <i>et al.</i> , 2005). ....	149
Figure 6.10: Deep seismic profile ESCI-B2. Upper panel: a: upper and lower crust discontinuity. B: Moho. C: Upper Crustal Reflector. Lower panel: sketch of the main crustal structures (modified from Galindo-Zaldívar <i>et al.</i> , 2004). .....	149
Figure 6.11: Seismicity map of the Betic-Alboran-Rif region. Seismic events from 1950 to 2001 and magnitudes $M_b \geq 3$ have been considered (data from IGN, 2001). .....	150
Figure 6.12: Maps of P-velocity anomalies of the Betics crust (after Dañobeitia <i>et al.</i> , 1998). Black triangles: station locations. Circles: hypocentral locations within each layer. ....	151
Figure 6.13: Heat-flow map of the Betic-Alboran region. Isolines in $mW/m^2$ . Dots indicate measurements in oil wells; triangles, water and mining exploration wells; and squares, seafloor heat-flow measurements (modified from Fernández <i>et al.</i> , 1998b). .....	152
Figure 6.14: Location of MT sites and 2D electrical resistivity model. Circled numbers indicate site locations. A, B, C, D and E are the main conductive structures identified and interpreted.....	153
Figure 6.15: Northern portion of TRANSMED Transect I, showing a lithospheric cross-section of the Betic Chain based on geophysical, geological and well data (Frizon de Lamotte <i>et al.</i> , 2004). .....	154
Figure 7.1: Betics sites locations with the corresponding identification, from 94-95 (black) and 2004 (red) surveys. ....	156
Figure 7.2: Bivariate coherences for the horizontal components of the electric field corresponding to the estimated responses of site b01. ....	160
Figure 7.3: xy and yx resistivity and phase responses with their error bars estimated for site b01. ....	160
Figure 7.4: Bivariate coherences for the horizontal components of the electric field computed from sites b16 and b55. ....	164
Figure 7.5: Internal Zone and surroundings sites, whose resistivity curves can be classified in four different morphologies, shown in different colours. ....	166
Figure 8.1a: Contour maps of WAL invariants $I_3$ to $I_7$ and Q at constant periods $T=0.032$ s and $T=0.1$ s. Site locations (black dots) and coastline are given as a reference. Upper left map shows site locations over the main geological features of the study area. ....	171
Figure 8.2: Contour maps of WAL invariants $I_3$ to $I_7$ and Q at two Bostick modified depths, $h_{BM}=100$ m and $h_{BM}=10000$ m. Site locations (black dots) and coastline are given as a reference. Upper left map shows site locations over the main geological features of the study area. ....	173
Figure 8.3: Error values of WAL invariants $I_3$ to $I_7$ and Q at $T=1000$ s. Site locations (black dots) and coastline are given as a reference. Left map shows site locations over the main geological features of the study area. ....	174
Figure 8.4: Dimensionality distribution according to WAL invariants criteria, for the Betics MT dataset, considering data errors, at four representative periods, $T=0.0032$ s, $T=0.1$ s, $T=10$ s and $T=1000$ s. Arrows indicate the strike direction, set in the first quadrant. Cases 3D/2Dtwist and 3D/2D are plotted as a single case (3D/2D). ....	175
Figure 8.5: Dimensionality results of the Betics MT dataset grouped in 7 period bands. Those cases in which the dimensionality could not be determined are not shown. The arrows indicating the strike directions are scaled by the inverse of the error in the determination of the strike. (a) band 1: $T < 0.01$ s, (b) band 2: $0.01$ s – $0.1$ s, (c) band 3: $0.1$ s – $1$ s, (d) band 4: $1$ s – $10$ s, (e) band 5: $10$ s – $100$ s, (f) band 6: $100$ s – $1000$ s, (g) band 7: $T > 1000$ s. I.M.: Iberian Massif, G.B.: Guadalquivir Basin, E.Z.: External Zone and I.Z.: Internal Zone. ....	177

Figure 8.6: Strike directions obtained from Strike analysis 1), for eight sites from the Betics MT dataset, plotted as rose diagrams over the study area. ....	182
Figure 8.7: Phase tensor representation for site b01 at different periods. a) Ellipses and $\alpha_p$ directions. b) Values of $\beta_p$ and errors. ....	185
Figure 8.8: Phase tensor maps of the Betics MT data at different periods. ....	186
Figure 9.1: MT1 resistivity model. A, B, C, D and E are the main conductive structures identified and interpreted (Pous <i>et al.</i> , 1999). ....	191
Figure 9.2: Dimensionality of the MT sites along the MT1 profile, displayed over the resistivity model. Dimensionality cases are period-averaged converted into Bostick-depths (see chapter 8, equation 8.1), including the static shift corrections. $\blackplus$ : 1D; $\circ$ : 2D or 3D/2D; $\bullet$ : 3D/2D and $\blacktriangle$ : 3D. ....	191
Figure 9.3: Sensitivity values of the 2D model MT1 to the MT responses used in the inversion: TE and TM mode, only TE mode and only TM mode. Left: all sites used in the inversion. Right: all sites but sites 17, 34 and 35 located over the deep conductive body. ....	192
Figure 9.4: Location of Internal Betics MT sites and the 3 profiles, EW, NS1 and NS2 along which the three 2D models were constructed. Numbers in circles are the sites projected over one or two of the profiles. ....	195
Figure 9.5 Schematic representation of TE and TM modes according to the profile alignment, a) EW and b) NS, using the same reference frame: x=North and y=East. $xy \equiv E_x/B_y$ , and $yx \equiv E_y/B_x$ . TE: transversal electric mode: Electric field aligned with the Strike direction. TM: transversal magnetic: Magnetic Field aligned with the Strike direction. ....	196
Figure 9.6: Comparison of NS1 profile inversion results, using TM data (upper panel) and TE+TM data, without (middle panel) and with (lower panel) static shift corrections. rms values: 2.14, 6.53 and 5.26 respectively. ....	200
Figure 9.7: 2D models resulting from RLM2DI inversions of TM data, for the three profiles in the Internal Betics. Upper panel, model NS1 (rms=2.14, 57 iterations); middle panel, model EW (rms=2.06, 57 iterations); and lower panel, model NS2 (rms=5.35, 26 iterations). Dashed lines indicate the approximated tie points. ....	201
Figure 9.8: Model NS1 from REBOCC inversion of TM resistivity and phase data. (rms=6.3, 10 iterations). ....	202
Figure 9.9: Model NS1 from REBOCC inversion of TM resistivity and phase and real and imaginary Tipper data. (rms=5.99, 10 iterations). ....	203
Figure 9.10: Model NS1 from DetREBOCC, inverting determinant data (rms=3.23, 10 iterations). ....	204
Figure 9.11: Model NS1 from DetREBOCC, inverting determinant data and tipper (rms=4.19, 10 iterations). ....	204
Figure 9.12: Model NS1 from DetREBOCC, inverting determinant, and after static shift corrections (rms=3.97, 10 iterations). ....	204
Figure 10.1: Horizontal 2D mesh utilised to construct the initial 3D model, superimposed over the geological units and MT site locations. ....	209
Figure 10.2: 3D view of the initial model and mesh, modified to include the Alboran Sea (0.5 $\Omega$ -m) and to reproduce the main geological features. ....	210
Figure 10.3: Situation map and horizontal cross-sections of the most relevant layers of the final 3D model. Situation map: Site locations in red; main geologic zones used in the model description, separated by wide black lines : IM (Iberian Massif), GB (Guadalquivir Basin), PB (Prebetics), SB+GBB (Subbetics + Guadix-Baza Basin) and IZ (Internal Zone). Cross-sections: red dots indicate site locations; narrow lines mark the geological divisions; the depth range of each layer is indicated in the lower-right; abbreviations correspond to the main conductors and resistors described in the text, which are indicated in a larger font at its upper position. C: Conductors R: Resistive. ....	214
Figure 10.4: Geologic map of the central sector of the Betics Internal Zone, with the locations and shapes of the main shallow conductors imaged in this area. The shapes of these conductors are those of its maximum horizontal extension. ....	216
Figure 10.5: Geologic map of the central sector of the Betics Internal Zone, and contours of the top (upper panel) and bottom (lower panel) of conductor CF3. ....	217
Figure 10.6: Vertical sections of the 3D model bet3D-140 along the NS1, NS2 and EW profiles (see Figure 9.4 for locations). Numbers on top indicate site locations projected over the	



