

Oceanografia sísmica. Una nova eina per entendre els oceans

Grant George Buffett^{a,b)} i Ramon Carbonell^{a)}

^{a)}Institut de Ciències de la Terra Jaume Almera (ICTJA-CSIC), c/ Lluís Solé i Sabarís s/n, 08028 Barcelona, gbuffett@ictja.csic.es, nomarc@ictja.csic.es

^{b)}Leibniz-Institut für Meereswissenschaften, IFM-GEOMAR, Gebäude Ostufer, Wischhofstr. 1-3, Geb. 8D/217, D-24148 Kiel, Alemanya, gbuffett@ifm-geomar.de (direcció actual)

L'oceanografia sísmica s'està convertint en una eina pràctica per estudiar la circulació oceànica a gran escala, els processos de mescla a mesoescala i la seva dinàmica. A més, s'ha demostrat la seva utilitat per quantificar paràmetres com ara la temperatura i la salinitat. Des de 2003, s'ha emprès la recerca en la millora i l'adaptació de la sísmica de reflexió, una eina robusta ben acceptada en el món acadèmic i la indústria dels hidrocarburs per visualitzar l'escorça profunda i els marges de les plaques tectòniques, i per localitzar possibles reservoris de petroli, respectivament. La necessitat urgent d'identificar amb precisió els mecanismes responsables del canvi climàtic fa que l'oceanografia sísmica sigui encara de més interès per als oceanògrafs físics. Atesa la gran contribució dels oceans al transport de calor (més o menys equivalent a l'atmosfera encara que amb molt menys gruix), és necessari entendre els processos oceànics i les imatges detallades de les estructures oceàniques, com ara els remolins, fronts i escales termohalines. L'oceanografia sísmica proporciona aquesta imatge detallada, així com la quantificació de les propietats intrínseques oceàniques. La sobrebundància d'arxius amb dades sísmiques marines, molts d'ells amb registres de reflexions relativament febles de l'oceà, ofereix un conjunt de dades a escala mundial pràcticament il·limitat amb el qual es pot estudiar la circulació oceànica. L'oceanografia sísmica no només ofereix l'oportunitat de representar espacialment l'estructura termohalina, sinó que l'accés a bases de dades històriques pot donar informació sobre el comportament temporal de la circulació, i això és especialment important de cara a la comprensió del canvi climàtic global.

1 Introducció

La circulació oceànica a gran escala redistribueix calor i aigua dolça i és per això que afecta el clima global. Un dels seus mecanismes principals 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 [1]. 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 això, a la pràctica aquests processos són difícils d'observar. Per sota de pocs metres, l'oceà és opac a la llum i a observacions directes dels processos profunds, excepte els que tenen una expressió en superfície, com ara les ones internes [2]. Per tant, les observacions òptiques directes en profunditat són pràcticament impossibles. Amb aques-

ta finalitat, el desenvolupament de metodologies i instruments científics per mesurar els processos a l'interior de l'oceà són de gran importància per poder-los entendre.

Per definició, l'oceanografia sísmica és l'aplicació de la sísmica de reflexió multicanal (MCS) a l'oceanografia física. Aquesta definició, però, podria estar subjecta a una revisió i a un perfeccionament futurs, ja que el desenvolupament d'eines d'oceanografia sísmica inevitablement donarà lloc a noves perspectives. Per exemple, el mètode d'adquisició sísmica es pot modificar segons els suggeriments de Ruddick [3] 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 desenvolupament i una aplicació més grans en zones dels oceans on la utilització de tècniques de l'oceanografia física únicament pot deixar buits en les dades.

2 L'àrea d'estudi: el golf de Cadis i la costa occidental ibèrica

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

1. La forta empremta oceanogràfica. A causa de la penetració del MOW dins l'Atlàntic Nord a través de l'estret de Gibraltar, s'observa 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) entre el MOW i les aigües de l'Atlàntic [4]. 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 talús 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 tenen un paper molt important en el manteniment de la distribució de la temperatura i la salinitat a l'Atlàntic Nord [5]. Per tant, l'oceanografia sísmica en aquesta regió opera en un laboratori natural on es poden estudiar fenòmens oceanogràfics reals com ara la interacció amb la topografia, així com la caracterització dels processos de mescla i circulació.
3. Finalment, l'existència de nombrosos conjunts de dades arxivades, tant oceanogràfiques com sísmiques, que poden aportar informació nova 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 1).

