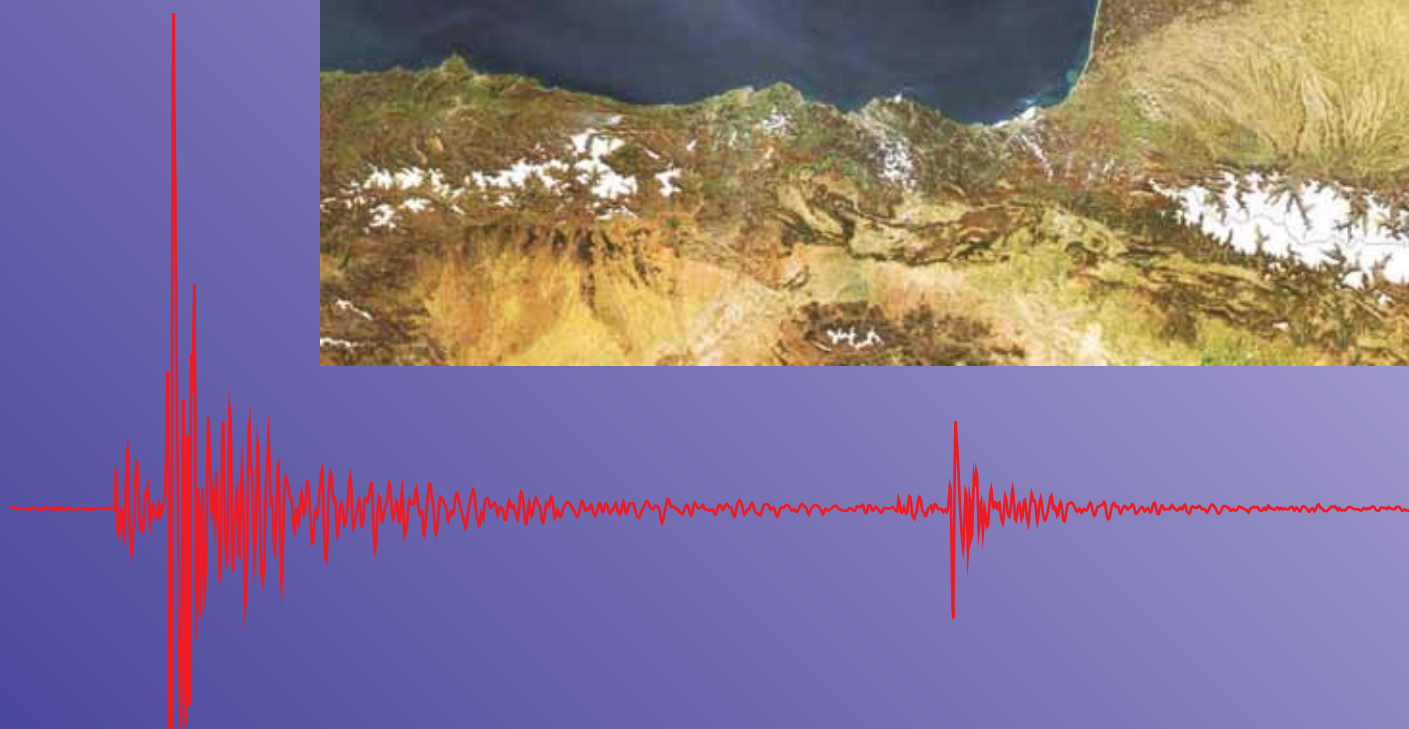
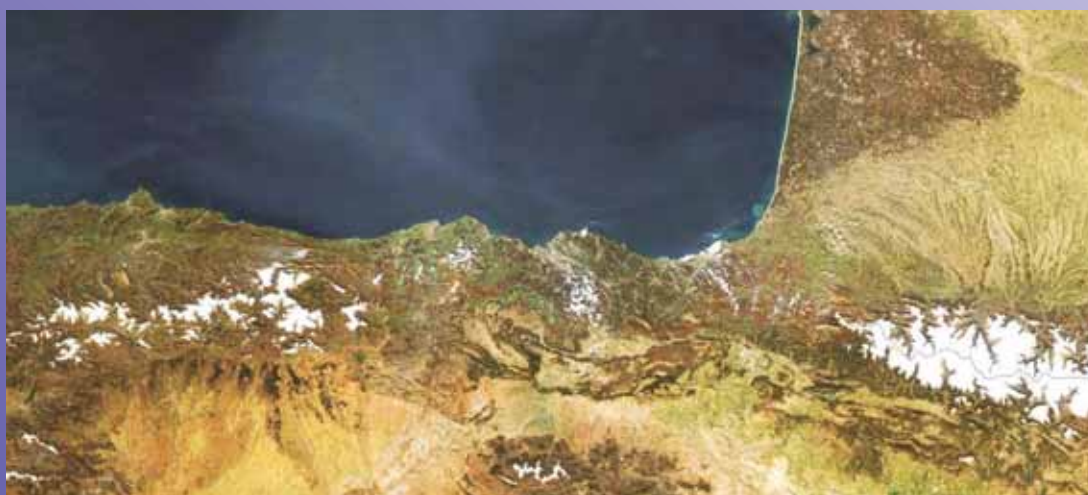