vertical section. Sites located on the profile trace are in bold. Inverted triangle: coast line. Framed areas indicate the extent of the 2D models. ....	218
Figure 10.7: Rms maps of the determinant resistivities and phases of the Betics MT sites in reference to bet3D-140 model responses. Numbers on the map indicate site locations. ....	219
Figure 10.8: Model dimensionality using WAL criteria, using $\tau=0.01$ and $\tau_Q=0.1$ . ....	220
Figure 10.9: Horizontal representation of the 3.8 km – 5 km layer corresponding to bet3D-140 model and the two models testing the extension of conductor <b>CF3</b> . In the test model bet3D-1757, the extension of <b>CF3</b> reduced to just beneath sites b17 and b57 (locations indicated as black circles on the plot). In the test model bet3D-ext, the conductor <b>CF3</b> is extended towards the southwest. ....	222
Figure 10.10: Period averaged determinant rms values corresponding to 10% error in the resistivities and $2.9^\circ$ in the phases, calculated for the three models with different extensions of the conductive body <b>CF3</b> . Final model bet3D-140, model bet3D-1757, with the conductor confined below sites b17 and b57; and model bet3D-ext, with the conductor extended towards the southwest. ....	223
Figure 10.11: Rms maps of the determinant resistivities and phases of the Betics MT sites with respect to models bet3D-140 (original), bet3D-1757 (conductor located below sites b17 and b57) and bet3D-ext (conductor extended towards southwest) models. Numbers on the maps indicate site locations. Frames in resistivity maps show the areas of significant differences between the three models. ....	223
Figure 10.12: Vertical sections of the models created to test the depth sensitivity of the <b>CF3</b> conductor. Top: section of the original bet3D-140 model. 1, 2, 3, 4 and 5: sections of the modified models. Numbers in the model names refer to the top and bottom of the modified conductor <b>CF3</b> (e.g. 1: top 3.8 km, bottom 30 km). Framed areas in the model sections indicate modified conductivity zones. Location of the vertical sections is indicated in the plan view of the bet3D-140 model (top left corner). ....	224
Figure 10.13: Vertical sections of the models created to test the sensitivity of the separation between CF1, CF2 and CF3 bodies. Top: section of the original model bet3D-140 model. 1 and 2: sections of the modified models. Numbers in the model names refer to the top and bottom of the zone where conductivity values were replaced by resistive ones (black zones, 20 $\Omega\cdot\text{m}$ ). Location of the vertical sections is indicated in the plan view of the bet3D-140 model (top left corner). ....	226
Figure 10.14: Cross sections of 3D conductivity model bet3D-140 along ESCI-B1 and ESCI-B2 seismic reflection profiles with the main interpreted reflectors and conductors. Framed areas indicate the areas covered by these two seismic profiles. White names identify reflection lines, black letters, conductive bodies. Vertical discontinuous line is the tie line. Inverted triangles: coast line. TVB: top of Variscan Basement reflector; ULCB: upper-lower crust boundary reflector; GBB: Guadalquivir Basin reflector; UCR: upper crust reflector; CGB: Guadalquivir Basin conductor; CF1 and CF3: Filabres conductors. ....	228
Figure 10.15: Superposition of the total magnetic anomaly map (see chapter 6, Figure 6.7) with layer 5 km-7 km (Figure 10.21) from model bet3D-140. Isomagnetic anomaly values are in nT. ....	229
Figure 10.16: Seismicity map of the 3D model area and surroundings, showing only the seismic events from 5 km to 17 km. The coloured background represents the layer 5 km to 7 km of the 3D model bet3D-140. ....	229
Figure 10.17: Tomographic P-velocity anomalies map corresponding to layer 4 km - 12 km ( $\langle v_p \rangle = 5.7$ km/s). The white outline represents the layer 7 km – 9 km of the conductive body CF3. ....	230
Figure 10.18: 3D view of bet3D-140 conductivity model, in which NS, EW as well as NW-SE directed vertical slices and a horizontal slice at 22 km are plotted. A 3D view of the 5 $\Omega\cdot\text{m}$ conductive zone corresponding to the Guadalquivir basin (CGB), and Iberian Massif main features (high resistivity, RIM; and conductive zone CIM) are also plotted. ....	231
Figure 10.19: N45°W vertical cross section of the 3D model plus a 3D representation of the conductive zones (1 $\Omega\cdot\text{m}$ , 2 $\Omega\cdot\text{m}$ and 5 $\Omega\cdot\text{m}$ ) imaged below the Internal Zone. ....	233
Figure 10.20: Transmed Transect I with a NNW parallel cross section of the 3D model projected. ....	234
Figure 10.21: Schematic representation of the position of conductor CF3 in the Internal Zone complexes. ....	237

Figure B.1: The North American Central Plains (NACP) anomaly within the Trans-Hudson orogen. Also shown, the locations of the MT surveys. S: Coprod2 profile. (From Jones *et al.*, 2005) ..... 264

Figure B.2: Magnetotelluric tensor components of site 85\_314 from the COPROD2 dataset. .... 264

Figure B.3: Apparent resistivity and phase computed from MT tensor components of the COPROD2 site 85\_314. .... 265

Figure C.1: BC87 geological setting and location of MT sites. Site 004 is located above Nelson Batholith ..... 267

Figure C.2: Magnetotelluric tensor components of site 004 from the BC87 dataset. .... 268

Figure C.3: Apparent resistivity and phase computed from MT tensor components of site 004 from the BC87 dataset. .... 268

Figure D.1: Resistivity responses ( $\rho_{xx}$ ,  $\rho_{xy}$ ,  $\rho_{yx}$  and  $\rho_{yy}$ ) with error bars for sites 001 to 020 from the Betics MT dataset. .... 273

Figure D.2: Phase responses ( $\varphi_{xx}$ ,  $\varphi_{xy}$ ,  $\varphi_{yx}$  and  $\varphi_{yy}$ ) with error bars for sites 001 to 020 from the Betics MT dataset. .... 275

Figure D.3: Resistivity responses ( $\rho_{xx}$ ,  $\rho_{xy}$ ,  $\rho_{yx}$  and  $\rho_{yy}$ ) with error bars for sites 021 to 040 from the Betics MT dataset. .... 277

Figure D.4: Phase responses ( $\varphi_{xx}$ ,  $\varphi_{xy}$ ,  $\varphi_{yx}$  and  $\varphi_{yy}$ ) with error bars for sites 021 to 040 from the Betics MT dataset. .... 279

Figure D.5: Resistivity responses ( $\rho_{xx}$ ,  $\rho_{xy}$ ,  $\rho_{yx}$  and  $\rho_{yy}$ ) with error bars for sites 041 to 060 from the Betics MT dataset. .... 281

Figure D.6: Phase responses ( $\varphi_{xx}$ ,  $\varphi_{xy}$ ,  $\varphi_{yx}$  and  $\varphi_{yy}$ ) with error bars for sites 041 to 060 from the Betics MT dataset. .... 283

Figure D.7: Real and imaginary parts of x and y tipper components ( $\text{Re}(T_x)$ ,  $\text{Im}(T_x)$  and  $\text{Re}(T_y)$ ,  $\text{Im}(T_y)$ ) for sites 001 to 030 from the Betics MT dataset in which the vertical magnetic component was registered. .... 285

Figure D.8: Real and imaginary parts of x and y tipper components ( $\text{Re}(T_x)$ ,  $\text{Im}(T_x)$  and  $\text{Re}(T_y)$ ,  $\text{Im}(T_y)$ ) for sites 031 to 060 from the Betics MT dataset in which the vertical magnetic component was registered. .... 287

Figure D.9: Real induction arrows following Parkinson convention (inverted, i.e. pointing at conductive regions) plotted for all sites from the Betics MT dataset. .... 289

Figure E.1: Determinant resistivity data and model responses. Sites 1 to 21. .... 292

Figure E.2: Determinant phase data and model responses. Sites 1 to 21. .... 293

Figure E.3: Determinant resistivity data and model responses. Sites 23 to 41. .... 294

Figure E.4: Determinant phase data and model responses. Sites 23 to 41. .... 295

Figure E.5: Determinant resistivity data and model responses. Sites 51 to 60. .... 296

Figure E.6: Determinant phase data and model responses. Sites 51 to 60. .... 297

Figure E.7: xy and yx resistivity data and model responses. Sites 1 to 21. .... 298

Figure E.8: xy and yx phase data and model responses. Sites 1 to 21. .... 299

Figure E.9: xy and yx resistivity data and model responses. Sites 23 to 41. .... 300

Figure E.10: xy and yx phase data and model responses. Sites 23 to 41. .... 301

Figure E.11: xy and yx resistivity data and model responses. Sites 51 to 60. .... 302

Figure E.12: xy and yx phase data and model responses. Sites 51 to 60. .... 303

# Nomenclature, Abbreviations and Terminology

## Nomenclature

$\vec{E}$ (V/m)	electric field	$\rho$ ( $=1/\sigma$ )( $\Omega \cdot \text{m}$ )	electric resistivity
$\vec{H}$ (A/m)	magnetic field	$\varepsilon$ (F/m)	dielectric permittivity
$\vec{B}$ (T)	magnetic induction	$\mu$ (H/m)	magnetic permeability
$\vec{D}$ (C/m <sup>2</sup> )	electric displacement	t (s)	time
$\rho_V$ (C/m <sup>3</sup> )	electric charge density (free charges).	$\omega$ (rad/s)	angular frequency
$\vec{j}$ (A/m <sup>2</sup> )	current density	$f$ (Hz)	frequency
$\sigma$ (S/m)	electric conductivity	T (s)	period
		$\delta$ (m)	skin depth
$\underline{Z}(\omega)$ ( $\Omega$ )	impedance tensor (2x2)		
$\underline{M}(\omega)$ (m/s)	magnetotelluric tensor (2x2) <sup>(1)</sup>		
$\rho_{ij}(\omega)$ ( $\Omega \cdot \text{m}$ )	apparent resistivity <sup>(2)</sup>		
$\varphi_{ij}(\omega)$ ( $^\circ$ )	phase		
$\vec{T}$	tipper vector (x,y components)		

<sup>1</sup>  $\underline{M}_R$  regional tensor;  $\underline{M}_m$  measured tensor;  $\underline{M}_{2D}$  two-dimensional tensor;  $\underline{M}'$  measured in a rotated reference frame.

<sup>2</sup>  $ij=xx,xy,yx,yy$ ; or  $ij=11,12,21,22$ ; or  $ij=TE$  (transversal electric), TM (transversal magnetic), 1D (one-dimensional), 2D (two-dimensional).