L'aigua mediterrània, a causa de 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*) [6]. El MOW flueix com una cascada pel talús continental i s'equilibra a profunditats d'entre 500 i 1500 m, mentre s'introdueix i es 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 a subcorrent mediterrani (*Mediterranean undercurrent*, MU).

El subcorrent mediterrani es desvia cap al nord al llarg de la costa d'Ibèria com a conseqüència de l'efecte de Coriolis, causat per la conservació del moment angular de la Terra en rotació. Flueix semiconfinat per les aigües de l'Atlàntic que l'envolten, amb les quals interactua. Cal

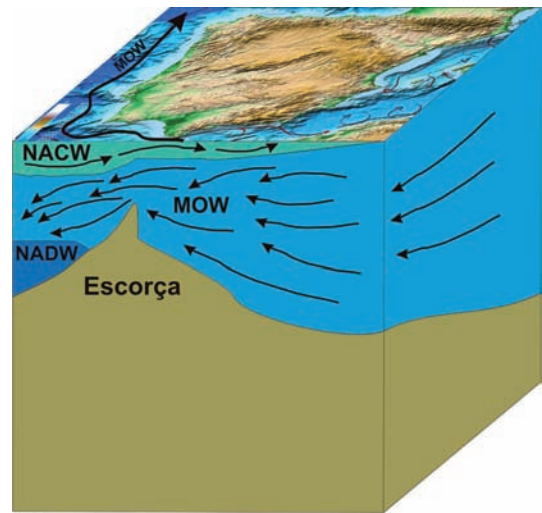


Figura 1: Diagrama que mostra el corrent de sortida del Mediterrani i el subcorrent mediterrani

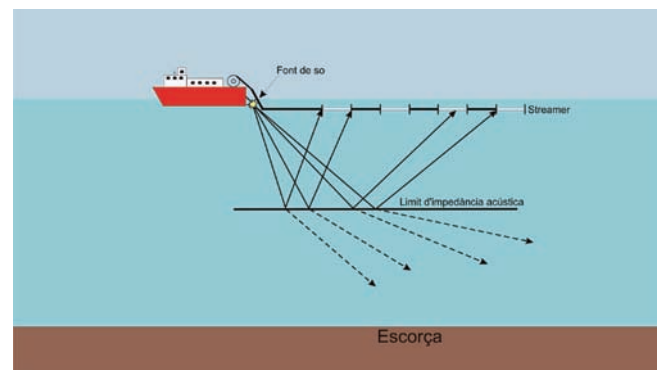


Figura 2: Adquisició de sísmica de reflexió marina que mostra la font i el traçat de raigs de les ones sísmiques, ja que reflecteixen i transmeten quan troben un límit d'impedància acústica (aproximadament equivalent a una isopícnica)

esperar que a mesura que 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 amb la plataforma continental.

3 Metodologia. Adquisició i processament

La sísmica de reflexió ha estat utilitzada amb èxit durant dècades per 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 [7]. Els primers sondejos sísmics es van fer a la primera part del segle XX i consistien en una font (que emet una detonació) i un receptor situats a la superfície i separats per una distància coneguda (òfset). El temps transcorregut entre