Caracterització Estructural i Sismotectònica de la Litosfera en el Domini Pirenaico-Cantàbric a partir de Mètodes de Sísmica Activa i Passiva

Tesi Doctoral
Mario Ruiz Fernández
Barcelona, Març 2007



Institut de Ciències de la Terra 'Jaume Almera'
CSIC

Departament de Geodinàmica i Geofísica
Universitat de Barcelona



Consell Superior d'Investigacions Científiques (CSIC)
Institut de Ciències de la Terra "Jaume Almera"
Departament d'Estructura i Dinàmica de la Terra

Programa de doctorat Ciències de la Terra
Bienni 2006-2007

**CARACTERITZACIÓ ESTRUCTURAL I
SISMOTECTÒNICA DE LA LITOSFERA EN EL
DOMINI PIRENAICO-CANTÀBRIC A PARTIR DE
MÈTODES DE SÍSMICA ACTIVA I PASSIVA**

Tesi

presentada per

Mario Ruiz Fernández

Al Departament de Geodinàmica i Geofísica de la Universitat de Barcelona

Directors:

Dr. Josep Gallart Muset

Dr. Jordi Díaz Cusí

Tutor: Dr. Francesc Sàbat Montserrat

22 de Enero de 1774

“El día 22, estando en la latitud de 62° 5' S y longitud de 112° 24' O, vimos una isla de hielo, un petrel antártico, varios petreles azules y algunos otros pájaros conocidos; pero nada que nos diese la menor esperanza de encontrar tierra.”

*James Cook. Capitán del “Resolution”
Viaje hacia el polo sur y alrededor del mundo.*

*Realizado a bordo de los navíos Reales “Resolution” y “Adventure”,
durante los años 1772-75*

Agraïments

Aquesta tesi no hauria estat mai escrita sense els ànims, el suport i la col·laboració de molta gent que m'han acompanyat al llarg d'aquests anys, espero no deixar-me'n a ningú i si fos el cas si us plau no m'ho tingui en compte.

En primer lloc voldria agrair als meus directors de tesi Josep Gallart Muset i Jordi Díaz Cusí el fet d'haver confiat en mi al llarg de tots aquests anys, deixant-me participar en els projectes i en les nombroses campanyes que s'han portat a terme des de l'Institut de Ciències de la Terra 'Jaume Almera'. Els seus consells i ajut han estat fonamentals per a que aquest treball arribés a bon port. Els voldria agrair especialment el haver fet realitat un dels meus somnis de joventut: Navegar. Moltes gràcies per haver-me deixat embarcar en aquesta aventura personal.