$\alpha$ ( $^{\circ}$ )	arbitrary rotation angle
$\theta$ ( $^{\circ}$ )	strike angle
$C$	galvanic distortion matrix (2x2)
$\varphi_t, \varphi_e, \varphi_s$ ( $^{\circ}$ )	twist, shear and anisotropy angles (Groom & Bailey notation)
$g, t, e, s$	gain, twist, shear and anisotropy parameters (Groom & Bailey notation)
$g_1, g_2$	distortion parameters (Smith notation)
$\phi_1, \phi_2$ ( $^{\circ}$ )	distortion angles (Smith notation)
$\text{var}(x)$	variance of magnitude x
$\sigma_x$ (or $\sigma(x)$ )	standard deviation of x
$\delta_x$ (or $\delta(x)$ )	error of x
xyz and x'y'z'	reference frames and reference frame rotated around z axis
$R_{\alpha}, R_{\alpha}^T$	clockwise rotation matrix and its transpose
$S_1, S_2, D_1, D_2$ (m/s)	modified impedances
$\kappa, \mu, \eta, \Sigma$	Bahr invariant parameters
$\zeta_i = \xi_i + \eta_i i$ (m/s)	linear combinations of $M_{ij}$ components (i=1,2,3,4)
$d_{ij}$	complex parameters computed from $\zeta_i$ and $\zeta_j$
$I_1$ (m/s), $I_2$ (m/s), $I_3, I_4, I_5, I_6, I_7, Q$	WAL rotational invariant parameters
$\alpha, \beta, \gamma, \delta$ ( $^{\circ}$ )	Mohr circle related angles
$\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_D$ ( $^{\circ}$ )	strike angles obtained for different dimensionality cases from WAL criteria
$X, Y$ (m/s)	real and imaginary parts of tensor $\underline{M}$
$\Phi$	phase tensor (2x2)
$S$	singular matrix of the phase tensor
$\Phi_{\text{Max}}, \Phi_{\text{min}}$	maximum and minimum components of the singular matrix S
$\varphi_{\text{Max}}, \varphi_{\text{min}}$ ( $^{\circ}$ )	arctangents of $\Phi_{\text{Max}}$ and $\Phi_{\text{min}}$
$\alpha_P$ and $\beta_P$ ( $^{\circ}$ )	phase tensor related angles. $\beta_P$ = phase tensor skew
$\text{rndG}(x)$	pseudo-random number following a Gaussian distribution with average zero and standard deviation x
$n$	number of realizations
$N$	number of resamples
$\tau_x$	threshold value for a magnitude x

## Acronyms and Abbreviations

MT	Magnetotelluric Method
TE	Transversal electric
TM	Transversal magnetic
1D	one-dimensional
2D	two-dimensional
3D	three-dimensional
3D/2D	galvanic distortion over a regional 2D
3D/2Dtwist	galvanic distortion (only twist component) over a regional 2D
3D/1D2D	galvanic distortion over a regional 1D or regional 2D (indistinguishable)
3D/2Ddiag	galvanic distortion over a regional 2D resulting in a diagonal tensor
WAL	Weaver <i>et al.</i> (2000)
B-Q	Bahr-Q method
RR	Remote reference
DG-UB	Departament de Geodinàmica i Geofísica. Universitat de Barcelona
DG-UG	Departamento de Geodinámica. Universidad de Granada
MS03	Metronix equipment, 1 <sup>st</sup> generation
GMS-06	Metronix equipment, 2 <sup>nd</sup> generation
ADU-06	Metronix data logger
MFS-06	Metronix coils

## Terminology

true value (x)	value of a magnitude computed directly from the values of the magnitudes from which it is dependent
statistical value (x')	value of a magnitude obtained as the mean value of different estimations of the magnitudes from which it is dependent by using random values of these magnitudes inside their error bars.
bias	absolute value of the difference between the statistical and true values of the same magnitude



# Resum

## Introducció, Objectius i Estructura

Des de les dècades dels 80 i 90, la majoria d'estudis corticals i litosfèrics inclouen – de manera complementària a altres propietats geofísiques – la caracterització de la conductivitat elèctrica del subsòl que aporta una informació molt valuosa a l'hora d'interpretar l'estructura i evolució tectònica d'una determinada zona (p.ex. Jones, 1992; Hjelt and Korja, 1993; Brown, 1994; Nover, 2005; i referències incloses). Degut al seu ampli rang de variació, la conductivitat elèctrica aporta informació independent de les propietats físiques de l'escorça, inaccessible mitjançant altres mètodes geofísics, com ara la sísmica.

La conductivitat elèctrica és molt sensible a un ampli rang de paràmetres petrològics i geofísics: l'abundància i distribució de minerals conductors, el volum i forma dels porus en les roques i la conductivitat dels fluids circulant per aquests porus. En els primers centenars de metres, aquestes propietats estan controlades per les litologies més superficials, salinitat i contingut d'aigües subterrànies, distribució de les fractures i contingut d'argiles. En l'escorça terrestre, estan controlades per les unitats geològiques, les concentracions i connectivitat de materials metàl·lics i grafit, zones de fractura, fases aquoses i temperatura. Al mantell superior, altres processos, com ara fusió parcial i possiblement difusió d'hidrògen, juguen un paper important.

La conductivitat elèctrica del subsòl a escales corticals o inferiors s'obté normalment mitjançant sondeigs magnetotel·lúrics. El mètode magnetotel·lúric (MT) utilitza energia electromagnètica de font natural per a caracteritzar les propietats elèctriques de les estructures

del subsòl, permet un marge molt ampli de penetració, és sensible a variacions laterals i verticals de la conductivitat i permet caracteritzar estructures volumètriques.

En aquest context, la Serralada Bètica (o Bètiques) és un orogen Alpí situat a la part més occidental de la Mediterrània, en el que els estudis d'MT poden contribuir a augmentar el coneixement de la seva estructura cortical, mitjançant els models geoelectrics resultants. En aquesta tesi s'han processat, modelitzat i interpretat dades de la part central de les Bètiques, procedents de campanyes anteriors i de la campanya realitzada dins d'aquesta tesi (2004).

Una part molt important en qualsevol estudi d'MT és l'anàlisi de la dimensionalitat de les dades, en particular del tensor magnetotel·lúric, que permet modelitzar les estructures com a 1D, 2D o 3D.

Les dades MT poden estar afectades de distorsions, que emmascaren la dimensionalitat de les estructures geoelectriques. Aquestes distorsions s'han d'identificar i corregir, o, alternativament, incloure-les en la modelització.

Existeixen diferents mètodes per a realitzar l'anàlisi de la dimensionalitat i la identificació i correcció de les distorsions, que han contribuït significativament al desenvolupament del mètode magnetotel·lúric. No obstant, la majoria d'aquests mètodes es centren en un tipus determinat de dimensionalitat, utilitzant un conjunt particular de paràmetres que caracteritzen només una part del tensor magnetotel·lúric. Com a conseqüència, en diverses ocasions aquests mètodes s'han utilitzat incorrectament, enlloc de limitar la seva aplicació a ser simplement una eina per al contrast d'hipòtesis. Aquest fet comporta sovint una modelització automàtica 2D de les dades. En comptes d'això, caldria fer una anàlisi més acurat de la dimensionalitat de les dades, per tal de poder limitar per a quin subconjunt de dades és vàlida cada descripció de la dimensionalitat.

En aquest sentit, la primera part de la tesi s'ha concentrat en l'anàlisi de la dimensionalitat. S'han estudiat i comparat diferents mètodes, alguns ben coneguts i altres més recents, emfatitzant en solucionar els problemes associats a les dades reals, on cal considerar els errors i la no correspondència amb els casos ideals. Tota aquest treball ha estat guiat per la idea que és necessari treballar amb el màxim d'informació possible de les dades, en aquest cas, les components del tensor MT, i que cal assumir que les dades són 3D, amb casos particulars en que poden ser 1D o 2D. Aquesta recerca ha estat realitzada utilitzant les bases de dades COPROD2 i BC87 (ben conegudes per la comunitat MT, apèndixs B i C), dades de models sintètics, i dades adquirides a la part central de la Serralada Bètica.

La segona part de la tesi ha consistit en l'estudi magnetotel·lúric de la part central de la Serralada Bètica. Aquest estudi ha comprès l'adquisició i processat de les dades, l'anàlisi de la dimensionalitat, en el qual s'han aplicat algunes de les millores desenvolupades en la primera part; i la modelització. Gràcies als avenços en tècniques informàtiques, especialment en velocitat i capacitat de memòria, es va construir un model geoelectric 3D de l'estructura cortical



de les Bètiques centrals. Prèviament, es va fer una revisió del model 2D ja existent, i es van crear nous models 2D com a imatges prèvies del model 3D.

Així, els objectius d'aquesta tesi es poden resumir en dos:

- 1) realitzar un estudi dels mètodes d'anàlisi de la dimensionalitat en dades d'MT, i crear unes eines útils per a realitzar aquest anàlisi en dades afectades de soroll.
- 2) obtenir un model geoelectric de l'estructura cortical de la part central de la Serralada Bètica, a partir d'un estudi complert de les dades adquirides amb anterioritat i al llarg de la realització de la tesi.

La memòria de la tesi s'ha organitzat en tres parts principals:

Part I: "Introducció al Mètode Magnetotel·lúric". S'introdueixen els fonaments del mètode MT i els principals elements en qualsevol estudi (capítol 1). En el capítol 2 s'expliquen amb més detall els mètodes utilitzats en l'anàlisi de la dimensionalitat. Aquests mètodes són els invariants de WAL, els paràmetres de Bahr, i el tensor magnetotel·lúric de les fases, amb què s'han basat els aspectes metodològics desenvolupats en aquesta tesi.

Part II: "Contribucions Metodològiques a l'Estudi de la Dimensionalitat Geoelectrica". En aquesta part es presenten els estudis realitzats en l'anàlisi de la dimensionalitat. El capítol 3 mostra com implementar el criteri dels invariants de WAL en dades afectades de soroll, incidint en la propagació d'errors i en la determinació del valor l·lindar. S'ha creat un programa informàtic (WALDIM) per implementar el mètode proposat. El capítol 4 proposa la unificació dels criteris de WAL i Bahr, fent-los compatibles. El capítol 5 presenta un estudi del tensor magnetotel·lúric de les fases, com a una nova eina per determinar la dimensionalitat. S'aplica a diferents dades sintètiques i reals, i es compara amb altres mètodes.

Part III: "Estudi Magnetotel·lúric de l'estructura cortical de les Bètiques Centrals". En aquesta part es mostra tota la recerca portada a terme a la part central de les Bètiques. El marc geològic i geofísic es presenta al capítol 6. El capítol 7 explica els processos d'adquisició i processat de dades, que inclouen l'ús de diferents instruments i eines de processat, així com una descripció de les respostes MT obtingudes, i la seva qualitat. El capítol 8 mostra els resultats de l'anàlisi de la dimensionalitat, utilitzant el programa WALDIM, i contrastant-los amb altres mètodes. En el capítol 9 es presenta una revisió del model 2D MT previ i els resultats dels nous models 2D obtinguts mitjançant diferents algorismes d'inversió a la Zona Interna de les Bètiques. El capítol 10 descriu la construcció del model 3D, el model resultant, els ajustos de les respostes i la interpretació i discussió del model.