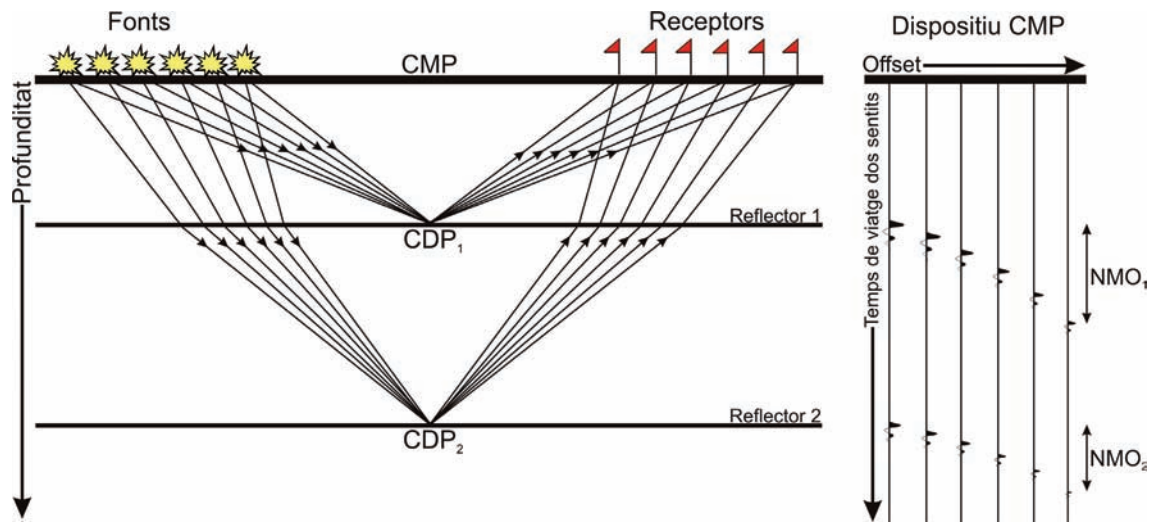


Figura 3: El mètode del common midpoint (a l'esquerra) que mostra el traçat de raigs a través de diferents medis. El common midpoint (CMP) entre les fonts i els receptors, el common depth point (CDP) de reflectors respectivament, i CMP (dreta) convergeixen mostrant un moveout hiperbòlic de traçes sísmiques respecte a la compensació i la profunditat (temps de viatge en els dos sentits)

la primera detonació 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 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, cosa que permetia suposar que la font i el receptor estan col·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 duen a terme des d'un vaixell de remolc mitjançant una font impulsiva i un cable d'hidròfons (*streamer*) que registra el senyal i el soroll (figura 2).

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, energia cinètica, calor). L'energia reflectida també és atenuada, i es registra mitjançant l'*streamer*; aquest registre s'emmagatzema per processar-lo posteriorment.

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. Per tant, s'ha de tenir precaució a l'hora d'interpretar les dades. Les seccions 2D d'oceànografia sísmica (o «instantànies») es redefeixen com seccions 2D quasi instantànies d'un oceà que canvia constantment.

El mètode *common midpoint* (CMP) o punt mitjà comú (figura 3) 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.

Se suposa que les diferències de temps entre les traçes individuals d'un dispositiu CMP no es veuen afectades per diferències estructurals [8]. Aquesta suposició no és del tot vàlida en molts casos, com per exemple en prospeccions amb interfícies accidentades o en estudis marins on el cable és mogut pels corrents superficials. Malgrat tot, aquests efectes 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 d'offset zero (com si la font i el receptor fossin col·localitzats), la qual cosa no és possible a la pràctica.

La dinàmica dels oceans, en canvi constant, converteix l'estudi sísmic en un rept. Encara que una secció sísmica en dues dimensions de la Terra sòlida efectivament mostra una «instantània» en el temps, la dinàmica dels oceans és