Gran part dels projectes en els que he participat al llarg d'aquests anys s'han realitzat en col·laboració amb la Universidad de Oviedo. Quisiera agradecer a Javier Álvarez Pulgar sus comentarios sobre la geología de las zonas en las que hemos trabajado. También desearía hacer llegar mi agradecimiento a David Pedreira por sus numerosos consejos, sugerencias e ideas sobre la geología del Norte peninsular. David, por muchas separatas que me pidas creo que nunca llegaré a saldar la deuda que tengo contigo. Las figuras de sísmica de reflexión que aparecen en esta tesis se las debo a Gabriela Fernández Viejo.

També voldria fer arribar el meu agraïment a Ramon Carbonell i a l'Alfred Hirn per haver-me brindat l'oportunitat de participar en les seves campanyes d'Extremadura i les Antilles. La Carme Olivera va fer valuosos comentaris sobre els mecanismes focals de Navarra.

Quisiera agradecer a Martin Schimmel sus clases magistrales sobre el filtrado de señales sísmicas. Sin su filtro de coherencia parte de este trabajo no habría sido posible. Antonio Villaseñor me introdujo en el mundo del HypoDD y otros programas de localización "añadiéndome más capítulos a la tesis".

Els professors del departament de Geodiàmica i Geofísica Alex Marcuello i Pilar Queralt em van introduir en aquest món de les campanyes i la ciència. Guardo molt bon record de la campanya de Magnetotel·lúrica de l'estiu de 1998 al País Basc, i és potser gràcies a ells que estic avui escrivint aquestes línies. També de la UB, voldria recordar a l'Oriol Ferrer i a la Bea Benjumea (ara a l'IGC) i agrair-los els bons moments que vam passar junts a bord de l'Hespèrides durant la campanya MARCONI.

A l'Almera he fet bons companys i grans amics. A Javier Fullea quisiera agradecerle su amistad y las largas tertulias cerveceras que hemos mantenido durante estos últimos años de tesis. No arreglamos el mundo y quizás ni llegaríamos remotamente a comprenderlo, pero logramos hacer pasar el tiempo y olvidar las penalidades, que al fin y al cabo es lo que importa. Al bon amic Isaac Flecha voldria recordar-li que des de que no porta el palillo la cosa ja no es el que era... Isaac, quan es deixen els hàbits més antics i arrelats, la cosa ja no saps on acaba. Gran part de l'interminable treball de localització hipocentral de la sèrie sísmica d'Itoiz no hauria estat possible sense l'ajut de l'Oriol Gaspà. Intenta mantenir les manetes quietes, que el treball futur de molts sismòlegs innocents està ara a les teves mans. A en Manu, la Leire i l'Eduard, en aquest ordre doncs és l'ordre cronològic en el que han hagut de suportar les meves interminables preguntes de geologia, els voldria agrair la seva paciència i la seva capacitat per transmetre als físics els seus coneixements en aquesta matèria. A en David li he d'agrair la bona música que m'ha anat passant al llarg d'aquests anys. Imma, no perdis mai aquest geni que et caracteritza! ¿Qué se puede decir de Bea sin que sea en forma de pregunta? Contigo compartí momentos difíciles en Ibiza y Formentera buscando de madrugada un lugar donde dormir. ¡Es que no se pueden hacer campañas en lugares turísticos! En Lluís m'està introduint en el mon de Jazz, només em faltava això! Con Audrey Galve compartí muy buenos momentos en Navarra y Guadalupe, y buenos vinos en Almería y Mallorca. Voldria recordar també als antics companys de l'Almera,: Rafa, Charlie, Ivone, Dani, Valen, Ignacio, Eulàlia, Jose. Quins temps aquells en els que es feien cates de vins a l'hora de dinar!