Finalment es presenten les conclusions de la tesi i les perspectives de futur, tant en el context de la dimensionalitat com en el coneixement de l'estructura geoelectrica de les Bètiques.

Aquesta memòria es complementa amb sis apèndixs: expressions dels errors dels invariants de WAL, informació dels conjunts de dades utilitzats, detalls de l'adquisició de les dades MT de les Bètiques i les seves respostes, comparacions entre les respostes de les dades i del model 3D, i una demostració matemàtica.

Part del treball desenvolupat en aquesta tesi ha estat publicada en tres articles en la revista *Geophysical Journal International*:

Ledo, J.J., Queralt, P., Martí, A. and Jones, A.G., 2002. Two-dimensional interpretation of three-dimensional magnetotelluric data: an example of limitations and resolution. *Geophys. J. Int.*, **150**, 127-139.

Martí, A., Queralt, P. and Roca, E., 2004. Geoelectric dimensionality in complex geologic areas: application to the Spanish Betic Chain. *Geophys. J. Int.*, **157**, 961-974.

Martí, A., Queralt, P., Jones, A.G. and Ledo, J.J., 2005. Improving Bahr's invariant parameters using the WAL approach. *Geophys. J. Int.*, **163**, 38-41.

Actualment, es troba en preparació un quart article sobre la modelització 3D i interpretació de les dades MT de la part central de les Bètiques.

A continuació es presenta un resum dels capítols desenvolupats dins de les dues parts principals de la tesi: **Contribucions Metodològiques a l'Estudi de la Dimensionalitat Geolèctrica i Estudi Magnetotel·lúric de l'Estructura Cortical de la Part Central de la Serralada Bètica**. Aquest resum finalitza amb la presentació de les contribucions i conclusions finals de la tesi i les perspectives de futur.

## **Contribucions Metodològiques a l'Estudi de la Dimensionalitat Geolèctrica**

Tal com ja s'ha dit, el principal objectiu d'aquesta part ha estat fer un estudi crític dels principals mètodes per a l'anàlisi de la dimensionalitat geolèctrica a partir del tensor d'impedàncies o el tensor magnetotel·lúric. Els mètodes investigats han estat els criteris dels invariants de WAL (Weaver *et al.*, 2000), els paràmetres invariants de Bahr (Bahr, 1991) i el tensor magnetotel·lúric de les fases (Caldwell *et al.*, 2004), tots ells explicats al capítol 2.

### **Capítol 3: Anàlisi d'errors i valors llinars en els invariants rotacionals de WAL**

En aquest capítol es desenvolupen diferents aspectes analitzats en l'estimació d'errors dels invariants de WAL i la determinació del valor llinar a utilitzar en l'anàlisi de la dimensionalitat. Així, es proposa un nou mètode que permet la caracterització de la

dimensionalitat geoelectrica en situacions reals. Addicionalment, s'ha creat un programa informàtic per a poder implementar aquest mètode.

El mètode de WAL utilitza set paràmetres del tensor magnetotellúric ( $\underline{M}$ ) que són independents i invariants sota rotacions (invariants), i el paràmetre depenent, també invariant, Q ( $I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6, I_7$  i Q). Els criteris de dimensionalitat es basen en l'anul·lació o no anul·lació d'alguns d'aquests paràmetres ( $I_1$  i  $I_2$  no s'utilitzen ja que aporten informació sobre la magnitud de la resistivitat però no de la dimensionalitat). Els casos de dimensionalitat que es poden determinar són: 1D, 2D o 3D, i els casos afectats de distorsió galvànica: 3D/1D2D, 3D/2Dt<sub>wist</sub>, 3D/2D<sub>diag</sub> i 3D/2D (Taula 2.2).

No obstant, fora de les condicions ideals, és a dir, degut a l'error de les dades i a que les estructures reals mai s'ajusten a casos perfectament 1D, 2D o 3D, és necessari introduir un valor llindar per a poder discernir entre diferents tipus de dimensionalitat. Altrament, els invariants mai podrien ser considerats nuls i es tindrien sempre estructures 3D. Donat que els invariants utilitzats en els criteris de la dimensionalitat són adimensionals i estan normalitzats a la unitat, es pot utilitzar el mateix valor llindar per a tots ells.

Així, s'ha realitzat un estudi del mètode de WAL per tal de fer-lo extensiu a l'anàlisi de la dimensionalitat en dades reals afectades de soroll i tenint en compte fins a quin punt les estructures geoelectriques es poden aproximar als casos ideals 1D, 2D i 3D. Per a dur a terme aquesta tasca, s'han investigat la propagació d'errors de les dades als invariants i els valor llindars a utilitzar per a establir els criteris de dimensionalitat.

Pel que fa a l'estimació dels errors, s'han abordat tres mètodes utilitzant dades reals amb soroll (estacions 85\_314 de la base de dades COPROD2 i b23 de les dades MT de les Bètiques): propagació clàssica d'errors (apèndix A), generació de soroll gaussià, i mètodes de remostreig, concretament el Bootstrap. D'entre aquests mètodes, la propagació clàssica d'errors ha demostrat ser la més estable per a l'estimació dels errors dels invariants, mentre que la generació de soroll gaussià és més adequada per a l'estimació de la direcció de l'*strike* i els angles de distorsió.

Per a la determinació del valor llindar, s'ha treballat amb les mateixes dades reals, tenint en compte els seus errors. D'aquesta manera, per tal d'establir si un invariant és nul o no, cal tenir en compte la seva barra d'error i la seva posició respecte l'error llindar (Figura 3.4). S'han analitzat els resultats de l'anàlisi de la dimensionalitat, amb les corresponents direccions d'*strike*, angles de distorsió i errors, havent utilitzat diferents valors llindars. L'objectiu ha estat trobar un rang de valors llindars que donin uns tipus de dimensionalitat coherents amb els paràmetres associats, per exemple: que en els casos 2D, la direcció de l'*strike* quedi determinada amb un error baix. Per a les dades utilitzades, amb una qualitat de les dades mitja - alta, aquest rang de valors és de 0.1 a 0.15.

Com a producte d'aquest treball, s'ha creat un programa informàtic per a dur a terme l'anàlisi de la dimensionalitat de dades MT utilitzant els criteris de WAL i considerant que les dades poden estar afectades de soroll (Figura 3.10). El programa permet a l'usuari determinar el tipus d'estimació dels errors, triar el valor llindar dels invariants, i classificar i promitjar els resultats per rangs de períodes. Aquest programa, anomenat WALDIM, ha estat provat amb èxit en diferents conjunts de dades.

#### **Capítol 4: Millora dels paràmetres de Bahr mitjançant el mètode de WAL**

Amb anterioritat als criteris de WAL, els paràmetres de Bahr ( $\kappa$ ,  $\mu$ ,  $\eta$  i  $\Sigma$ ) (Bahr, 1991; amb modificacions de Szarka, 1999) han estat, i són encara, molt utilitzats per a fer l'anàlisi de la dimensionalitat. Aquests paràmetres són quatre, també invariants sota rotacions, i permeten establir uns criteris (Taula 2.1) basats en uns valors llindar definits per l'autor, per a classificar els tipus de dimensionalitat i la distorsió de que poden estar afectats.

No obstant, aquests criteris sovint han estat utilitzats inadecuadament. Particularment, per al paràmetre  $\eta$  (Skew regional), utilitzat per a identificar si la dimensionalitat és 3D, sovint s'imposa en ambdós sentits una condició que només és vàlida en un, fet que porta a interpretacions incorrectes.

Al costat dels criteris de WAL, que utilitzen 8 paràmetres, l'ús de només quatre paràmetres en Bahr porta també a ambigüitats i a no poder distingir els mateixos casos de dimensionalitat que utilitzant el mètode de WAL. A més a més, els valors dels llindars usats en cadascun dels mètodes porten a diferents descripcions de la dimensionalitat (Taula 4.1).

És per això que s'ha treballat en fer una comparació entre els mètodes de WAL i Bahr, i en modificar el mètode de Bahr, ja que és el que no aporta tanta informació com el mètode de WAL i el que dona lloc a més ambigüitats, per tal de fer ambdós mètodes equivalents.

Inicialment s'han calculat les relacions analítiques entre els paràmetres de Bahr i els de WAL, posant els primers en funció dels segons, concretament dels invariants  $I_3$ ,  $I_4$ ,  $I_5$ ,  $I_6$ ,  $I_7$  i  $Q$ , i  $r$ , definit com el quocient entre  $I_2$  i  $I_1$  (veure equacions 4.2).

A partir d'aquestes relacions, s'han determinat els valors que han de prendre els paràmetres de Bahr, en els casos ideals de dimensionalitat definits pels criteris de WAL, és a dir, fixant els invariants de WAL a valors iguals o diferents a zero. Així, s'han obtingut les següents condicions, que modifiquen els criteris de Bahr:

- a) Si la dimensionalitat és 1D o 2D, el paràmetre  $\mu$  ha de ser nul.
- b) Les condicions  $\kappa \neq 0$  i  $\mu \neq 0$  no són necessàries per a la tridimensionalitat.
- c) Si l'estructura no és 3D,  $\eta = 0$  (el contrari no té perquè complir-se).

El següent pas ha estat redefinir uns nous valors llandars per als paràmetres de Bahr a partir de les relacions analítiques i del llandar utilitzat en WAL,  $\tau_w$ . Aquests nous llandars també depenen de  $r$ , ja que el valor d'aquest paràmetre no ve condicionat pel tipus de dimensionalitat.