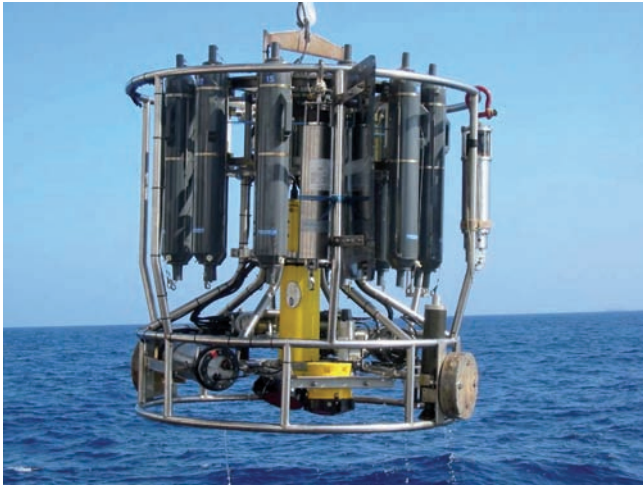


Figura 4: El desplegament d'un CTD

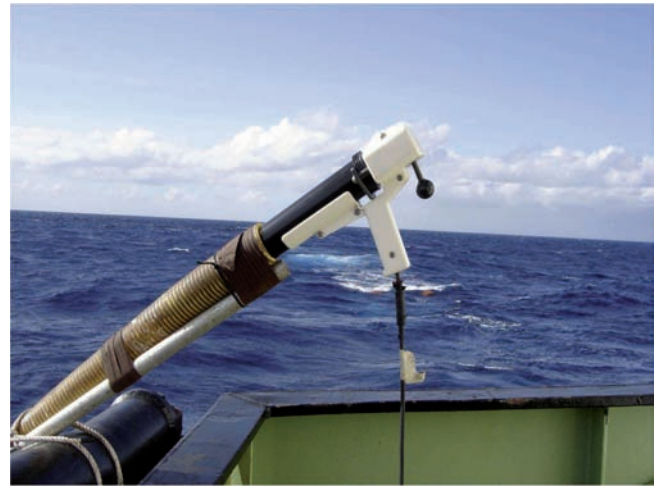


Figura 5: Oceanografia sísmica en l'acció: ús d'una sonda XBT i adquisició de sísmica en el fons (es pot observar la bombolla d'aire creada per l'explosió)

tal que el temps necessari per adquirir les dades (desenes d'hores) és de l'ordre del moviment de reflectors (isopícnies) en temps real. Així, per exemple, les dades sísmiques registrades al començament d'una línia i les registrades en l'extrem poden no 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 [9]—, 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, que s'observen en diferents regions dels oceans, han estat caracteritzades sísmicament —per exemple per Fer [10] i Biescas [11]— i s'han observat oceanogràficament com estructures quasi permanents a les parts més profundes del mar Tírrè (vegeu [12]).

L'objectiu del processament o tractament de dades sísmiques és manipular-les per obtenir un tall 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 l'anàlisi de les dades; d'altres són opcionals o aplicables en certs tipus de dades. El processament de dades sísmiques es beneficia en bona part 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 testar. Segueix una descripció d'algunes de les eines més importants, amb referència al seu ús en l'oceanografia sísmica, si escau.

El processament comença amb el mostreig del senyal sísmic analògic i continu registrat i amb la conversió en un senyal digital (*wavelet*). Aquesta conversió permet representar el senyal com una sèrie temporal i, en conseqüència,

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, 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 atenuada adequadament. També es poden filtrar les dades 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 que és degut al fet que el temps de propagació en els receptors situats a distàncies superiors és més gran), cal fer una anàlisi de velocitat, que consisteix a utilitzar un valor concret de la velocitat del so que permeti aplanar els reflectors hiperbòlics, com si tots els receptors estiguessin col·localitzats. Per fer aquesta anàlisi cal conèixer o assumir els valors de la velocitat de propagació del so en el mar a diferents profunditats. Per això, sovint s'utilitzen 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 fa una migració de les dades per desplaçar els reflectors inclinats i col·lapsar les hipèrboles de difracció.

4 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 es continuu utilitzant molt [13]. Els dispositius CTD (figura 4) van fer possible les primeres mesures eulerianes directes de la variació de les propietats físiques amb la profunditat en l'oceà i van proporcionar una mesura de la salinitat (conductivitat), temperatura i profunditat (pressió). L'ús de sondes *in situ* és també molt comú ja que aquestes 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 desplegadas 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. Es pot obtenir una xarxa horitzontal de dades molt més densa mitjançant els dispositius XBT o batitermògrafs no recuperables (figura 5), mentre que els dispositius CTD requereixen que el vaixell s'aturi per tal de fer les mesures. Els dispositius XBT permeten mesurar resolucions verticals tan petites com 65 cm i variacions de temperatura de $\pm 0,1$ °C [14]. 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 XCTD també es poden desplegar juntament amb els XBT, 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 determinar la velocitat del so.