Con Juan Manuel González-Cortina, de la Universidad de Oviedo, he compartido muy buenos momentos tanto estando de campaña como en Barcelona. Gracias por tu apoyo y las interminables charlas que hemos mantenido durante estos años. Espero que algún día puedas olvidar los ladridos de Aralar... A Carlos López, que sufrió mi conducción por pistas de Navarra, y a Fabiola Fernández quisiera hacerles llegar un afectuoso saludo.

Fora de l'Almera he fet dos grans amics: la Berta i en Juanlu. No voldria acabar aquestes línies sense recordar les bones estones que em viscut plegats, i agrair la seva paciència i amistat.

Als meus pares els ho dec tot, sense el seu suport, els seus ànims i el seu exemple tot el que he anat fent al llarg de la vida mai hauria estat possible. Gràcies per ser com sou! Aquest últims anys he descobert a un bon amic en el meu germà. Moltes gràcies per acollir-me la teva llar de Mojácar durant les meves fugides de cap de setmana per desconnectar de la tesi. Ens va quedar algun camí o pista per descobrir dins d'un radi de 300 km entorn de casa teva? Als meus avis, ja desapareguts, els estic molt agraït per mantenir viva la memòria històrica i haver-nos transmès, al llarg de moltes sobretaules, les històries d'aquells anys foscos que no s'haurien d'oblidar mai.

"We have shot our bolt, and the tale is latitude 88° 23' South, longitude 162° East."
Ernest H. Shackleton. The Heart of the Antarctic: The British Antarctic Expedition, 1907-1909.

Al meu Pare,

Índex

1.-INTRODUCCIÓ	1
1.1.- Presentació, objectius i estructura de la tesis	1
1.2.- Dispositius experimentals i mètodes d'interpretació utilitzats	6
1.2.1.- Experiments de sísmica passiva	6
- Xarxes sísmiques d'àmbit regional	7
- Xarxes sísmiques d'àmbit local	8
- Mètodes d'interpretació	9
1.2.2.- Experiments de sísmica activa	11
- Descripció dels perfils de refracció MARCONI	11
- Mètodes d'interpretació	12
2.-CONTEXT GEOLÒGIC I DADES SÍSMIQUES PRÈVIES	15
2.1.- Geologia dels Pirineus Occidentals i la Serralada Cantàbrica	15
2.1.1.- Els Pirineus Occidentals	18
2.1.2.- El sector oriental i central del sistema Cantàbric	20
- La Conca Basco Cantàbrica	20
- Serralada Cantàbrica	22
2.2. - Estat d'esforços tectònics actuals del nord de la península Ibèrica	24
2.3.- Estudis previs de sísmica passiva i activa	27
2.3.1.- Evolució de les xarxes sísmiques del nord peninsular	27
- Les xarxes sísmiques permanents	28
- Xarxes sísmiques temporals	31
- Resultats sismològics previs	36
2.3.2.- Perfils sísmics als Pirineus i a la Serralada Cantàbrica	41
- Perfils als Pirineus	42
- Perfils a la Serralada i marge continental Cantàbrics	46
PART I. Mètodes de sísmica passiva: caracterització sismotectònica	59
3.- ADQUISICIÓ DE LES DADES DE SISMICITAT	61
3.1.- Descripció de les estacions sísmiques emprades	61