Analíticament és impossible trobar exactament aquestes relacions, ja que la condició per a cada tipus de dimensionalitat és que els valors dels paràmetres estiguin dins d'uns determinats rangs (per sobre o per sota d'un valor llandar), sense que aquests valors siguin iguals entre ells ni que prenguin valors concrets.

És per aquesta raó que s'ha abordat el problema mitjançant dos desenvolupaments diferents:

- 1) Desenvolupament analític aproximat, en el que es suposa que tots els invariants de WAL prenen un mateix valor llandar,  $\tau_w$ . A partir d'aquí es van determinar les expressions, aproximades, dels llandars dels paràmetres de Bahr,  $\tau_\kappa$ ,  $\tau_\mu$ ,  $\tau_\eta$  i  $\tau_\Sigma$  (equacions 4.8 i Figura 4.1).
- 2) Desenvolupament estadístic: per cada tipus de dimensionalitat es van generar valors aleatoris per cadascun dels invariants, per sobre o per sota del valor llandar, segons correspongués. A partir de cada generació de valors, es van calcular els quatre paràmetres de Bahr, tenint en compte les relacions analítiques (equacions 4.2), agafant el valor  $r = 1$  (aproximació vàlida per a dades experimentals). Finalment, es van calcular els promigs i desviació d'aquestes realitzacions i es van obtenir els nou valors dels llandars de Bahr. Aquest desenvolupament es va realitzar per a diferents valors de  $\tau_w$ .

Dels resultats del segon desenvolupament, s'han pogut constatar les equivalències entre els llandars de Bahr i de WAL, algunes ja trobades en el primer. Els nous llandars obtinguts són, en conjunt, significativament diferents dels anteriorment definits per Bahr. També s'han establert les noves condicions de dimensionalitat, ara igualades a les de WAL. No obstant, ja que Bahr utilitza un paràmetre menys, aquest mètode no pot distingir entre els casos 3D/1D2D i 3D/2Dtwist.

Aquesta ambigüitat s'ha resolt mitjançant l'addició de l'invariant Q als paràmetres de Bahr. Així, es va definir el mètode Bahr-Q (taula 4.4), que utilitza els quatre paràmetres de Bahr,  $\kappa$ ,  $\mu$ ,  $\eta$  i  $\Sigma$ , l'invariant Q, i els corresponents llandars redefinits  $\tau_\kappa$ ,  $\tau_\mu$ ,  $\tau_\eta$ ,  $\tau_\Sigma$  i  $\tau_Q$ , per a obtenir un anàlisi de la dimensionalitat equivalent al de WAL. El nou mètode ha estat verificat amb dades sintètiques i reals, amb diferents nivells de soroll.

## Capítol 5: Aplicació del tensor magnetotel·lúric de les fases i comparació amb altres mètodes

L'objectiu d'aquest capítol ha estat el d'analitzar el tensor magnetotel·lúric de les fases (o tensor de les fases) i aplicar-lo a dades sintètiques i reals per a determinar la resolució dels seus paràmetres, comparar-lo amb els mètodes de WAL, i Groom and Bailey (1989), aquest darrer utilitzat per a la descomposició del tensor d'impedàncies. Finalment, s'ha fet un ajust de la informació aportada pel tensor de les fases a una descripció 2D de les dades.

El tensor de les fases,  $\Phi$ , és un tensor real de 2x2 components, que es defineix com la fase del tensor magnetotel·lúric  $\underline{M}$  (equació 2.28). El tensor de les fases no es veu afectat de distorsió galvànica, però en canvi no és invariant rotacional. Per als diferents tipus de dimensionalitat, 1D, 2D o 3D, el tensor pren expressions i representacions gràfiques particulars, i, juntament amb l'anàlisi dels valors de quatre angles,  $\alpha_p$ ,  $\beta_p$ ,  $\varphi_{Max}$  i  $\varphi_{min}$  (menys el primer, tots invariants rotacionals), permeten utilitzar-lo per a discernir el tipus de dimensionalitat. No obstant, al ser invariant sota distorsió, no permet distingir si les dades n'estan afectades o no.

Després d'exemplificar les expressions del tensor de les fases per als diferents tipus de dimensionalitat, el tensor de les fases, així com els seus errors, s'han calculat per a dades corresponents a un model sintètic (Ledo *et al.*, 2002b), a les que se'ls hi ha afegit errors i distorsió i per a les dades de les estacions 85\_314 de COPROD2 i 14 del BC87. En tots els casos, els errors s'han determinat mitjançant la generació de soroll gaussià. Els resultats mostren que la dimensionalitat determinada mitjançant el tensor de les fases s'adiu, en el primer cas, a l'estructura del model sintètic, i en els altres, a la dimensionalitat determinada amb els mètodes de WAL i Bahr-Q. Pel que fa als efectes dels errors i a la distorsió, se n'han tret les següents conclusions:

- 1) Els errors dels angles del tensor de les fases, així com els biaixos entre els seus valors reals i estadístics, són importants, fins i tot amb nivells de soroll de les dades molt baix (1% i 2.5%).
- 2) En casos de distorsió extrema (angles de *twist* i *shear* propers a 45°), el tensor de les fases no és invariant, i els valors de  $\varphi_{Max}$  i  $\varphi_{min}$  prenen valors extremadament elevats.

En la comparació entre el tensor de les fases i els invariants de WAL, s'ha trobat una coincidència entre la diferència d'angles  $\varphi_{Max} - \varphi_{min}$  i l'invariant rotacional  $Q$ , quan les dades no estan afectades de distorsió galvànica. Pel contrari, en presència de distorsió,  $\varphi_{Max} - \varphi_{min}$  segueix tenint el mateix valor, mentre que el valor de  $Q$  varia ( $Q$  no és invariant sota distorsió, excepte en el cas 3D/1D2D), i, per tant, aquesta equivalència desapareix. Aquesta relació entre la equivalència o no depenent de l'existència o no de la distorsió galvànica obre la porta a un

mètode per a poder identificar la distorsió galvànica, fins i tot en casos 3D, on els altres mètodes no permeten fer-ho.

El mètode de Groom and Bailey (1989) (G&B) consisteix en la descomposició del tensor d'impedàncies com el producte d'una matriu de distorsió afectant un tensor 2D, més una rotació. Donat que la distorsió galvànica és independent del període de mesura, si en una mateixa estació s'obtenen els mateixos paràmetres de distorsió, i entre diferents estacions una mateixa direcció d'*strike*, és possible recuperar el tensor regional 2D per a una posterior modelització. Aquest mètode es va comparar amb el tensor de les fases, ja que ambdós permeten recuperar la direcció de l'*strike*. Utilitzant el site 14 del BC87, de la qual se'n coneixen diferents descomposicions obtingudes a partir de G&B (Jones *et al.*, 1993), s'han pogut constatar les diferències entre els dos mètodes, degudes a la hipòtesis de bidimensionalitat que s'aplica en G&B, i al fet de treballar només amb la informació de les fases (la meitat de la del tensor magnetotel·lúric) en el tensor de les fases.

Finalment, s'ha desenvolupat un codi per a ajustar les dades del tensor de les fases a un model 2D, similarment al mètode de G&B. Els resultats han estat bastant inconsistents, degut al limitat nombre de dades amb que es treballa, pel fet ja citat, de treballar amb la meitat de la informació del tensor d'impedàncies.

## **Estudi Magnetotel·lúric de l'Estructura Cortical de la Part Central de la Serralada Bètica**

### **Capítol 6: Context geològic i geofísic**

Aquest capítol recull una descripció geològica general i el coneixement geofísic de la Serralada Bètica i el Mar d'Alborà, amb l'objectiu de restringir la posterior interpretació de les dades magnetotel·lúriques adquirides a la part central de les Bètiques.

La Serralada Bètica (o Bètiques) (Figura 6.1) és una serralada alpina situada a l'extrem occidental del Mediterrani. S'estén des del Golf de Càdis fins al Cap de la Nao, i continua cap al nord-est fins a les Illes Balears. Juntament amb la cadena del Rif a Àfrica, formen un arc orogènic que envolta l'actual Conca d'Alborà. Aquest arc es va formar com a conseqüència de la convergència entre les plaques Africana i Ibèrica des del Cretaci Superior (60 Ma).

Segons la seva evolució geològica, la Serralada Bètica es divideix en dues zones ben diferenciades estratigràficament i estructural: la *Zona Externa* i la *Zona Interna* (Figura 6.2).

La **Zona Externa** està constituïda per la cobertura Mesozoica del paleomarge Sud Ibèric de l'antic oceà Tethys i aflora a la part nord-est de la serralada. Comprèn les zones *Prebètica*, formada per sediments marins poc profunds, i *Subbètica*, formada per fàcies pelàgiques i materials volcànics.

Entre les zones Externa i Interna, hi ha les unitats del *Flysch*, sediments marins profunds, que estructuralment se situen, en general, per sota de la Zona Interna.

La **Zona Interna**, al sud-est, està formada per roques metamòrfiques del Paleozoic i Mesozoic pertanyents al Domini d'Alborà (Balanyà i García-Dueñas, 1987). La seva estructura és molt complexa, formada per diverses làmines encavalcants emplaçades durant el Miocè, i posteriorment afectades per falles normals de baix angle, durant l'obertura de la Conca d'Alborà (finals de l'Oligocè-Miocè). Aquestes falles extensionals s'associen al desenvolupament de les conques intramontanyoses en el Neogen i Quaternari. Una d'aquestes conques, a la zona del Cap de Gata, inclou roques calc-alcalines del vulcanisme del Neogen.

D'acord amb els registres estratigràfics i les condicions de metamorfisme, les diferents làmines encavalcants de la Zona Interna es divideixen en tres complexos metamòrfics separats per falles normals de gran angle. D'inferior a superior, aquests són: el complex Nevado-Filábride, l'Alpujarride i el Maláguide-Dorsal (Figura 6.3).

La Serralada Bètica encavalca sobre el Massís Ibèric, pertanyent a la orogènica Varisca. Prop de la Serralada Bètica, el Massís Ibèric és cobert pels sediments neogens de la Conca de Guadalquivir, que, elongada ENE-WSW, constitueix la conca d'avantpaís de la Serralada Bètica.