5 Processos i estructures oceanogràfics que es poden identificar mitjançant l'oceanografia sísmica

Hi ha un gran nombre d'estructures i processos en l'oceà que són d'interès científic. 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 la salinitat augmenten en profunditat i s'equilibren amb la densitat [15].
2. Remolins (figura 6): són lents de fluid quasi esfèriques que es formen en presència de la barreja diapícnica (de densitats) i de turbulències, on les línies diapícnes es veuen pertorbades. Els remolins del Mediterrani (*Meddies*) són grans remolins anticiclònics (40 a 150 km de diàmetre) d'aigües del subcorrent mediterrani, amb salinitats d'aproximadament 36,5 psu i temperatures màximes del voltant dels 13 °C [6].

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 [2].
4. Els corrents oceànics poden ser objectius molt interessants per a l'oceanografia sísmica, especialment en els seus límits, on arrosseguen i interactuen amb les aigües circumdants. El subcorrent mediterrani és un bon exemple d'un corrent amb forts contrastos de temperatures i salinitats ([16], [17]).

Alguns dels processos oceanogràfics que es poden estudiar mitjançant oceanografia sísmica 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 marees [1], o a escales més petites, a nivell molecular. El procés de mescla suavitza les distribucions de les propietats de l'oceà, com per exemple la calor, la sal i altres productes químics. Pot tenir lloc al llarg (mescla lateral) o a través (mescla diapícnica) de línies isopícnes. Un aspecte curiós de les mescles són el que es coneix com *dits de sal* o *salt fingers* [18], 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 sal. Com que és més densa que l'aigua dolça que l'envolta, 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 ascendent. El fet que la salinitat es difon 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 sal contribueixen al procés de mescla diapícnica dels oceans, la qual cosa ajuda a regular els canvis graduals en la circulació global, que alhora afecten el clima en gran manera. La mescla també pot tenir lloc com a efecte de l'acció de les marees i les ones internes [2].
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), i això fa que es donin les condicions perquè la dissipació deguda a la viscositat converteixi l'energia cinètica en calor [2]. La turbulència i la barreja són processos estretament lligats de manera que zones d'elevada turbulència són propenses a la barreja,

