

L'anàlisi de conques: aproximació pluridisciplinària als estudis geològics i a l'exploració i gestió de recursos

Discurs de presentació de Lluís Cabrera Pérez
com a membre numerari de la Secció de Ciències
i Tecnologia, llegit el dia 19 de novembre de 2018



Institut
d'Estudis
Catalans

SECCIÓ DE CIÈNCIES
I TECNOLOGIA

L'anàlisi de conques:
aproximació pluridisciplinària
als estudis geològics i
a l'exploració i gestió de recursos

L'anàlisi de conques: aproximació pluridisciplinària als estudis geològics i a l'exploració i gestió de recursos

Discurs de presentació de Lluís Cabrera Pérez
com a membre numerari de la Secció de Ciències
i Tecnologia, llegit el dia 19 de novembre de 2018

Barcelona, 2018



Institut
d'Estudis
Catalans

SECCIÓ DE CIÈNCIES
I TECNOLOGIA

Biblioteca de Catalunya. Dades CIP

Cabrera, Lluís, autor

L'Anàlisi de conques : aproximació pluridisciplinària als estudis geològics i a l'exploració i gestió de recursos. — Primera edició

Bibliografia

ISBN 9788499654249

I. Institut d'Estudis Catalans. Secció de Ciències i Tecnologia II. Títol

1. Conques sedimentàries

551.432.5.051

© Lluís Cabrera Pérez

© 2018, Institut d'Estudis Catalans, per a aquesta edició

Carrer del Carme, 47. 08001 Barcelona

Primera edició: novembre de 2018

Text revisat lingüísticament per la Unitat de Correcció del Servei Editorial de l'IEC

Disseny de la coberta: Azcunce | Ventura

Compost per Accent Llibres, SL

Imprès a Service Point FMI, SA

ISBN: 978-84-9965-424-9

Dipòsit Legal: B 23373-2018

Són rigorosament prohibides, sense l'autorització escrita dels titulars del *copyright*, la reproducció total o parcial d'aquesta obra per qualsevol procediment i suport, incloent-hi la reprografia i el tractament informàtic, la distribució d'exemplars mitjançant lloguer o préstec comercial, la inclusió total o parcial en bases de dades i la consulta a través de xarxa telemàtica o d'Internet. Les infraccions d'aquests drets estan sotmeses a les sancions establertes per les lleis.

De bon començament, voldria agrair als membres del Ple de l'Institut d'Estudis Catalans l'acord pres en la sessió del dia 9 de març de 2017 per nomenar-me membre numerari de la Secció de Ciències i Tecnologia. Tot seguit voldria afegir que, tot i saber que aquesta honrosa distinció és personal, no puc deixar de considerar-la també un reconeixement al col·lectiu d'estudiosos de les ciències de la Terra al nostre país. La recerca geològica pròpiament dita va arribar a Catalunya a finals del segle XIX guiada per figures excepcionals com Jaume Almera, Lluís Marià Vidal i tants altres científics que mereixen el nostre record i als quals voldria retre aquí homenatge. Aquesta tasca de recerca ha estat continuada fins avui des de les diverses institucions científiques i acadèmiques del nostre país, incloent-hi l'Institut d'Estudis Catalans.

1. INTRODUCCIÓ

Les conques sedimentàries són entitats geològiques en l'origen i l'evolució de les quals convergeixen i interaccionen els denominats clàssicament *cicle geològic intern* i *cicle geològic extern*. Pel que fa al cicle geològic extern, les conques sedimentàries són les receptores dels productes de degradació dels relleus superficials de l'escorça terrestre per l'acció dels embolcalls fluids externs (hidroatmosfera) i de la biosfera. Tanmateix, tot i desenvolupar-se a la superfície del planeta, les conques sedimentàries són generades per processos del cicle geològic intern, que tenen lloc en zones profundes de la Terra i que es manifesten a la superfície generant zones subsidents. Des d'aquesta perspectiva, l'anàlisi de conques, que inclou la comprensió de la seva evolució a diverses escales, és un camp que demana la integració de diverses disciplines de les ciències de la Terra. En aquest fet, juntament amb les clares aplicacions que en deriven, hi rau una bona part de la importància i l'interès d'aquesta disciplina.

Val a dir que, com a aproximació integradora reconeguda com a tal, l'anàlisi de conques es va desenvolupar i va rebre una denominació específica prou tardanament, a la darrera de la dècada dels setanta del segle xx, cosa que va proporcionar el marc conceptual en el qual enquadrar l'estudi de l'origen i de l'evolució de les conques (Catuneanu, 2006). Aquest fet és perfectament explicable tenint en compte que els principals elements conceptuals i instrumentals necessaris per al desenvolupament de l'anàlisi de conques es van produir relativament tard, tot i que amb una cadència prou ràpida durant el segle xx (Miall, 1990).