En l'actualitat, s'accepta que l'evolució geodinàmica de la regió Bètica-Alborà-Rif (BAR) inclou un estadi de subducció i acreció orogènica, seguida d'un estadi de compressió al llarg de l'arc de Gibraltar, coetània a una extensió que va obrir la Conca d'Alborà. No obstant queden qüestions a resoldre sobre aquests processos, dels que se n'han proposat diferents models geodinàmics: Sobre la subducció inicial (Doglioni *et al.*, 1999, veure Figura 6.4; Jolivet and Faccenna, 2000); i sobre la natura de la compressió i extensió i simultànies. D'aquest darrer, se n'han proposat principalment tres models (Figura 6.5): a) Destitució convectiva de litosfera engruixida (Platt and Vissers, 1989); b) Col·lapse gravitatori d'una litosfera engruixida (Seber *et al.*, 1996); i c) regressió cap al oest d'un fragment de la placa Africana subduït (Royden, 1993; Lonergan and White, 1997; Gutsher *et al.*, 2002).

Dins d'aquest context geodinàmic, un nombre significant d'estudis geofísics realitzats mostren que l'estructura de l'escorça i litosfera de les Bètiques és molt complex i difícil de caracteritzar, fet que ha portat al desenvolupament d'interpretacions molt diferents sobre l'estructura profunda de la Serralada Bètica.

En aquesta tesi, se subratllen els principals resultats dels diferents estudis geofísics realitzats a les Bètiques, posant èmfasi a l'estructura cortical i litosfèrica de la seva zona central. Aquests inclouen **gravimetria** (secció 6.2.1; Figura 6.6), **magnetisme** (6.2.2; Figura 6.7), **sísmica de refracció** (6.2.3), **sísmica de reflexió** (6.2.4; Figura 6.9 i Figura 6.10), **anàlisi de la sismicitat i tomografia sísmica** (6.2.5; Figura 6.11 i Figura 6.12), **flux de calor** (6.2.6; Figura



6.13) i **magnetotel·lúrica** (6.2.7; Figura 6.14); a més de diversos estudis multidisciplinars. Les principals característiques que es reconeixen són:

- Gruixos corticals entre 30 km i 40 km sota les zones Interna i Externes, superiors en promig als del Massís Ibèric (30 km – 35 km). El gruix cortical màxim, d'acord amb estudis gravimètrics, es localitza sota la Conca de Guadix-Baza, fet que indica l'absència d'una arrel significativa sota les màximes elevacions de les Bètiques, a Sierra Nevada. El gruix cortical decreix cap a la costa, on assoleix valors de 20 km – 25 km, i continua decreixent fins assolir valors mínims sota el Mar d'Alborà (13 km – 16 km).
- Continuitat del Massís Ibèric per sota de les Bètiques.
- Presència d'un cos anòmal a nivells d'escorça inferior sota la Zona Interna, amb baixa resistivitat elèctrica i baixes velocitats sísmiques.
- Fragment d'elevada velocitat sísmica en el mantell litosfèric sota la Zona Interna i el Mar d'Alborà.

### **Capítol 7: Adquisició i processat de dades: avaluació de les respostes MT**

Les dades utilitzades en l'estudi magnetotel·lúric de les Bètiques es van adquirir en les campanyes realitzades durant els anys 1994 i 1995, en que les dades s'han processat o reprocessat, i en la nova campanya, realitzada dins aquesta tesi, el 2004, realitzant tota l'adquisició i reprocessat (apèndix D).

En les primeres campanyes (94-95) es van registrar fins a 41 estacions, localitzades aproximadament al llarg d'un perfil NW-SE, coincidint amb línies sísmiques ja existents, creuant des del Sud del Massís Ibèric fins al Mar d'Alborà (Figura 7.1). El reprocessat de les dades s'ha fet mitjançant una inspecció visual de les sèries temporals. Les respostes obtingudes tenen un rang de períodes de 4 ms a 4000 s, valors de coherència mitjà-alt, i barres d'errors grans, especialment als períodes més llargs. En total es va recuperar un conjunt de 33 estacions. Respecte al processat ja existent, la qualitat de les respostes s'ha mantingut on aquesta ja era alta, i s'ha millorat en les estacions amb coherències més baixes i barres d'errors grans.

La campanya de 2004 es va realitzar en col·laboració entre el DG-UB i el DG-UG, utilitzant equips Metronix de nova generació, que presenten importants avantatges (millor qualitat de les dades, bobines sensibles a un rang més ample de períodes i possibilitat de fer adquisició en referència remota) respecte als equips antics. En total es van adquirir dades de 10 estacions, localitzades des de l'est de Granada fins a Almeria, creuant els complexos Nevado-Filábride i Alpujarride, amb l'objectiu d'obtenir una major cobertura d'aquesta zona (Figura 7.1). Les sèries temporals s'han processat mitjançant el software Mapros. Les respostes, amb un rang de períodes de 1 ms a 1000 s i 4000 s, es caracteritzen per un alt elevat nivell de soroll, coherències baixes, però qualitat mitjana-alta.

Malgrat realitzar també adquisició en la banda HF, aquestes dades no s'han inclòs, degut a la seva baixa qualitat. El processat en referència remota va funcionar per a la banda LF3, mentre que a la banda LF4, hauria estat necessària una major distància entre estacions i, per tant, no es va poder utilitzar.

Les resistivitats aparents avaluades a la Zona Interna presenten una part central en que tant  $\rho_{xy}$  and  $\rho_{yx}$  són decreixents, el que suggereix la presència d'un cos conductor en profunditat.

### **Capítol 8: Anàlisi de la dimensionalitat geoelectrica en les dades MT de la Serralada Bètica**

L'anàlisi de la dimensionalitat de les dades MT de Bètiques s'ha realitzat mitjançant el programa WALDIM, considerant els errors de les dades i utilitzant uns valor llimars  $\tau_w=0.15$  i  $\tau_Q=0.1$ . En els casos 2D (amb o sense distorsió), l'ambigüitat de la direcció de l'strike s'ha resolt mitjançant la informació dels vectors d'inducció.

Degut als errors, la dimensionalitat no s'ha pogut determinar en un 30% de casos, corresponent majoritàriament a períodes llargs.

Els resultats en cada estació s'han agrupat en bandes de períodes (dècades logarítmiques), per tal de representar la dimensionalitat prevalent i les direccions de l'strike en les diferents àrees i per diferents penetracions (Figura 8.5).

La dimensionalitat és principalment 3D, amb alguns casos 1D localitzats a les conques i pels períodes més curts. Sobre les zones al·lòctones (és a dir, Bètiques Internes i conques) hi ha estructures bidimensionals amb orientacions de N-S a NNE-SSW i de E-W a WNW-ESE, mentre que a les zones autòctones (Massís Ibèric) aquestes estructures bidimensionals s'orienten d'E-W a ENE-WSW. La dimensionalitat més complexa de les Bètiques s'interpreta com a deguda a la superposició de processos que van actuar en la seva evolució, mentre que el Massís Ibèric, només afectat per l'orogènia Varisca, mostra una dimensionalitat més simple. L'abundància de casos 3D augmenta cap al sud i per als períodes més llargs.

La dimensionalitat obtinguda s'ha comparat amb l'obtinguda per altres mètodes. La descomposició de Groom and Bailey utilitzant el programa Strike només s'ajusta a la descripció de WAL si s'utilitzen subconjunts de dades, amb una única estació i pocs períodes (p. ex. Taula 8.1). No obstant, es corrobora que les dades de Bètiques no es poden descriure com a 2D amb una única direcció d'strike prevalent. Els mapes del tensor de les fases (Figura 8.8) confirmen el caràcter complex de la dimensionalitat de les dades.

Els resultats de la dimensionalitat apunten a la modelització 3D com a la millor estratègia per a reproduir les estructures geoelectriques de l'escorça de les Bètiques centrals. No obstant, es poden construir models 2D utilitzant subconjunts de dades, que poden aportar una imatge prèvia de la distribució de conductivitats.

## Capítol 9: Modelització 2D

Malgrat que en el capítol anterior s'ha vist que cal fer un model 3D de la zona d'estudi, els codis d'inversió 3D són molt recents, i els models es segueixen construint mitjançant assaig i error. Mentrestant, la inversió 2D és encara l'eina de modelització més utilitzada. És per això que es presenta aquest capítol sobre modelització 2D, amb els objectius de fer una revisió crítica de l'únic model 2D previ existent, i d'explorar les possibilitats de fer una inversió 2D de dades que són 3D.

El primer model MT de Bètiques (MT1, Pous *et al.*, 1999) es va construir a partir de dades de 15 estacions, projectades al llarg d'un perfil NW-SE (Figura 9.1), d'acord amb la direcció obtinguda en la descomposició de G&B i la informació dels vectors d'inducció. Les correccions d'static shifts es van realitzar només a la part central de la Zona Interna, on les corbes de resistivitat van ser pujades a  $1000 \Omega \cdot m$ . El model resultant presentava diferents conductors i resistors superficials, dels que destacava la presència d'un cos conductor sota la Zona Interna, entre 20 km i 40 km de profunditat, que es va interpretar com a fusió parcial.

L'anàlisi de la dimensionalitat ja ha mostrat una major complexitat de la zona. Particularment, a la zona del conductor, aquesta dimensionalitat és 3D (Figura 9.2).

Per tal de determinar la resolució del conductor i la validesa de l'aproximació 2D, s'ha realitzat un estudi de sensibilitat (Schwalenberg *et al.*, 2002) del model MT1. Els resultats (Figura 9.3) mostren que el model té bona resolució fins a 20 km aproximadament, mentre que a profunditats més baixes aquesta disminueix. Les respostes del model són sensibles a la presència del conductor profund. No obstant, pels resultats de la dimensionalitat, la seva continuïtat no està assegurada.

