

Seismic Oceanography

A New Tool to Characterize Physical Oceanographic Structures and Processes

Grant George Buffett

ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tesisenxarxa.net) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tesisenred.net) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tesisenxarxa.net) service has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading and availability from a site foreign to the TDX service. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service is not authorized (framing). This rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author.

Estructura i Dinàmica de la Terra
Institut de Ciències de la Terra "Jaume Almera"
Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Departament de Geodinàmica i Geofísica
Universitat de Barcelona

Seismic Oceanography

A New Tool to Characterize Physical Oceanographic Structures and Processes

Memòria presentada per Grant George Buffett per optar al Títol de Doctor en Geologia

Aquesta tesi ha estat realitzada dins el Programa de Doctorat Exploració, Anàlisi i modelització de conques i sistemes orogènics bienni 2006-2008, de la Universitat de Barcelona.

Director:

Prof. Dr. Ramón Carbonell i Bertrán

Tutor:

Dra. Pilar Queralt i Capdevila

Grant George Buffett

Barcelona, Novembre de 2010

APPENDIX I

Resum en Català (Summary in Catalan)

Problema Científic, Motivació i Objectius de Recerca

La circulació oceànica⁵ a gran escala redistribueix calor i aigua dolça, i és per això que afecta el clima global. Un dels seus principals mecanismes és, juntament amb la calor superficial i el flux d'aigua dolça, la mescla diapícnica (a través de línies d'igual densitat) en l'interior de l'oceà. L'energia necessària per forçar els processos de mescla prové de les mareas i el vent [Wunsch, 2002]. Aquesta energia es transforma en ones internes i finalment en turbulència i dissipació molecular. Les masses d'aigua oceànica estan estratificades i sovint separades per nivells relativament primers amb forts gradients de temperatura i/o salinitat a través dels quals es transfereixen massa i calor per mantenir la circulació global i l'estratificació. No obstant, aquests processos són difícils d'observar a la pràctica. Per sota d'uns pocs metres, l'oceà és opac a la llum i a observacions directes dels processos profunds (excepte aquells que tenen una expressió en superfície, com ara les ones internes) [Thorpe, 2005]. Per tant, observacions òptiques directes en profunditat són pràcticament impossibles. Amb aquesta finalitat, el desenvolupament de metodologies i instruments científics per mesurar els processos a l'interior de l'oceà són de gran importància per a poder-los entendre.

La motivació que hi ha al darrera d'aquest treball es pot separar en dos nivells: 1) En termes generals, i acadèmicament, és la curiositat purament científica d'estudiar l'oceà per tal de comprendre millor el seu paper en el context de les Ciències de la Terra; 2) Concretament, la motivació és desenvolupar les eines necessàries per a observar l'oceà a una escala espacial i temporal que no és possible amb les tècniques tradicionals oceanogràfiques, permetent així generar models més precisos de circulació oceànica i, per tant, de les interaccions oceà-clima.

L'objectiu a llarg termini d'aquesta investigació és (com la majoria d'activitats científiques) desconegut. La majoria dels descobriments en ciència són fortuïts i

⁵ En aquesta tesi, el terme 'oceà' es refereix al conjunt de tots els oceans a escala mundial, els mars que connecten, els estrets, i les aigües de plataformes continentals i els mars interiors, com el Mar Mediterrani.

inesperats. L'objectiu a curt i mitjà termini d'aquesta tesi és el desenvolupament de noves eines d'oceanografia física que proporcionin noves perspectives sobre la dinàmica oceànica. Aquest conjunt d'eines està emergint com una metodologia sòlida dins de l'oceanografia física coneguda com 'oceanografia sísmica'. Per definició, l'oceanografia sísmica és l'aplicació de la sísmica de reflexió multicanal (MCS) a l'oceanografia física. Aquesta definició, però, podria estar subjecte a una futura revisió i perfeccionament, ja que el desenvolupament d'eines d'oceanografia sísmica inevitablement donarà lloc a noves perspectives. Per exemple, el mètode d'adquisició sísmica pot ser modificat segons els suggeriments de Ruddick et al. [2009] de manera que s'utilitzi una font contínua menys potent que en la sísmica tradicional. O també pot ser aplicable a altres aspectes de l'oceanografia (o limnologia), com ara la biologia marina o l'oceanografia química. Ja s'han fet avenços significatius en la comprensió de processos físics oceanogràfics i es poden fer més progressos mitjançant un major desenvolupament i aplicació en zones dels oceans on la utilització de tècniques de l'oceanografia física únicament poden deixar buits en les dades.

L'Àrea d'Estudi: Golf de Cadis i la costa occidental Ibèrica

El corrent de sortida del Mediterrani, d'ara en endavant MOW (Mediterranean Outflow Water), és un laboratori natural per a la oceanografia sísmica. El MOW va ser escollit per a aplicar la sísmica de reflexió en oceanografia per tres raons principals:

1) La seva forta empremta oceanogràfica. Degut a la penetració del MOW dins l'Atlàntic Nord a través de l'Estret de Gibraltar, un fort contrast de salinitat (entre 36,35 i 36,65 psu) i, per tant, de densitat (entre 27,3 i 27,7 kg/m³) s'observa entre el MOW i les aigües de l'Atlàntic [Baringer i Price, 1997]. Aquests contrastos de densitat (juntament amb la velocitat del so) són els factors que contribueixen al coeficient de reflexió, de manera que fan possible la identificació de diferents estructures i processos.