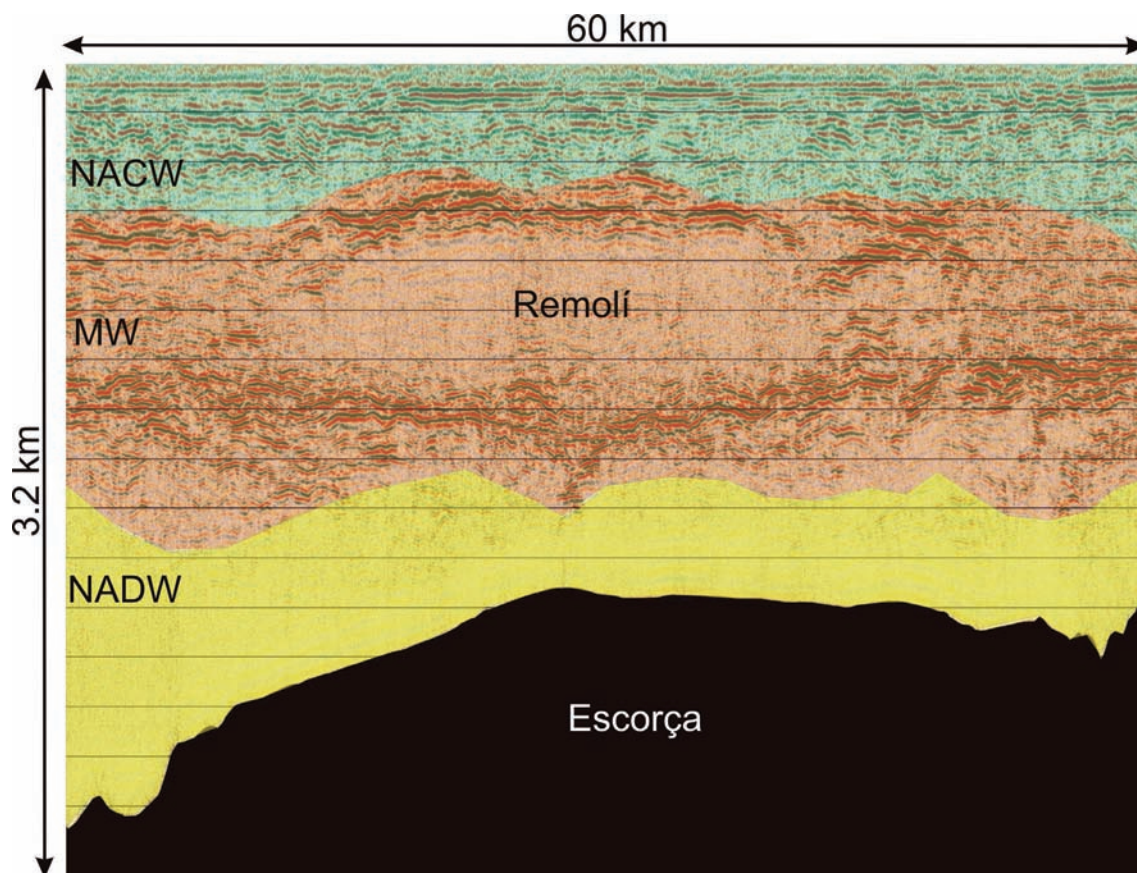


Figura 6: Perfil d'oceanografia sísmica al golf de Cadis (escala vertical exagerada) que mostra l'estratificació de l'oceà, un remolí de grans dimensions, les tres principals masses d'aigua (vegeu text) i el fons marí (negre)

si més no a petita escala. No obstant això, la barreja i la intercalació de l'estratificació a través de les superfícies isopícniques no ha de ser necessàriament un procés turbulent.

3. La dinàmica: la dinàmica dels oceans representa un repte difícil 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 suboceàniques. Aquestes són un medi estàtic per comparació a l'oceà, on els corrents són típicament de l'ordre de $0,5 \text{ ms}^{-1}$ 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 a causa de canvis en equilibri hidrostàtic, és a dir, l'equilibri entre la gravetat i la flotabilitat [2]. Les ones internes poden tenir diferents orígens, com ara les oscil·lacions en la pressió atmosfèrica, el vent, les forces de marea o la interacció amb el fons marí [19]. Holbrook i Fer [20] van uti-

litzar 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 [2]. Biescas i col·laboradors [11] van analitzar sísmicament escales termohalines en interacció amb una muntanya submarina (el banc Goringe al golf de Cadis), i van observar com les escales termohalines es veien distorsionades per aquesta interacció. Holbrook i Fer [20] van mostrar un efecte de distorsió similar en què les isopícniques interactuen amb el pendent topogràfic. És a dir, a certa distància del pendent, els reflectors són més continus, mentre que prop del pendent els

reflectors «s'amunteguen» i creen un patró ondulat.

6 Oceanografia sísmica com una eina per controlar el canvi climàtic

I si poguéssim mirar cap enrere en el passat per veure com eren els corrents oceànics fa deu, vint, trenta, quaranta o cinquanta anys? Han canviat els patrons de circulació juntament amb la industrialització i l'augment de les emissions de gasos d'efecte hivernacle? Quins podrien ser els futurs patrons de circulació? Coneixent aquesta informació, podem actuar per prevenir un canvi que ens pot ser perjudicial? Els recents avenços en l'anàlisi de dades sísmiques que han fet diversos autors han significat progressos importants en la comprensió dels processos oceanogràfics físics a partir de dades sísmiques únicament. La nostra capacitat per construir models que representen la realitat física objectiva sobre els processos oceànics ajuda a comprendre el paper de l'oceà en la distribució de calor en tot el planeta i, per tant, l'efecte que això té sobre el clima.

La sísmica marina multicanal ha estat utilitzada, durant unes tres dècades, per caracteritzar l'escorça terrestre, alhora que incidentalment es registraven 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) sinó que també es poden crear mapes que comparin com determinats paràmetres de circulació han canviat al llarg del temps. Davant de la importància i la imminència del canvi climàtic global, i el paper que hi té l'oceà, s'espera poder fer-ne un seguiment a una escala de dècades.

La nova adquisició està en marxa, en forma de campanyes d'oceanografia sísmica exclusivament, i dels anomenats *piggy-back*, on les dades oceanogràfiques s'adquireixen *in situ* juntament amb les dades sísmiques destinades a l'estudi de l'escorça de la Terra. Mentre que en aquests darrers casos, els paràmetres d'adquisició i la localització no es poden triar (i per tant, no estan optimitzats per a l'oceanografia sísmica), la multitud d'estudis sísmics que s'estan duent a terme assegura la disponibilitat de dades adquirides recentment per ser estudiades en un futur proper. L'oceanografia sísmica podria convertir-se en una addició natural a tots els estudis sísmics marins?