S'han creat tres models 2D a la Zona Interna: EW, NS1 i NS2, al llarg i travessant el complex Nevado-Filábride (Figura 9.4), on les estacions s'han projectat seguint unes direccions d'strike hipotètiques. Els models s'han obtingut mitjançant els codis RLM2DI, invertint el modes TM (Figura 9.7).

El punt feble d'aquestes inversions està en que les dades no són exactament 2D, i que les estacions s'han projectat segons unes direccions d'strike molt qüestionables. Així, estructures locals poden aparèixer extrapolades a tot el model.

El model EW mostra una alternança d'estructures conductores i resistives, fet que es podria atribuir a anisotropia, però que és conseqüència d'haver fet la inversió al llarg d'un hipotètic strike. El conductor més gran assoleix una profunditat màxima de 18 km. Els models NS1 i NS2 presenten també un cos conductor, localitzat sota els afloraments del Nevado-Filábride, amb profunditats màximes de 10 km i 15 km, molt més somers que el cos conductor obtingut del model MT1 previ.

El model NS1 s'ha comparat amb els resultats obtinguts d'altres codis d'inversió, REBOCC i DetREBOCC (REBOCC modificat per a la inversió del determinant), que permeten

invertir el tipper. Amb petites variacions, tots els models presenten un cos conductor amb la seva base localitzada a uns 20 km de profunditat.

D'entre els diferents codis, donada la natura de les dades utilitzades, la inversió del determinant sembla ser la més raonable, ja que inverteix una resposta que conté tota la informació del tensor d'impedàncies i està menys influenciada per la direcció de l'strike.

### **Capítol 10: Modelització 3D de l'estructura geoelectrica de les Bètiques centrals**

Finalment, s'ha fet la modelització 3D a escala cortical de les Bètiques centrals. El model 3D s'ha construït a partir d'un model inicial, modificat mitjançant assaig i error, a partir de la comparació entre les dades i les respostes del model (calculades mitjançant el codi de Mackie *et al.*, 1993).

Les dades han estat corregides d'static shift, de manera que les corbes xy i yx d'una mateixa estació comencin al mateix nivell, i s'han eliminat els períodes amb més error o amb canvis abruptes en les respostes.

El model inicial s'ha construït a partir de la interpolació de les inversions 1D obtingudes en cada estació. Posteriorment, el model s'ha estès per incloure part del Mar d'Alborà, a la capa d'aigua de la qual se li ha assignat una resistivitat de  $0.5 \Omega \cdot m$ . A les primeres capes del model, algunes de les zones conductores o resistents s'han estès per reproduir la geologia superficial. Aquest model inicial té una grandària de  $270(NS) \times 220(EW) \times 100(z)$  km, amb una malla de  $50 \times 50 \times 25$  elements (Figures 10.1 i 10.2).

Després de 140 passos, s'ha obtingut un model satisfactori (bet3D-140), tant pel que fa a l'ajust entre les dades i les respostes (veure Apèndix E), quantificat mitjançant l'rms, com a la suavitat de les seves estructures (Figura 10.3). Aquest model té una bona resolució fins a 40 km de profunditat. Seguint les estructures geològiques en superfície, les principals característiques del model són:

**Massís Ibèric:** Valors moderats-altos de resistivitat (entre  $100 \Omega \cdot m$  i  $500 \Omega \cdot m$ ). A la part més NW del model apareix el resistent **RIM**, on s'hi encaixa el conductor **CIM**, entre 2.15 i 17.5 km de profunditat.

**Conca de Guadalquivir:** Valors baixos de conductivitat, que reproduïxen la forma de la conca, amb algunes irregularitats, fins a 900 m (**CGB**). Per sota, els valors de la resistivitat són similars als del Massís Ibèric.

**Zona Prebètica:** Fins a 2.15 km, valors moderats de resistivitat ( $20 \Omega \cdot m - 50 \Omega \cdot m$ ), limitats per sota per valors més alts, d'entre  $100 \Omega \cdot m$  i  $500 \Omega \cdot m$ . Localment, continuació del conductor **CGB**, fins a 650 m de profunditat.

**Zona Subbètica i Conca de Guadix-Baza:** Distribució de resistivitats en profunditat similar a la de la Zona Prebètica, amb l'excepció de dues zones conductores, C-20 i C27-38,

localitzades a la part més interna de la zona, assolint profunditats màximes de 7 km i 2.8 km respectivament. Continuació del conductor **CGB** fins a 1.2 km, mentre que el rebliment de la conca de Guadix-Baza no queda ben reproduït.

**Zona Interna:** És la zona més complexa, amb una zona resistent (**RI**), en la que s'hi encaixen diferents conductors poc profunds localitzats sota la Sierra de las Estancias (**CE**), Sierra de Filabres (**CF1** i **CF2**) i Sierra de Alhamilla (**C-31**) (Figura 10.4). Entre 3.8 km i 17.5 km apareix el conductor **CF3**, sota els **CF1** i **CF2**, amb valors de resistivitat d'entre 1  $\Omega\cdot\text{m}$  i 5  $\Omega\cdot\text{m}$  (Figura 10.5).

Per tal de conèixer la resolució del model, concretament del darrer conductor **CF3**, s'han fet uns tests de sensibilitat. Aquests tests han consistit en modificar el model, i recalculer els rms, comparant-los amb els del model original. Així, s'ha pogut constatar l'estabilitat de la malla emprada (Taula 10.1). Pel que fa al conductor **CF3**, aquest pot estendre's més cap a l'oest però no reduir la seva extensió horitzontal (Figures 10.9, 10.10 i 10.11); ha de tenir una profunditat màxima situada entre 17.5 i 30 km (Figura 10.12 i Taula 10.2), i ha d'estar en continuïtat amb els conductors **CF1** i **CF2**, o, en tot cas, separat d'ells per una capa resistent prima (< 400 m) (Figura 10.13 i Taula 10.3).

Comparat amb els perfils de sísmica de reflexió fets a la zona, el conductor **CGB** es pot correlacionar amb el reflector **TVB** i la base del conductor **CF3** coincideix localment amb el reflector **UCR** (Figura 10.14). No obstant, el model de conductivitats no permet identificar ni el límit entre l'escorça superior i inferior, ni la Moho; així tampoc es possible detectar la presència d'una arrel cortical sota la Zona Interna. El conductor **CF3** es troba localitzat en una zona de baixa activitat sísmica (Figura 10.16), velocitats  $v_p$  relativament altes (Figura 10.17) i coincideix parcialment amb una zona d'anomalia magnètica situada a la part NNW de la Sierra de los Filabres (Figura 10.15). També coincideix amb una topografia elevada, a la que segons els estudis gravimètrics no s'hi associa una arrel cortical significativa.

### **Interpretació:**

Les principals zones resistents del model s'han interpretat com a roques metamòrfiques i granítiques del Massís Ibèric (**RIM**, NW del model), les quals continuen per sota la Zona Externa de les Bètiques, i com a roques metamòrfiques de la Zona Interna de les Bètiques (**RI**). El conductor **CGB** que s'associa al rebliment de la conca de Guadalquivir permet reconèixer la continuació d'aquests sediments per sota la Zona Externa. La conductivitat relativament alta a la Zona Externa s'explica per la circulació de fluids en les roques carbonatades de que està formada. A la Zona Subbètica Interna, la conductivitat és encara més elevada (**C20** i **C27-38**), fet que s'associa a un major contingut en lutites i a la presència de roques basàltiques. En el cas del conductor **C20**, l'augment de la conductivitat es relaciona amb l'existència d'una unitat dels flysch. El model permet veure que aquestes unitats sedimentàries queden parcialment

encavalcades per les roques de la Zona Interna. Els conductors poc profunds situats a la Zona Interna s'interpreten com a circulació de fluids al llarg dels contactes entre les complexes Nevado-Filábride i Alpujárride, o entre diferents unitats del Nevado-Filábride.

Per la seva posició i geometria, el conductor **CF3** s'emplaça en roques Domini d'Alborà. A partir d'informació geològica i geofísica complementària, es descarten la fusió parcial i la circulació de fluids i s'estableix com a causa de la seva elevada conductivitat la presència de fases minerals conductores. Així, el conductor s'associa amb ofiolites o roques d'escorça inferior amb algun tipus de mineralització (grafit o pirita) que fa augmentar la seva conductivitat. Aquesta unitat litològica estaria situada sota el complex Nevado-Filábride, al llarg del nucli del principal antiforme, i estaria limitat en la seva base pel desenganxament basal de els Bètiques (Figura 10.21).

## Conclusions

Les contribucions i conclusions d'aquesta tesi es presenten separadament en les seves dues parts principals:

### Contribucions metodològiques a l'estudi de la dimensionalitat geoelectrica

De la revisió dels criteris dels invariants de WAL, aplicats a dades reals, i considerant situacions en que les dades no s'ajusten exactament als casos ideals 1D, 2D i 3D:

- S'ha fet l'estimació dels invariants rotacionals de WAL, els angles relacionats i els seus errors utilitzant tres mètodes, aplicats a dades reals: propagació clàssica d'errors, generació de soroll gaussià i el mètode de remostreig Bootstrap. Els tres mètodes condueixen a resultats semblants, tot i que la propagació clàssica dels errors és el mètode més estable per a l'estimació dels errors dels invariants. Les direccions d'strike i dels angles de distorsió s'han d'estimar utilitzant la generació de soroll gaussià, en que es recomana utilitzar un valor de  $n=100$ .
- Pel que fa al valor llinar, s'han analitzat els resultats de la dimensionalitat, amb les corresponents direccions d'strike, angles de distorsió i errors utilitzant diferents valors llinar. S'ha definit com a vàlid el rang de valors que donen una descripció de la dimensionalitat més estable, d'acord amb els errors observats. Aquest rang és de 0.1 a 0.15, vàlid per a dades de qualitat mitja – alta.
- Producte d'aquest estudi, s'ha creat un programa per a dur a terme l'anàlisi de la dimensionalitat segons els criteris de WAL considerant els errors de les dades. Aquest programa, WALDIM, s'ha aplicat amb èxit a diferents conjunts de dades.