2) La gran varietat de característiques oceanogràfiques i topogràfiques, com un tal·lús continental, un accidentat fons marí (com les muntanyes submarines i conques) i els corrents de la Mediterrània a mesoescala ('Meddies'). Es creu que aquestes estructures i

processos juguen un paper molt important en el manteniment de la distribució de la temperatura i la salinitat a l'Atlàntic Nord [Bower et al., 1997]. Per tant, l'oceanografia sísmica en aquesta regió opera en un laboratori natural on estudiar fenòmens oceanogràfics reals com ara la interacció amb la topografia, així com la caracterització dels processos de mescla i circulació.

3) Finalment, existeixen nombrosos conjunts de dades tant oceanogràfiques com sísmiques arxivades, que poden aportar nova informació a les interpretacions ja existents.

El MOW és una gran llengua d'alta salinitat d'aigua Mediterrània (MW, Mediterranean Water), que surt de l'Estret de Gibraltar en el Golf de Cadis, forçada principalment per la densitat (Figura A de la 'Introduction'). La MW, degut a l'alt nivell d'evaporació al mar Mediterrani és més salada i, per tant, més densa que l'aigua de l'Atlàntic (AW, Atlantic Water) [Richardson et al., 2000]. El MOW flueix com una cascada pel talús continental i s'equilibra a profunditats d'entre 500 i 1500 m, mentre s'introdueix i barreja amb les aigües de l'Atlàntic Nord Central (North Atlantic Central Water, NACW) i flueix com un corrent cap a l'oest, conegut com Subcorrent Mediterrani (Mediterranean Undercurrent, MU) (e.g., Heezen i Johnson [1969]; Madelain [1970]; Bower et al. [2002]).

El MU es desvia cap al nord al llarg de la costa d'Ibèria com a conseqüència de l'efecte de Coriolis, degut a la conservació del moment angular de la Terra en rotació. El MU flueix semi-confinat per les aigües de l'Atlàntic que l'envolten, amb les quals interactua. És d'esperar que a mesura que la MU s'allunya de la seva font hi hagi un canvi en les seves propietats físiques a causa de la mescla interna i la interacció amb les masses d'aigua que l'envolten i la plataforma continental. La Figura B (Introduction) mostra la ubicació de totes les línies analitzades durant el període d'estudi (juliol 2006 - novembre 2010).

Estructura de la tesi

La principal part d'aquesta tesi la constitueixen quatre articles, de revises amb avaluadors externs, publicats per l'autor i co-autors al llarg del seu període d'investigació (capítols 1, 2 i 4); així com un article sotmès (Capítol 3). En la segona part, com a suport per als lectors no familiaritzats, s'aborden els antecedents sismològics (Capítol 5) i oceanogràfics (Capítol 6) en el context d'algunes de les estructures i processos que són susceptibles de ser identificats mitjançant la sísmica. Les conclusions generals es presenten en el Capítol 7 i en el Capítol 8 es donen algunes recomanacions per a futures investigacions i desenvolupaments (Part III). La tesi es complementa amb quatre apèndixs (el primer d'ells és aquest resum). L'apèndix II conté els diagrames de flux utilitzats per l'autor en el processament de les dades sísmiques. L'Apèndix III conté 7 desplegable de les seccions sísmiques en gran format, ja que són difícils de visualitzar en DIN-A4. Finalment, l'apèndix IV conté un glossari de termes útils per ajudar als lectors no iniciats en qualsevol de les branques de la sismologia o l'oceanografia.

Aquesta tesi pot tenir diferents aspectes d'interès. Pot ser llegida de principi a fi, tal com s'ha pretès a l'escriure-la, però també es pot utilitzar com una referència complerta per a aquells que vulguin iniciar-se en la recerca en oceanografia sísmica. D'aquesta manera, pot ser utilitzada per a finalitats específiques, referint-se a la secció corresponent, segons sigui necessari. Tenint en compte això, cada capítol s'ha escrit amb la major independència possible. No obstant, hi ha alguns solapaments intencionats i s'ha fet el major esforç possible per fer que aquest treball sigui el més complet possible, evitant redundàncies innecessàries.

Metodologia

Adquisició

La sísmica de reflexió ha estat utilitzada amb èxit durant dècades per tal d'obtenir imatges del subsòl terrestre. És un mètode ben consolidat, descrit per primera vegada per Reginald Fessenden i desenvolupat per la indústria dels hidrocarburs per a

l'exploració de petroli i gas [Finch, 1985]. Els primers sondeigs sísmics es van realitzar a la primera part del segle XX, i consistien en una font (que emet un dispar) i un receptor situats a la superfície i separats per una distància coneguda (offset). El temps transcorregut entre el primer dispar i la detecció de la primera arribada d'energia al receptor s'utilitzava per calcular la profunditat a la interfície reflectora. No obstant això, calia fer moltes suposicions per fer aquest càlcul. El subsòl era considerat com homogeni i isòtrop i la interfície reflectora, horitzontal. A més, la profunditat a la interfície es considerava molt gran en relació amb la separació entre font i receptor, permetent aproximar que la font i el receptor estan co-localitzats, de manera que es mesurava una reflexió quasi nul·la de compensació. Tot i aquestes suposicions, el mètode va permetre per primera vegada provar el concepte de la sísmica de reflexió.