3.2.- Logística: Autonomia i manteniment de les estacions	64
3.3.- Processat. Tractament de les dades	65
3.4.- Localització Hipocentral	67
4.- ACTIVITAT SÍSMICA A L'EXTREM OCCIDENTAL DELS PIRINEUS	71
4.1.- Síntesi del treball presentat en forma d'article a Tectonophysics.	71
4.2.- Article: Seismic activity at the Western Pyrenean edge	74
5.- ESTUDI DE LES RÈPLIQUES DEL TERRATRÈMOL DE MAGNITUD 4.1 Lg OCORREGUT EL 21 DE FEBRER DEL 2002 A LA SERRA D'ARALAR	95
5.1.- Síntesi del treball presentat en forma d'article a Geophysical Journal International	95
5.2.- Article: Seismotectonic constraints at the western edge of the Pyrenees: aftershock series monitoring of the 2002 February 21, 4.1 Lg earthquake.	98
5.3.- Apèndix: Determinacions hipocentrals de la sèrie sísmica d'Aralar	115
6.- ACTIVITAT SÍSMICA ASSOCIADA A L'EMBASSAMENT D'ITOIZ. ESTUDI DE LES RÈPLIQUES DEL TERRATRÈMOL DE MAGNITUD 4.6 LG DEL 18 DE SETEMBRE DEL 2004	117
6.1.- Síntesi del treball presentat en forma d'article a Tectonophysics	117
6.2. – Article: Aftershocks series monitoring of the September 18, 2004 M=4.6 earthquake at the Western Pyrenees: a case of Reservoir-Triggered Seismicity?	121
6.3.- Apèndix: Coordenades de les estacions i determinacions hipocentrals	145
 PART II. Mètodes de sísmica activa: caracterització estructural	 159
7.- PERFILS DE GRAN ANGLE MARCONI. DESCRIPCIÓ DE L'EXPERIMENT I DEL PROCESSAT	161
7.1.- Descripció i objectius de l'experiment	161
7.2.- Adquisició dels perfils de sísmica vertical i reflexió/refracció de gran angle	164
7.2.1.- Descripció de les estacions sísmiques marines	167

7.2.2.- Descripció de les estacions sísmiques terrestres	171
7.2.3.- Pre-processat de les dades: construcció de les seccions sísmiques	173
- Dades dels OBS i OBH de GEOMAR	174
- Dades dels OBS de la UTM	175
- Dades de les estacions sísmiques terrestres	175
7.2.4.- Filtrat de les dades	175
7.3.- Mètodes d'interpretació	181
8.- MODELITZACIÓ DELS PERFILS DE GRAN ANGLE MARCONI	187
8.1.- Perfil 3	188
8.1.1.- Estacions de fons marí (OBS/H): descripció de les dades i dels ajustos obtinguts	194
- Capa sedimentària	194
- Escorça superior	199
- Estructura profunda: Escorça mitja i inferior del Golf de Biscaia	200
8.1.2.- Estacions de Terra: descripció de les dades i dels ajustos obtinguts	201
- Escorça superior	201
- Estructura profunda: Escorça mitja i inferior del Golf de Biscaia	208
- Estructura profunda de l'escorça Ibèrica	214
8.1.3.- Síntesi dels resultats del perfil 3 N-S	217
8.2.- Perfil 6	218
8.2.1.- Estació de fons marí (OBH): descripció de les dades i dels ajustos obtinguts	223
- Escorça superior	223
- Estructura profunda	225
8.2.2. - Estacions de Terra: descripció de les dades i dels ajustos obtinguts	225
- Escorça superior i capa sedimentària	225
- Estructura profunda de l'escorça	232
8.2.3. Síntesi dels resultats del perfil 6 N-S	235
8.3.- Perfil 1	236
8.3.1.- Estacions de fons marí (OBS/H): descripció de les dades i dels ajustos obtinguts	243
- Capes sedimentàries	243
- Estructura fortament aprimada de la planura abissal	244
- Escorça superior de la plataforma Cantàbrica	252
- Estructura profunda a la zona de la plataforma Cantàbrica	253
8.3.2. Estacions de Terra: descripció de les dades i dels ajustos obtinguts	254
- Escorça superior	254