De la comparació entre els mètodes de WAL i Bahr, i la revisió del segon per fer-los equivalents:

- S'han obtingut les relacions analítiques entre els paràmetres de WAL i Bahr.
- S'ha proposat un nou mètode, Bahr-Q, que utilitza els paràmetres de Bahr i l'invariant Q. Utilitzant els nous valors l·lindars definits, ambdós mètodes són equivalents. Els paràmetres de Bahr estan menys afectats d'error i, per tant, el mètode Bahr-Q es pot considerar més robust que el de WAL.

De l'estudi del tensor magnetotel·lúric de les fases:

- S'ha aplicat el tensor de les fases a diferents casos de dimensionalitat, incloent errors i distorsió. S'ha vist com en situacions extremes de distorsió (angle de shear proper a  $45^\circ$ ) el tensor de les fases no és invariant sota distorsió.
- Quan les dades no estan afectades de distorsió, la diferència  $\varphi_{Max} - \varphi_{min}$  calculada a partir del tensor de les fases i el paràmetre Q, tenen valors similars, la qual cosa permetria identificar l'existència de distorsió fins i tot quan afecta estructures regionals 3D.
- La inversió de les dades del tensor de les fases per ajustar-les a una descripció 2D no porta en general a bons resultats, degut a la utilització de només la meitat d'informació del tensor magnetotel·lúric.

Conclusions generals de la primera part:

- En l'anàlisi de la dimensionalitat és important considerar els errors, ja que afecten la determinació de la dimensionalitat sigui quin sigui el mètode utilitzat.
- L'anàlisi de la dimensionalitat més òptim s'obté quan s'utilitza tota la informació del tensor d'impedàncies (o tensor magnetotel·lúric). Les hipòtesis a priori sobre una descripció determinada de la dimensionalitat s'haurien d'utilitzar només per a testejar hipòtesis (en ocasions s'utilitzen com a anàlisi de la dimensionalitat, conduint a interpretacions incorrectes).
- Cal anar en compte a l'utilitzar mètodes com el tensor de les fases, ja que aporten una descripció compacta de la dimensionalitat però, de cara a la modelització, no aporten informació de la distorsió i, per tant, les dades no es poden corregir.

### **Estudi Magnetotel·lúric de l'Estructura Cortical de la Part Central de la Serralada Bètica**

S'ha presentat una síntesi de les dades geològiques i geofísiques de les Bètiques Centrals, el reprocessat de les dades MT ja existents, i l'adquisició i processat de noves dades,

amb el que s'ha obtingut un conjunt més complert amb el que treballar. De l'anàlisi de la dimensionalitat de les dades, la modelització 2D i 3D i les interpretacions del model, es destaquen els següents resultats i conclusions:

- L'anàlisi de la dimensionalitat mostra la complexitat de les dades MT, pel que s'apunta al 3D com a millor estratègia de modelització. A més, la distribució dels casos 2D sobre la zona d'estudi es poden relacionar amb els processos que han tingut lloc a les Bètiques i al Massís Ibèric: la dimensionalitat més complexa de les Bètiques es relaciona amb els diferents processos que hi han tingut lloc (orogènia Alpina superposada amb materials deformats per l'orogènia Varisca), mentre que el Massís Ibèric, només afectat per l'orogènia Varisca, presenta una dimensionalitat més simple amb una direcció d'strike més constant.
- L'anàlisi de la dimensionalitat i el test de sensitivitat del model previ 2D mostra que no està assegurada l'extensió lateral del conductor profund.
- Els nous models 2D obtinguts de la Zona Interna mostren la presència d'un cos conductor sota la Sierra de los Filabres, més somer que el cos obtingut del model 2D previ.
- De la comparació dels codis d'inversió 2D RLM2DI, REBOCC i DetREBOCC, el darrer, que inverteix les dades del determinant, ha resultat molt eficaç quan les dades no són exactament 2D. Així, la utilització del determinant pot ser també una bona eina per a la modelització 3D.
- Finalment, s'ha creat un model geoelectric de l'escorça de la part central de les Bètiques. Partint d'un model inicial obtingut de la inversió 1D del determinant i fixant la geometria de les estructures geològiques conegudes, el model s'ha obtingut mitjançant assaig i error, mitjançant el codi de Mackie *et al.* (1993) i utilitzant l'rms per comparar diferents respostes de les dades i el model.
- S'han realitzat diferents tests sobre l'estabilitat del model enfront a la malla utilitzada i sobre l'extensió i profunditat dels cossos principals. A més, el model reproduïx de manera general la dimensionalitat de les dades.
- El model mostra aquestes principals característiques:
  - una zona resistent al Massís Ibèric que s'associa a roques metamòrfiques i granítiques, dins el qual s'hi troba una zona conductora que s'interpreta com a grafit interconnectat. La prolongació de la zona resistent per sota la Zona Externa confirma la continuació del basament Ibèric per sota les Bètiques.
  - un conductor somer relacionat amb circulació de fluids en els sediments de la Conca de Guadalquivir. La forma del conductor mostra que el reblliment de la conca continua per sota de les Bètiques Externes.



- conductivitats moderadament altes a la Zona Externa, associades a circulació de fluids en les roques carbonatades del Prebètic i del Subbètic. En el Subbètic Intern la conductivitat més elevada s'associa a un major contingut de lutites i roques basàltiques, i a la part més oriental d'aquesta zona, a roques de les unitats del flysch.

- a la Zona Interna, una àmplia zona resistent que arriba a uns 13 km de profunditat s'interpreta per la presència de roques metamòrfiques dels complexos Nevado-Filábride i Alpujarride. Diferents conductors poc profunds s'interpreten com a circulació de fluids al llarg dels contactes entre aquests dos complexos o entre diferents unitats del Nevado-Filábride.

- Sota la Sierra de los Filabres, enter 4 km i 17.5 km s'emplaça un cos conductor. D'acord amb els tests de sensibilitat realitzats, aquest cos pot tenir una orientació entre WNW-ESE i E-W i podria assolir profunditats màximes de 30 km.

- D'acord amb la informació geològica i geofísica complementària, el cos conductor profund s'interpreta com una unitat litològica diferenciada formada per ofiolites o roques de l'escorça inferior que contenen una fase mineral conductora, sota el complex Nevado-Filábride. Aquest cos estaria localitzat al nucli de l'anfiforme de Sierra Nevada i Sierra de los Filabres i s'estendria en profunditat fins al nivell de desenganxament de les Bètiques.

## Perspectives de futur

Aquesta tesi, que ha resolt alguns aspectes relacionats amb la determinació de la dimensionalitat geoelectrica en MT i ha obtingut una descripció de les estructures geoelectriques de l'escorça de les Bètiques centrals, deixa encara una porta oberta a noves investigacions en aquestes mateixes direccions. A continuació es presenten quines són les perspectives de futur com a continuació d'aquesta tesi:

En relació a la determinació de la dimensionalitat geoelectrica a partir de dades MT:

- Continuar investigant els mètodes basats en els paràmetres invariants rotacionals. Millorar el programa WALDIM mitjançant l'ús de lògica difusa, enlloc d'uns valors llindar fixos, i permetre fer promigs regionals (juntament amb promigs per bandes de períodes). Permetre fixar certes hipòtesis a priori, que es quantificarien mitjançant un valor del desajust (misfit). Finalment, incloure la informació del tipper per eliminar l'ambigüitat de 90° en la determinació de l'strike.

- Investigar l'ús dels invariants rotacionals del tensor MT en presència d'anisotropia. Estudiar si permeten caracteritzar aquesta propietat en les estructures geoelectriques.
- Optimitzar l'ús dels invariants en la modelització per comparar les respostes de les dades amb les dels models.
- Continuar investigant les relacions entre els angles del tensor de les fases  $\varphi_{Max} - \varphi_{min}$  i el paràmetre Q de WAL. Establir valors líndiar per a tots els paràmetres del tensor de les fases per establir el tipus de dimensionalitat.

En relació a l'estructura geoelectrica de les Bètiques, el principal resultat ha estat l'obtenció d'un model 3D de l'estructura cortical de les Bètiques centrals, en el que s'ha identificat un cos conductor sota la Zona Interna, a profunditats d'escorça superior – mitja. Investigacions futures d'MT a les Bètiques permetran obtenir més informació sobre aquest cos i cobrir una zona d'estudi més ampla:

- Realitzar una inversió 3D de les dades MT de Bètiques utilitzant el codi de Siripurnvaraporn *et al.* (2005). Actualment s'estan realitzant diferents proves en la utilització del codi. Intentar millorar els ajustos entre les respostes de les dades i del model i comparar-ho amb el model actual.
- Adquirir noves dades, registrant períodes més llargs, per obtenir una millor resolució en profunditat i cobrir una zona d'estudi més ampla. Obtenir dades complementàries per corregir l'static shift i poder fixar els valors de la resistivitat a les capes més superficials.

Degut a l'interès creixent de la zona, dins de la Iniciativa de Recerca PICASSO (Program to Investigate the Cause of the Alboran-Atlas System convective Overturn) i el projecte de recerca que es desenvoluparà dins d'aquesta iniciativa, les contribucions d'aquesta tesi (conjunt MT de dades, caracterització de la dimensionalitat i model 3D de la zona central de les Bètiques) han proporcionat un punt de partida per a nous estudis MT a realitzar en una zona tant àmplia i complexa. El principal objectiu de PICASSO és determinar l'estructura tridimensional de l'escorça i litosfera, especialment la geometria del mantell superior per reconèixer els processos litosfèrics que hi tenen lloc. S'adquiriran diferents dades geofísiques per a fer una interpretació integrada. Per exemple, una campanya d'MT recent (febrer de 2006), feta en col·laboració entre les universitats de Granada i Barcelona al nord del Marroc, apunta en aquesta direcció. A més, en un futur proper s'adquiriran noves dades d'MT de període llarg cobrint una àrea més ampla de les Bètiques, en col·laboració entre els DIAS, la UG i la UB.