En l'actualitat, els estudis de sísmica de reflexió marina es realitzen des d'un vaixell de remolc mitjançant una font impulsiva i un 'streamer' (cable ple d'hidròfons) que registra el senyal i soroll (Figura 1.1). L'energia acústica viatja a través de la columna d'aigua i de l'escorça de la Terra, alhora que es debilita i perd energia per divergència esfèrica. Els límits de la impedància acústica definits per les variacions en la densitat i la velocitat del so modifiquen la raó entre l'energia transmesa i reflectida. L'energia transmesa és absorbida pel mar i la terra, i és atenuada i es converteix en altres formes d'energia (per exemple, l'energia cinètica, o calor). L'energia reflectida també és atenuada, i es registra mitjançant l'streamer, i aquest registre s'emmagatzema per al seu posterior processat.

En aquest punt cal assenyalar que els perfils de sísmica de reflexió sobre l'oceà no representen una imatge instantània real del que seria la Terra sòlida. Això és degut a la dinàmica oceànica, amb canvis significatius en l'estructura termohalina, que fa que les dades registrades a la part frontal i final de la secció sísmica, estiguin separades temporalment per hores o dies, depenent de la longitud de la secció obtinguda (Figura 5.2). Per tant, s'ha de tenir precaució a l'hora d'interpretar les dades. Les seccions 2D d'oceanografia sísmica (o 'instantànies') es redefeixen com seccions 2D quasi-instantànies d'un oceà constantment canviant.

El mètode 'common midpoint' (CMP - punt mitjà comú) (Figura 5.4) dissenyat per a l'adquisició sísmica aprofita la redundància de fonts i receptors per produir una imatge contínua del subsòl, així com per minimitzar el soroll. En lloc d'una única font i un únic receptor, hi ha un conjunt de fonts i receptors a intervals regularment espaiats que permeten obtenir diferents distàncies (offsets) entre fonts i receptors. L'assumpció que es fa és que les diferències de temps entre les traces individuals d'un dispositiu CMP no es veuen afectades per diferències estructurals [Cox, 1999]. Aquesta suposició no és del tot vàlida en molts casos, com en prospeccions amb interfícies accidentades, o en estudis marins on l'streamer és mogut pels corrents superficials. Malgrat tot, aquests afectes es tenen en compte mitjançant correccions geomètriques. En aquests casos el 'binning' és necessari per agrupar els punts mitjans comuns en grups definits per l'usuari (o, 'bins'). L'objectiu final del mètode CMP és aproximar una secció de zero-offset (com si la font i el receptor fossin co-localitzats), la qual cosa no és possible a la pràctica.

Alguns dels reptes que cal afrontar en l'adquisició de dades d'oceanografia sísmica són:

1) La dinàmica de Mar – una secció sísmica en dues dimensions de la Terra sòlida efectivament mostra una "instantània" en el temps. No obstant això, la dinàmica dels oceans és tal que el temps necessari per adquirir les dades (desenes d'hores) és de l'ordre del moviment de reflectors (Isopicnes) en temps real. Així, per exemple, les dades sísmiques registrades al començament d'una línia i les registrades en el seu extrem no poden tenir una correlació causal en el temps. Això planteja un repte per a l'interpret i limita la quantitat d'informació que contenen les dades. Tenint en compte la velocitat dels corrents oceànics (de l'ordre de desenes a centenars de centímetres per segon) [Pedlosky, 1979], és un error esperar obtenir una instantània real d'una gran part de l'oceà en un temps determinat. L'excepció a això pot ser abordada mitjançant l'observació espacial i temporal d'estructures estables, com ara les escales termohalines. Aquestes estructures s'observen en diferents regions dels oceans i han estat caracteritzades sísmicament (e.g., Fer et al. [2010]; Biescas et al. [2010]) i s'han observat oceanogràficament com estructures quasi-permanents a les parts més profundes del Mar Tírrè (veure Zodiatis i Gasparini [1996] i Figura 6.3).

2) Ample de banda de la font - Com s'explica en la Secció 5.3.1, el control sobre l'ample de banda de la font és un factor determinant per a caracteritzar l'estructura termohalina amb una resolució horitzontal i vertical adequada. Les fonts sísmiques utilitzades en oceanografia han de ser modificades per satisfer els requisits particulars de la regió i objectiu d'interès. Per exemple, per als objectius de poca profunditat, és possible que una font d'alta resolució sigui suficient, mentre que per caracteritzar estructures més profundes, caldria utilitzar una combinació de diferents freqüències [Hobbs et al., 2009]. D'altra banda, l'impuls de la font no genera una bombolla simple que s'expandeix i es contrau amb claredat. L'oscil·lació de la bombolla sempre afegeix soroll a la font. Això es compensa en certa mesura mitjançant l'ús de pistoles Generador-injector (GI), que es componen de dues cambres d'aire independents. El generador produeix en una càmera la bombolla d'aire primari, mentre que la càmera de l'injector és més petita i s'utilitza per atenuar les oscil·lacions de la bombolla després del col·lapse inicial [Hobbs, 2007]. La correcta estimació del senyal de la font és determinant en les tècniques de processament i modelat sísmics més complexes [e.g., Papenberg et al., 2010].

Processat

L'objectiu del processat o tractament de dades sísmiques és manipular les dades sísmiques per obtenir un tall en 2D interpretable d'un volum del subsòl. Un tractament acurat de les dades sísmiques requereix certes eines i operacions. Algunes d'aquestes operacions són necessàries per a la reducció i anàlisi de les dades, altres són opcionals o aplicables en certs tipus de dades. El processat de dades sísmiques es beneficia en gran mesura del coneixement que es té de com s'han adquirit aquestes dades per tal d'escollir les eines adequades a aplicar o els mètodes que cal testejar. La següent és una descripció d'algunes de les eines més importants, amb referència quan sigui necessari al seu ús en l'oceanografia sísmica.