Aquesta exposició té com a objectiu transmetre una idea general de què és l'anàlisi de conques, què significa i quina importància té. En l'apartat 2 s'introdueix el concepte *conques sedimentàries*, el marc general en el qual es formen, les seves etapes evolutives i l'aproximació pluridisciplinària necessària per a estudiar-les. L'apartat 3 resumeix l'evolució conceptual i tècnica de l'anàlisi de conques fent èmfasi en alguns aspectes fonamentals referits a les disciplines de la sedimentologia, el paradigma de la tectònica de plaques i la introducció del marc conceptual de l'estratigrafia sísmica i seqüencial. En l'apartat 4 s'aborden el present i el futur immediats dels avenços en l'anàlisi de conques, que es basen en la millora de la capacitat d'adquisició de dades i en l'ús cada cop més estès dels models numèrics i analògics. L'apartat 5 constitueix una breu reflexió sobre la reorientació dels objectius de l'anàlisi de conques per atendre les noves necessitats de fonts d'energia i matèries primeres que plantejarà la societat del segle xxi.

2. LES CONQUES SEDIMENTÀRIES

2.1. *El marc d'origen i evolució*

Les conques sedimentàries es generen i evolucionen a la superfície de l'escorça terrestre com a sectors que experimenten un enfonsament (zones subsidents) de característiques, d'extensió i de durada diverses (figura 1). De fet, la seva capacitat de captació i retenció de sediments, és a dir, la seva «funció» com a receptores dels productes procedents de la degradació i l'erosió de la part superficial de l'escorça terrestre per l'acció de la hidrosfera i la biosfera, és la característica més evident de les conques sedimentàries. Tanmateix, l'origen dels processos de subsidència a la superfície terrestre es troba en les profunditats de la Terra i està relacionat amb moviments convectius del mantell terrestre sota de la litosfera. El mantell és més calent que la litosfera, que, al seu torn, és rígida, més freda i està dividida en peces (plaques litosfèriques) que es mouen relativament les unes respecte de les altres (figura 2). Ras i curt: les conques sedimentàries existeixen en un marc condicionat per la fluència del mantell terrestre i el moviment de les plaques litosfèriques (Allen i Allen, 2013).

2.2. *Les etapes evolutives de les conques sedimentàries i els processos associats*

Les conques sedimentàries són entitats geològiques sotmeses a evolució i, per comprendre-les, cal fer atenció a tres etapes evolutives: l'etapa prèvia a la formació, l'etapa de generació i rebliment, i finalment l'etapa de preservació o destrucció, total o parcial, quan passen a ser dominis erosius (Miall, 2016; Allen i Allen, 2013).

L'etapa prèvia (preconca) es caracteritza per processos de meteorització, denudació i erosió que afecten la regió on es desenvoluparà la futura zona de sedimentació. Normalment, l'únic registre disponible per estudiar-la serà una superfície erosiva o de discontinuïtat que es veurà afectada per la subsidència i damunt de la qual es dipositaran els materials sedimentaris més antics de la conca.

L'etapa de generació i rebliment inclourà els processos tectònics que iniciaran l'estructuració d'un domini subsident i el desenvolupament d'una xarxa de drenatge, a favor del gradient generat, que transportarà a la conca les aportacions des de les àrees font; també inclourà el desenvolupament dels sistemes de dipòsit, l'evolució dels quals serà controlada —o almenys modificada— sobretot per les influències dels factors tectonoestructurals i climàtics. A part dels processos sedimentaris superficials, freqüentment les conques són l'escenari d'extensos processos de circulació i migració subterrània de fluids (geofluids) i també de la modificació dels materials per una acció més o menys intensa d'escalfament causat per l'enterrament i enfonsament de les roques sedimentàries. L'ingrés i la circulació d'aigües meteòriques o d'aigües de formació a les conques poden provocar canvis apreciables en les característiques dels materials sedimentaris (diagènesi superficial i d'enterrament) i també causar l'acumulació, en sistemes freàtics tant somers com profunds, de grans volums d'aigua de salinitat variable, des d'aigua dolça a salmorra. També pot donar lloc a dipòsits minerals de gran interès econòmic (Kyser, 2007). L'escalfament que es produeix durant l'enterrament (maduració tèrmica) pot afectar roques d'origen orgànic o roques amb una elevada proporció de matèria orgànica i modificar-ne l'estructura i la composició, cosa que dona lloc a la formació de carbons, petroli o gas.