- Estructura profunda	256
8.3.3. – Síntesi del perfil 1 N-S	266
8.4.- Perfil 7	267
8.4.1.- Estacions de fons marí (OBS/H): descripció de les dades i dels ajustos obtinguts	269
- Capa sedimentària	269
- Escorça superior	271
- Estructura profunda	273
8.4.2.- Síntesi del perfil 7 MARCONI	274
8.5.- Perfil 4	275
8.5.1.- Estacions de fons marí (OBS/H): descripció de les dades i dels ajustos obtinguts	279
- Capa sedimentària	279
- Escorça superior a l'Alt de les Landes	286
- Estructura profunda a l'Alt de les Landes	286
- Escorça aprimada de la planura Abissal	287
8.5.2.- Síntesi del model del perfil 4 E-O MARCONI	289
8.6.- Perfil 8	289
8.6.1.- Estacions de fons marí (OBS/H): descripció de les dades i dels ajustos obtinguts	294
- Capa sedimentària	294
- Escorça superior a l'Alt de les Landes i al peu del talús	295
- Escorça superior a la planura Abissal	301
- Estructura profunda	302
8.6.2. Síntesi del perfil 8 E-O MARCONI	303
9.- SÍNTESI I DISCUSSIÓ DELS RESULTATS ESTRUCTURALS	305
9.1.- Evolució i marcadors estructurals	305
9.2.- Síntesi dels models de velocitat obtinguts: estructura 3D del marge Nord Ibèric	309
9.2.1.- Sector occidental	309
9.2.2.- Sector oriental	314
9.2.3.- Transició cap al domini terrestre	316
10.- CONCLUSIONS GENERALS	325
10.1.- Mètodes de sísmica passiva: caracterització sismotectònica	325

10.2.- Mètodes de sísmica activa: caracterització estructural 327

BIBLIOGRAFIA 331

1.-INTRODUCCIÓ

1.1.- Presentació, objectius i estructura de la tesis

La recerca que es presenta en aquesta memòria de tesi està estructurada en dos grans blocs: una primera part dedicada a la caracterització sismotectònica del sector occidental dels Pirineus, mitjançant l'anàlisi de noves dades sísmiques, i una segona part dedicada a l'anàlisi i interpretació de les noves dades de perfils de gran angle obtinguts al marge Cantàbric.

Aquesta estructuració es correspon al fet que la recerca s'ha desenvolupat en el marc de dos projectes finançats pel Pla Nacional de Medi Ambient i Recursos Naturals, el projecte GASPI (AMB98-1012-C02-01) i el projecte MARCONI (REN2001-1734-C03-01), la finalitat dels quals era completar diversos aspectes de caracterització sismotectònica i d'estructura cortical i litosfèrica al Nord peninsular.

Pel que fa a la temàtica de sismicitat, el sector occidental dels Pirineus i la serralada Cantàbrica són zones que tradicionalment han estat mal controlades pels serveis sismològics amb instrumentació permanent. La primera xarxa instal·lada al sector occidental dels Pirineus es va desplegar, a la vessant francesa de la serralada a finals dels anys 70 del segle passat, per estudiar la sismicitat de la regió d'Arette. Aquesta xarxa tenia en el seu origen un caràcter temporal però a la llarga es va consolidar integrant-se a la xarxa sísmica permanent francesa. Al sector oriental de la serralada, tant a la vessant francesa com a la catalana, es van desplegar a mitjans dels anys 80, denses xarxes sísmiques permanents que han permès tenir un control acurat de l'activitat sísmica que té lloc en aquest sector dels Pirineus, i efectuar-ne la seva caracterització sismotectònica. En canvi, a la vessant espanyola, a partir del sector central dels Pirineus fins a l'extrem occidental de la península, es pateix d'una baixa densitat d'instruments i d'una distribució poc apropiada per produir-hi catàlegs sísmics de qualitat. El primer desplegament de la xarxa sísmica del *Instituto Geográfico Nacional* (IGN), efectuat a finals dels anys 80, consistia en una malla a nivell nacional amb els instruments molt espaiats que deixava un gran buit a la zona de la conca Basco-Cantàbrica i la Serralada Cantàbrica. Fins l'any 2001, amb l'inici del desplegament de