El processat comença amb el mostreig del senyal sísmic analògic i continu registrat, convertint-lo en un senyal digital (wavelet). Aquesta conversió permet representar el senyal com una sèrie temporal de manera que les seves característiques (freqüència,

amplitud i fase) poden ser manipulades de determinades maneres. Les dades es converteixen en el domini de freqüència mitjançant la transformada de Fourier (Secció 5.4.2), s'apliquen els filtres necessaris basats en la velocitat del so, i s'aplica la transformada inversa per convertir novament el senyal al domini temporal i poder-lo representar en el domini espai-temps. En oceanografia sísmica, l'ona directa (l'ona que viatja directament des de la font fins al receptor sense reflectir-se) domina les parts superiors de la imatge representada i ha de ser adequadament atenuada (Secció 5.4.4). Les dades també poden ser filtrades en funció de la freqüència, per evitar sorolls no desitjats en determinades bandes. Per al conjunt de dades d'un CMP determinat, per tal de corregir l'efecte de 'normal move-out' (és a dir, l'efecte degut a que el temps de propagació en els receptors situats a majors distàncies és més gran), cal fer un anàlisi de velocitat. Aquest consisteix en utilitzar un valor concret de la velocitat del so, que permeti aplanar els reflectors hiperbòlics, com si tots els receptors estiguessin col·localitzats. Per a fer aquest anàlisi cal conèixer o assumir els valors de la velocitat de propagació del so en el mar a diferents profunditats. Per això, sovint s'utilitza com a punt de partida les dades de sondes oceanogràfiques in situ. Després d'aquestes correccions, les traces obtingudes s'apilen (o sumen) per tal d'eliminar significativament el soroll aleatori i augmentar la relació senyal-soroll. Finalment, es realitza una migració de les dades, per tal de desplaçar els reflectors inclinats i col·lapsar les hipèrboles de difracció.

Algunes eines utilitzades en oceanografia física

El desenvolupament de l'ús de dispositius CTD (conductivitat, temperatura i profunditat) des de 1955 va permetre sondejar de manera precisa i directa l'oceà i continua sent àmpliament utilitzat [Ingmanson i Wallace, 1995]. Els dispositius CTD van permetre les primeres mesures Eulerianes directes de la variació de les propietats físiques amb la profunditat en l'oceà, proporcionant una mesura de la salinitat (conductivitat), temperatura i profunditat (pressió). L'ús de sondes 'in situ' és també molt comú ja que permeten una mesura Euleriana de les propietats físiques de l'oceà en punts fixos en l'espai en funció de la profunditat i poden ser desplegades a mesura que el vaixell es mou, la qual cosa permet fer-ho simultàniament amb l'adquisició de dades

sísmiques. Aquestes sondes descendeixen en caiguda lliure i són fàcils de desplegar i d'alta fiabilitat. Una xarxa horitzontal de dades molt més densa es pot obtenir mitjançant els dispositius XBT, mentre que els dispositius CTD requereixen que el vaixell s'aturi per tal de fer les mesures. Els dispositius XBT (Batitermògraf fungible, Figura 6.1) permet mesurar resolucions verticals tant petites com 65 cm i variacions de temperatura de $\pm 0.1^\circ\text{C}$ [Boyd i Linzell, 1993]. La resolució vertical de les sondes in situ és molt millor que la de les dades sísmiques, mentre que un dels principals avantatges de les dades sísmiques és la seva resolució horitzontal. Els dispositius CTD fungibles o XCTDs també es poden desplegar juntament amb els XBTs, però són més cars i menys fiables. Malgrat tot, les mesures de conductivitat donen una estimació de la salinitat que pot ser utilitzada com un factor per a determinar la velocitat del so.

Processos i estructures oceanogràfics

Hi ha un gran nombre d'estructures i processos en l'oceà que són d'interès acadèmic. Aquesta tesi n'aborda alguns d'ells. Els que són susceptibles de detecció sísmica es poden resumir en:

1) Escalles termohalines: són variacions regulars, ben definides i en forma d'escala, dels gradients verticals de temperatura i salinitat, que es formen quan la temperatura i salinitat augmenten en profunditat i s'equilibren amb la densitat [Kelley, 1984].

2) Remolins: són lents de fluid quasi-esfèriques que es formen en presència de la barreja diapicna (de densitats) i de turbulències, on les línies diapicnes es veuen pertorbades. En el Mediterrani, els 'Meddies' (o remolins del Mediterrani) són grans (40 a 150 km de diàmetre) remolins anticiclònics d'aigües del Subcorrent Mediterrani (MU), amb salinitats d'aproximadament 36,5 psu i temperatures màximes del voltant dels 13°C [Richardson et al., 2000].

3) Fronts, que, igual que en l'atmosfera són deguts als forts contrastos de les propietats a través d'una regió determinada. Poden formar-se a causa de la interacció de les ones

internes a la plataforma continental, on les línies isopícnes són més abruptes [Thorpe, 2005].

4) Els corrents oceànics poden ser objectius molt interessants per l'oceanografia sísmica, especialment en els seus límits, on arrosseguen i interactuen amb les aigües circumdants. El Subcorrent mediterrani (MU) és un bon exemple d'un corrent amb forts contrastos de temperatures i salinitats (Buffett et al. [2009], Capítol 3).