7 El projecte SEISSEA

El mar Tirrè és una conca profunda semitancada del mar Mediterrani, limitat per Itàlia i les illes de Còrsega, Sardenya i Sicília. És un laboratori natural per a l'estudi de les escales termohalines, que són variacions verticals regulars i ben definides de temperatura i els gradients de salinitat, que es manifesten en les dades sísmiques com ara

l'estratificació quasi horitzontal. En el mar Tirrè, la barreja deguda a turbulències és particularment feble i això fa l'estudi factible.

El projecte SEISSEA (Inversió sísmica i anàlisi estocàstica espectral de les escales termohalines en el mar Tirrè) va començar aquest any a l'Institut Leibniz de Ciències Marines de la Universitat de Kiel (IFM-GEOMAR) amb l'anàlisi de les dades d'oceanografia sísmica adquirides el maig i l'octubre de 2010 (vegeu [21]). El projecte se centra a desenvolupar les metodologies necessàries en sísmica per caracteritzar escales termohalines de manera òptima i extreure'n informació valuosa. Aquesta investigació ajudarà la comunitat científica a comprendre millor la propagació d'ones internes i la barreja turbulenta i els processos que condueixen a l'estratificació de la densitat, la qual cosa contribueix a crear els millors models possibles de la circulació oceànica i, per extensió, els models de canvi climàtic.

8 Conclusions

L'oceanografia sísmica està emergint els darrers anys com una eina viable per a l'oceanografia física. Aquesta emergència és deguda a dues raons específiques: 1) l'eina ha estat molt utilitzada amb èxit per la indústria i a nivell acadèmic durant més de cinquanta anys; això en demostra la solidesa i fa, per tant, que el seu desenvolupament i la seva adaptació a l'oceanografia sigui una tasca relativament senzilla (però amb reptes específics com ja s'ha mencionat) i 2) el desig d'oceanògrafs físics per visualitzar a gran escala horitzontal el que han sospitat durant anys, però no han estat capaços de produir, per manca de mostres horitzontals suficients. Dit això, l'oceanografia sísmica és molt més que la visualització de flux horitzontal i continuarà avançant, sempre que 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-hi, però sense limitar-s'hi, 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 generar models precisos del clima.

Les perspectives futures de l'oceanografia sísmica abracen molts aspectes. Els avenços metodològics i tècnics permetran fer anàlisis de dades i interpretacions més exhaustives. 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 i aplicació a estudis limnològics.
- Millora de les tècniques d'inversió per obtenir mapes més acurats de les propietats físiques.
- Caracterització mitjançant fractals de les estructures utilitzant mètodes estocàstics, i descripció dels

mecanismes a través de la criticitat autoorganitzada (SOC).

- Adquisició de dades en 3D sobre estructures oceanogràfiques importants, com ara els remolins del Mediterrani (*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 la biologia marina.
- Utilització de l'oceanografia sísmica com una eina per localitzar fenòmens, com per exemple els hidrats de gas i les fumaroles hidrotermals.

Actualment, l'oceanografia sísmica, tot i mostrar un gran potencial, també s'ha trobat amb un escepticisme moderat. A alguns oceanògrafs els impressionen les imatges de l'estructura interna de l'oceà, però en canvi 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, 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'oceanografia sísmica potser no redefinirà l'oceanografia física, però sí que l'enriquirà amb informació nova; els oceanògrafs, doncs, poden verificar si aquesta informació confirma o refuta els models actuals de circulació a gran escala i els processos oceànics. La seva contribució més gran fins ara és una resolució horitzontal sense precedents, que és semblant a la de desplegar sondes oceàniques (CTD o XBT, per exemple) cada cinc o deu metres. Això ha significat millores en la visualització de fluxos, cosa que ha permès als oceanògrafs veure per primera vegada la continuïtat horitzontal de les isopícnes, i obtenir mapes dels processos de l'oceà a una escala més gran.