Alguns dels processos oceanogràfics que poden ser estudiats mitjançant perfils MCS són els següents:

1) La mescla (o barreja) és el procés pel qual es combinen diferents masses d'aigua. Pot ocórrer a gran escala (circulació global), impulsada principalment pels vents i les mareas [Wunsch, 2002], o a escales més petites, a nivell molecular. El procés de mescla suavitza les distribucions de les propietats de l'oceà, com la calor, la sal i altres productes químics. Pot tenir lloc al llarg (mescla lateral) o a través (mescla diapícna) de línies isopícnes. Un aspecte curiós de les mescles són els coneguts com 'dits de sal' (salt fingers) [Stern i Turner, 1969], que es produeixen quan una massa d'aigua salada calenta se situa per sobre d'una massa d'aigua dolça i més freda. Si es considera una petita porció d'aigua salada cobrint una zona d'aigua dolça, el plomall d'aigua salada que s'enfonsa va perdent calor, que és absorbida per l'aigua dolça abans de perdre la seva sal, sent més densa que l'aigua que l'envolta, i per tant, continuarà enfonsant-se. De la mateixa manera, si una petita porció d'aigua freda es desplaça cap amunt, guanyarà calor per difusió de les aigües circumdants, les quals la faran més lleugera que les aigües circumdants i faran que continuï ascendint. Pel fet que la salinitat es difongui de manera molt menys eficient que la temperatura dóna lloc, paradoxalment, a un procés que barreja la salinitat més eficientment que la temperatura. Aquests dits de salt contribueixen al procés de mescla diapícna dels oceans, la qual cosa ajuda a regular els canvis graduals en la circulació global, que en gran mesura alhora afecten el clima. La mescla també pot tenir lloc com a efecte de l'acció de les mareas i les ones internes [Thorpe, 2005].

2) La turbulència és un estat de moviment energètic, de rotació i amb remolins que genera gradients relativament grans de velocitat a petites escales (d'1 mm a 1 cm), fent que es donin les condicions per a que la dissipació deguda a la viscositat converteixi l'energia cinètica en calor [Thorpe, 2005]. La turbulència i la barreja són processos estretament lligats de manera que zones d'elevada turbulència són propenses a la barreja, si més no a petita escala. No obstant això, la barreja i la intercalació de l'estratificació a través de les superfícies isopícnes no ha de ser necessàriament un procés turbulent.

3) La dinàmica: la dinàmica dels oceans representa un difícil repte per a l'oceanografia sísmica, ja que la sísmica multicanal (MCS) es va desenvolupar exclusivament per a la indústria dels hidrocarburs, per caracteritzar les estructures sub-oceàniques. Aquestes són un medi estàtic en comparació amb l'oceà, on els corrents són típicament de l'ordre de 0.5 ms^{-1} i on les ones internes es poden propagar a velocitats de l'ordre d' 1 ms^{-1} . Aquestes velocitats són suficients per evitar la generació d'imatges sísmiques instantànies, que són característiques en l'estudi de la litosfera.

4) Les ones internes són ones de gravetat a l'interior de l'oceà que es generen degut a canvis en equilibri hidrostàtic, és a dir, l'equilibri entre la gravetat i la flotabilitat [Thorpe, 2005]. Les ones internes poden tenir diferents orígens, com les oscil·lacions en la pressió atmosfèrica, el vent, les forces de marea o la interacció amb el fons marí [Miropol'sky, 2001]. Holbrook i Fer [2005] van utilitzar per primera vegada l'oceanografia sísmica per estimar espectres d'ones internes a la capa límit entre el corrent Atlàntic Noruec i les aigües profundes del Mar de Noruega. Els autors van observar que l'espectre de nombre d'ona horitzontal obtingut a partir de les dades sísmiques es podia correlacionar amb l'espectre de Garrett-Munk (Garrett-Munk tow spectra), que descriu el camp d'ones internes.

5) La interacció amb la topografia és una altra contribució important de la sísmica multicanal (MCS) a l'oceanografia. Les ones internes es generen com 'ones de sotavent', on l'aigua estratificada es mou al llarg d'obstacles com muntanyes submarines [Thorpe, 2005]. Biescas et al. [2010] van analitzar sísmicament escales termohalines en

interacció amb una muntanya submarina (el Banc Gorringe al Golf de Cadis), observant com les escales termohalines es veien distorsionades per aquesta interacció. Holbrook i Fer [2005] van mostrar un efecte de distorsió similar en que les isopícnes interactuen amb el pendent topogràfic. És a dir, a certa distància del pendent, els reflectors eren més continus, mentre que prop del pendent, els reflectors ' s'amunteguen ' creant un patró ondulat.

Conclusions

L'oceanografia sísmica està emergint des dels darrers anys com una eina viable per a l'oceanografia física. Aquesta emergència es deu a dues raons específiques: 1) l'eina ha estat àmpliament utilitzada amb èxit per la indústria i a nivell acadèmic durant més de 30 anys, pel que es demostra la seva solidesa i fent, per tant, el seu desenvolupament i l'adaptació a l'oceanografia una tasca relativament senzilla, i 2) el desig d'oceanògrafs físics per a visualitzar a grans escales horitzontals el que han sospitat durant anys, però no han estat capaços de produir, per manca de suficients de mostres horitzontals. Dit això, l'oceanografia sísmica és molt més que la visualització de flux horitzontal i continuarà avançant, sempre i quan es disposi de finançament per a la recerca. Diversos autors han demostrat que es poden obtenir els paràmetres físics reals a partir de les dades, incloent, però no limitat a, les estimacions de la temperatura i la salinitat. D'altra banda, a més d'entendre el mar en un sentit estrictament acadèmic, és evident que la comprensió de la circulació oceànica és de suma importància per a la generació de models precisos del clima.

El següent és un resum de les principals conclusions del treball d'aquesta tesi, inclòs dins de quatre articles publicats i un cinquè en preparació.

Capítol 1 - Seismic Reflection Along the Path of the Mediterranean Undercurrent (Reflexió sísmica al llarg de la trajectòria del Subcorrent Mediterrani)

Aquesta investigació va ser concebuda en el mes d'abril de 2007 mentre es realitzava l'experiment GO al Golf de Cadis. A partir de la comprensió dels mecanismes del

Corrent de Sortida del Mediterrani i del Subcorrent Mediterrani (el qual és creuat per dades sísmiques adquirides en el Marge Ibèric-Atlàntic, a l'agost i setembre de 1993), es va fer evident que ha de ser possible comprovar si les dades sísmiques són sensibles a certes propietats intrínseques i a les seves variacions. Així, es van processar i analitzar quatre línies sísmiques, corresponents a diferents seccions del Subcorrent Mediterrani en diferents punts al llarg de la seva trajectòria, allunyant-se de la seva font a l'Estret de Gibraltar. Les principals conclusions d'aquest treball són:

- Les amplituds de les traces sísmiques es poden utilitzar per analitzar l'evolució dels valors de les propietats estructurals i intrínseques del Subcorrent Mediterrani des del seu origen a l'Estret de Gibraltar. Aquestes amplituds disminueixen proporcionalment amb la temperatura i inversament proporcional amb la salinitat (però la dependència és major amb la temperatura, Figura 1.10), de manera concordant amb altres estudis. D'aquesta manera, les amplituds de les traces representen un indicador de la temperatura.
- Es van poder identificar tres masses diferents d'aigua: l'aigua Nord-Central l'Atlàntica (\approx 000-500 m), l'aigua Mediterrània (\approx 500 m– 1500 m) i l'aigua profunda Nord Atlàntica (\approx 1.500 m fins al fons marí). La profunditat de l'aigua Mediterrània en una localització donada ve determinada per un increment d'un factor de 5 o més en l'amplitud sísmica RMS en relació a l'amplitud corresponent a les aigües circumdants.
- Es van observar diverses característiques curioses ens les dades sísmiques, com l'evolució dels meddies (remolins d'aigua Mediterrània o grans lents de salt) en funció de la distància recorreguda. És a dir, sembla ser que els meddies perden la seva estructura interna a mesura que es van mesclant al llarg del temps (es pot veure en l'Appendix III, seccions IAM-3 i IAM-11).
- S'observa una disminució general en l'estratificació consistent lateral a les àrees dels perfils al llarg del corrent, dins dels 80 km més propers a la costa de Portugal, una regió en que estudis independents localitzaven el Subcorrent

Mediterrani. Aquesta observació indica que l'estratificació és lentament distorsionada degut al flux del Subcorrent Mediterrani.

Capítol 2 - Stochastic Heterogeneity Mapping Around a Mediterranean Salt Lens (Caracterització Estocàstica Heterogènia d'una Lent de Salt d'Aigua Mediterrània)

En aquest treball es va seguir un enfocament estadístic per a l'anàlisi de dades sísmiques. La premissa darrera d'aquest enfocament és que els diferents tipus i graus de reflectivitat són susceptibles als diferents mètodes d'ensonificació sísmica. La caracterització estocàstica heterogènia es va concebre per abordar la dificultat d'identificar determinades litologies. És a dir, mentre que la sísmica de reflexió permet caracteritzar correctament estratificacions sedimentàries horitzontals i sub-horitzontals, aquest mètode pot fallar quan l'objectiu són roques cristal·lines. Això és degut als diferents tipus de reflectivitat deguts a l'estructura interna de les roques. Roques altament estratificades mostren uns límits en l'impedància acústica molt ben marcats que es reflecteixen especularment. En canvi, en règims amb una geologia complexa com ara zones d'encavalcaments i roques cratòniques, la reflectivitat és difusa. La caracterització estocàstica heterogènia analitza estadísticament el camp de reflectivitats d'una imatge sísmica, i identifica la presència d'heterogeneïtats o anomalies, en una traça que altrament seria homogènia.

L'oceà no és ubiqu ni està estratificat de manera uniforme. Es caracteritza per tenir moltes zones de turbulència i mescla, on els estrats són constantment creats i destruïts per les interaccions amb les masses d'aigua del voltant i l'intercanvi de calor entre elles. Aquest fet fa que les estructures físiques i processos oceanogràfics siguin ideals per a testejar els patrons de la reflectivitat difusa. Des del camp de la reflectivitat d'un conjunt d'imatges sísmiques apilades, es van extreure dos paràmetres útils: el nombre de Hurst i la longitud de correlació. Per determinar quins processos poden diferir vam analitzar el perímetre d'un meddy en tres zones diferents: la part superior, inferior i ambdós costats.

- Els càlculs del nombre de Hurst obtinguts per a la part superior del meddy s'avenen amb treballs teòrics recents, que utilitzen valors d'entre 0,25 i 0,5 per modelar superfícies d'ones internes basats en la simulació d'un nombre d'ona Garrett-Munk (GM76) d'espectre -2 .
- Malgrat això, la longitud de correlació corresponent (longitud d'escala) determinada sobre el mateix camp de reflectivitats no s'ajusta també a la reflectivitat sísmica específica.
- Es van proposar dues possibles explicacions: (1) degut al fet que els paràmetres estocàstics es deriven del camp de reflectivitats en lloc del camp de la impedància, l'escala de longituds pot ser subestimada, i (2) pel fet que la imatge sísmica del meddy és una secció bidimensional d'un objecte tridimensional complex i dinàmic, és probable que les longituds d'escala estimades siguin esbiaixades per la direcció del flux.