Bibliografia

[1] WUNSCH, C., What is the Thermohaline Circulation?, *Science*, **298**, 1179–1180 (2002).

[2] THORPE, S. A., *The Turbulent Ocean*, Cambridge Univ. Press, New York (2005).

[3] RUDDICK, B.; SONG, H.; DONG, C., i PINHEIRO, L., Water column seismic images as maps of temperature

gradient, *Oceanography*, **22 (1)**, 184–197 (2009).

[4] BARINGER, M. i PRICE, J. F., Mixing and spreading of the Mediterranean outflow, *J. Phys. Oceanog.*, **27**, 1654–1677 (1997).

[5] BOWER, A. S.; ARMI, L. i AMBAR, I., Lagrangian Observations of Meddy Formation during A Mediterranean Undercurrent Seeding Experiment, *J. Phys. Oceanog.*, **27**, 2545–2575 (1997).

[6] RICHARDSON, P. L.; BOWER, A. S. i ZENK, W., A census of Meddies tracked by floats, *Progress in Oceanography*, **45**, 209–250 (2000).

[7] FINCH, D., *Traces through time, a history of geophysical exploration for petroleum in Canada*, Canadian Society of Exploration Geophysicists (1985).

[8] COX, M. J. G., *Static corrections for seismic reflection surveys*, Society of Exploration Geophysicists (1999).

[9] PEDLOSKY, J., *Geophysical Fluid Dynamics*, Springer-Verlag (1979).

[10] FER, I.; NANDI, P.; HOLBROOK, W. S.; SCHMITT, R. W. i PÁRAMO, P., Seismic imaging of a thermohaline staircase in the western tropical North Atlantic, *Ocean Sci.*, **6**, 621–631 (2010).

[11] BIESCAS, B.; ARMI, L.; SALLARÈS, V. i GRACIA, E., Seismic imaging of staircase layers below the Mediterranean Undercurrent, *Deep Sea Research I: Oceanographic Research Papers*, **57 (10)**, 1345–1353 (2010).

[12] ZODIATIS, G. i GASPARINI, G. P., Thermohaline staircase formations in the Tyrrhenian Sea, *Deep-Sea Research I*, **43 (5)**, 655–678 (1996).

[13] INGMANSON, D. E. i WALLACE, W. J., *Oceanography*, fifth edition, Wadsworth Publishing Company (1995).

[14] BOYD, J. D. i LINZELL R. S., The temperature and depth accuracy of Sippican T-5 XBTs, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **10**, 128–136 (1993).

[15] KELLEY, D. E., Effective diffusivities within oceanic thermohaline staircases, *J. Geophys. Res.*, **89**, 10484–10488 (1984).

[16] BUFFETT, G. G.; BIESCAS, B.; PELEGRÍ, J. L.; MACHÍN, F.; SALLARÈS, V., CARBONELL, R.;

- KLAESCHEN, D. i HOBBS, R. W., Seismic reflection along the path of the Mediterranean Undercurrent, *Cont. Shelf Res.*, **29**, 1848-1860 (2009).
- [17] SALLARÈS, V.; BIESCAS, B.; BUFFETT, G. G.; CARBONELL, R.; DAÑOBEITIA, J. J. i PELEGRÍ, J. L., Relative contribution of temperature and salinity to ocean acoustic reflectivity, *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L00D06 (2009).
- [18] STERN, M. E. i TURNER, J. S., Salt fingers and convecting layers, *Deep Sea Res.*, **16**, 497-511 (1969).
- [19] MIROPOL'SKY, Y. Z., *Dynamics of Internal Gravity Waves in the Ocean*, Kluwer Academic Publishers (2001).
- [20] HOLBROOK, W. S. i FER, I., Ocean internal wave spectra inferred from seismic reflection transects, *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L15604 (2005).
- [21] BUFFET, G. G.; HURICH, C. A.; VSEMIRNOVA, E. A.; HOBBS, R. W.; SALLARÈS, V.; CARBONELL, R.; KLAESCHEN, D. i BIESCAS, B., Stochastic Heterogeneity Mapping around a Mediterranean salt lens, *Ocean Sci.*, **6**, 423-429 (2010).