No obstant això, aquesta publicació va significar un primer pas en l'aplicació d'un enfocament estadístic, no determinista a les dades d'oceanografia sísmica. Treballs posteriors seguint aquest enfocament mitjançant l'ús de sondes oceàniques in situ (XBT) estan en preparació, per confirmar la correlació dels paràmetres estocàstics en el camp de l'impedància acústica, és a dir, per limitar el grau de correlació amb el camp de reflectivitats. Aquestes restriccions podrien ser aplicades als estudis en terra sòlida, on la funció de la velocitat del so (a través d'un pou) és pràcticament indeterminable.

Capítol 3 - Near Real-time visualization of thermohaline finestructure (Visualització quasi instantània de l'estructura termohalina)

L'oceà és dinàmic a escales de temps més curtes que els temps d'adquisició. La visualització de l'estructura termohalina és una manera important de poder comprendre la dinàmica dels oceans ja que quantifica el seu moviment. En aquest treball es va presentar la primera animació quasi a temps real del moviment del que s'interpreta com ones internes en desenvolupament. També es va provar un esquema de processat que

aprofita el pas dels sensors sísmics sobre un punt fix del fons de l'oceà per crear una sèrie d'imatges (o 'stacks') i poder construir una pel·lícula (amb 7 imatges) en que es veuen les fluctuacions de l'estructura termohalina a intervals de temps de 3.5 minuts. D'aquesta manera cada imatge mostra una estructura termohalina lleugerament diferent i ens va permetre construir una imatge de l'oscil·lació temporal de les ones internes.

Capítol 4.1 - Imaging meddy fine structure using multichannel seismic data (Caracterització de l'estructura fina d'un 'meddy' utilitzant dades de sísmica multicanal)

Aquest document va ser una carta breu, de recerca d'alt impacte. La contribució de l'autor en aquest treball va ser part del processat de dades sísmiques, interpretació i l'edició del text. El treball va ser el primer a caracteritzar l'estructura d'un meddy sísmicament, tant horitzontalment com vertical, i comparar-ho amb els angles de Turner (TU). Aquests angles són indicadors pràctics que diferencien les regions propenses a la convecció difusiva ($90^\circ < TU < 45^\circ$) i a la inestabilitat dels dits de sal ($45^\circ < TU < 90^\circ$) de les regions estables ($TU < 45^\circ$). Les principals regions dins del meddy, prèviament detectats per instruments oceanogràfics convencionals, s'observen clarament a les imatges sísmiques, com ara:

- La zona límit superior, que es caracteritza per la presència d'escassos però prominents reflectors laterals continus.
- La zona límit inferior, amb més reflectors, més curts i entre tres i quatre vegades més febles, distribuïts en una regió més àmplia.
- Una regió central amb reflectors molt dèbils.
- Pel que fa als meddies, el mètode MCS permet la detecció d'aquestes lents en rotació d'alta salinitat d'aigua del Mediterrani, al mateix temps que dona informació sobre les seves dimensions, així com la distribució vertical i lateral detallada i les característiques de la seva estructura.

- Els resultats mostren que la utilització de fonts potents i grans longituds dels streamers (en aquest cas les utilitzades per caracteritzar estructures corticals) són addients per a l'oceanografia sísmica.

Capítol 4.2 - Relative contribution of temperature and salinity to ocean acoustic reflectivity (Contribució relativa de la temperatura i salinitat a la reflectivitat acústica de l'oceà)

El treball de Sallarès et al. [2009] va permetre calcular el grau de reflectivitat que es pot atribuir a qualsevol de les variacions de temperatura o salinitat (suposant un augment constant de la pressió amb la profunditat). La contribució de l'autor a aquest treball va ser en el processat i anàlisi de dades sísmiques, la interpretació i les correccions d'estil.

Per a una determinada profunditat (pressió), la temperatura i la salinitat són els factors que contribueixen a la densitat i la velocitat del so, i, per tant, a la impedància acústica, i al mateix temps, al coeficient de reflexió. Aquest treball va ser una contribució important a l'oceanografia sísmica perquè va permetre aïllar les causes de la reflectivitat acústica de l'oceà, un primer pas per determinar les propietats físiques de les masses d'aigua directament a partir de dades sísmiques.

Les principals conclusions d'aquest treball van ser:

- La principal contribució al coeficient de reflexió són les variacions de la velocitat del so, amb un 90-95% de contribució, mentre que la densitat només en representa el 5 - 10%.
- De manera similar, la temperatura representa aproximadament el 80% de la contribució i la salinitat representa el 20% restant.
- No obstant això, la proporció parcial de la temperatura i la salinitat depèn de cada regió. Per exemple, prop de la part superior de la massa d'aigua del Mediterrani, la salinitat representa fins a un 40% de la contribució parcial,

mentre que a la base de les aigües del Mediterrani, la salinitat només representa aproximadament el 15%.

- L'alta variabilitat de les contribucions parcials fa que sigui pràcticament impossible extreure valors precisos de la temperatura i la salinitat a partir únicament de dades sísmiques.
- A la regió d'estudi, les àrees dominades per una contribució d'alta salinitat són més propenses a la convecció difusiva, mentre que les zones amb poca contribució de la salinitat són més propenses a processos que involucren la formació de 'dits de sal' (salt fingers).

Aquests quatre estudis il·lustren la diversitat de tècniques de l'oceanografia sísmica en combinació amb mesures oceanogràfiques històriques i coincidents/ simultànies. Aquests, juntament amb altres articles, formen la base d'una metodologia cada vegada més comú en l'oceanografia física. Al llarg del període d'investigació de l'autor, s'han realitzat avenços importants pel que fa a la comprensió de la turbulència, la mescla i la interacció amb la topografia, la inversió de dades sísmiques per obtenir propietats físiques, els meddies i la dinàmica dels oceans.

Fora dels reptes tècnics obvis als que ha calgut (i caldrà) enfrontar-se, hi ha hagut un esforç creixent de col·laboració entre les comunitats sísmiques i oceanogràfiques. Això es reflecteix també en la participació de sismòlegs en conferències tradicionalment oceanogràfiques i viceversa. Però sens dubte la col·laboració més important fins ara ha estat en la celebració del Workshop d'Oceanografia Sísmica (SOW), patrocinada per la Fundació Europea de la Recerca, a Begur i organitzat per l'autor i els seus companys espanyols. Aquest workshop va reunir per primera vegada un grup relativament gran d'especialistes internacionals en sismologia i oceanografia. A més dels avenços fets en les sessions tècniques, s'han establert xarxes científiques sòlides entre alguns dels millors oceanògrafs físics del món i sismòlegs que han consolidat l'oceanografia sísmica com una comunitat científica pròpia. Actualment ja s'està treballant en la propera edició del workshop SOW que se celebrarà a Anglaterra l'estiu de 2012. Molts d'aquests

mateixos grups de científics, així com altres grups, han mostrat interès en garantir que l'oceanografia sísmica continuï sent un mètode factible durant els propers anys. En la següent secció s'aborden algunes de les iniciatives de recerca internacionals i els desafiaments als que s'enfronta actualment l'oceanografia sísmica.

Consideracions futures

Les perspectives futures de l'oceanografia sísmica abarquen molts aspectes. Els avenços metodològics i tècnics permetran fer anàlisis de les dades i intepetacions més exhaustius. Algunes de les millores i aplicacions que es poden portar a terme en oceanografia sísmica són:

- Millora de l'adquisició de dades sísmiques en medis marins així com l'aplicació en estudis limnològics.
- Millora de les tècniques d'inversió per obtenir mapes de les propietats físiques més acurats.
- Caracterització mitjançant fractals de les estructures utilitzant mètodes estocàstics, i descripció dels mecanismes a través de la criticalitat auto-organitzada (SOC).
- Adquisició de dades en 3D sobre estructures oceanogràfiques importants, com ara els meddies.
- Millora de la caracterització de la dinàmica dels oceans.
- Generació de mapes de propietats 2D + temps de manera similar als generats per a la temperatura a la superfície del mar a partir de dades de satèl·lit.
- Experimentació de l'oceanografia sísmica en el context de biologia marina.

- Utilització de l'oceanografia sísmica com una eina per localitzar fenòmens com els hidrats de gas o fumaroles hidrotermals.

Actualment, l'oceanografia sísmica, tot i mostrar un gran potencial, també s'ha trobat amb un escepticisme moderat. Alguns oceanògrafs, malgrat semblar impressionats per les imatges de l'estructura interna de l'oceà, es mostren estoics pel que fa al paper de l'oceanografia sísmica com una eina dins l'oceanografia física. Aquesta actitud es pot comparar amb la reacció d'alguns oceanògrafs quan se'ls van mostrar els primers mapes de temperatura a partir de dades de satèl·lit, però que al final van acabar acceptant. Una situació semblant es va iniciar (i ha persistit fins a cert grau) entre algunes comunitats de geòlegs i geofísics, amb la introducció del mètode sísmic.

L'escepticisme és molt saludable dins de la ciència ja que, tot i que el mètode científic és una bona guia vers el coneixement, els científics som humans, subjectes a interessos personals i professionals. Malauradament, altres interessos com els dels governs o les multinacionals més influents juguen un rol important en determinar quins mètodes són els més exitosos i quins no. L'oceanografia sísmica no redefinirà l'oceanografia física, però l'enriquirà amb nova informació i els oceanògrafs poden verificar si aquesta informació confirma o refuta els models actuals de circulació a gran escala i processos oceànics. La seva major contribució fins ara és una resolució horitzontal sense precedents, que és semblant a la de desplegar sondes oceàniques cada cinc o deu metres. Això ha significat millores en la visualització de fluxos, permetent als oceanògrafs veure per primera vegada la continuïtat horitzontal de les isopícnes, i obtenir mapes dels processos de l'oceà a una major escala.

Finalment, l'oceanografia sísmica no ofereix únicament una nova perspectiva per als oceanògrafs físics amb l'adquisició de noves dades. La sísmica marina multicanal ha estat utilitzada, durant unes tres dècades, per caracteritzar la Terra sòlida, mentre que incidentalment registrava les reflexions dins de l'oceà (o llacs). Moltes d'aquestes dades han estat arxivades en la seva forma original. Conseqüentment, l'oceanografia sísmica no només ofereix mapes de paràmetres espacials (que es poden comparar amb les dades arxivades), si no que també es poden crear mapes que comparin com determinats

paràmetres de circulació han canviat al llarg del temps. Davant de la importància i imminència del canvi climàtic global, i el rol que hi juga l'oceà, s'espera poder fer-ne un seguiment a una escala de dècades. Amb aquesta informació a l'abast, podrem començar a analitzar les nostres accions i potser modificar-les per poder ser medioambientalment sostenibles.