L'etapa final de l'evolució de les conques sedimentàries ve marcada per canvis en les condicions, que impliquen la interrupció definitiva de l'acumulació de sediment. Aquesta etapa final pot ser molt diversa segons el context on es va generar la conca i la seva evolució tectònica i morfoestructural final. Sovint aquesta etapa evolutiva pot culminar amb la destrucció total de les conques, moment en què passen a ser dominis erosius. En altres casos, els materials del rebliment de conca passen a integrar-se en altres dominis tectonoestructurals i poden preservar-se parcialment.

2.3. *El caràcter pluridisciplinari de l'anàlisi de conques*

L'anàlisi de conques sedimentàries, fet des de les diverses disciplines involucrades, sol centrar-se, de manera més o menys intensa, en alguna de les etapes evolutives esmentades i en els processos que les caracteritzen. Tanmateix, una anàlisi realment integrada de caràcter holístic hauria de fer atenció a totes les etapes i processos. De tot el que s'ha esbossat fins ara, se'n deriva una necessitat que no sempre es pot cobrir, encara que sigui molt òbvia. L'anàlisi de conques no es pot abordar des d'una única perspectiva o disciplina geològica o geofísica. Els textos recents sobre el tema no dubten de qualificar l'anàlisi de conques com el millor instrument o la millor via d'aproximació per incentivar l'adopció d'enfocaments integrats per resoldre molts problemes plantejats en geociències: diferenciació de controls interns (autogènics) i externs (al·logènics) sobre l'evolució del rebliment sedimentari; relacions i interferència entre tectònica, clima i sedimentació; evolució del relleu a diverses escales i la influència que té en l'evolució dels sistemes de producció, transport-transferència i acumulació de sediment, etc. Tanmateix, molts autors reconeixen la dificultat d'assolir aquesta aproximació i assenyalen que les aproximacions integrades i pluridisciplinàries són més fàcils d'enunciar que de realitzar. Una aproximació dinàmica i interdisciplinària implica les contribucions necessàries de diversos especialistes que forçosament aporten una major capacitat de comprensió dels problemes i un millor resultat final (Allen i Allen, 2013).

Una constatació, tal vegada anecdòtica però significativa, que palesa la influència de la pluridisciplinarietat en l'evolució tècnica i conceptual de l'anàlisi de conques, es pot extreure d'analitzar la freqüència amb la qual alguns dels principals tractats sobre el tema s'han renovat en edicions successives. El llibre *Principles of sedimentary basin analysis*, d'Andrew Miall, que és un excel·lent tractat amb un dens contingut doctrinal i molt focalitzat sobretot en aspectes estratigràfics i sedimentològics, ha estat publicat en impressions successives els anys 1985, 1990 i 2000. Aquest llibre va necessitar una renovació freqüent de contingut a conseqüència de l'avenç en el coneixement dels diversos contextos tectònics on s'originaven les conques i en els factors de control sobre l'organització del seu rebliment. Les edicions successives d'un altre llibre emblemàtic, *Basin analysis*, d'Allen i Allen, han estat publicades el 1990, el 2005 i el 2013. Val a dir en aquest cas que, a la darrera edició (2013), els autors van introduir tal renovació de continguts conceptuals i formals que, de fet, es podria parlar d'una obra nova, que és quantitativament i qualitativa molt diferent de la primera, tot i mantenir la mateixa filosofia integradora i pluridisciplinària.

3. L'ANÀLISI DE CONQUES: UNA HISTÒRIA DE PROGRÉS PARALLEL I CONVERGENT DE NOUS CONCEPTES I TÈCNiques D'ADQUISICIÓ I ANÀLISI DE DADES

Com en moltes altres aproximacions pluridisciplinàries, l'avenç de l'anàlisi de conques va ser el resultat de combinar l'acumulació de més coneixement de millor qualitat (afavorit per la implementació de noves tècniques d'adquisició i anàlisi de dades) i noves propostes conceptuals en diversos àmbits, tant globals com regionals. Sense pretendre realitzar una exposició exhaustiva de la història de l'anàlisi de conques, sí que pot ser útil apropar-se a una visió general d'algunes de les grans fites que han comportat canvis i millores qualitatives en l'avenç de la disciplina des dels seus inicis fins a l'actualitat. Aquesta aproximació permetrà introduir successivament i amb una certa perspectiva històrica algunes de les principals millores tècniques i, alhora, assenyalar la seva interacció amb el desenvolupament de nous conceptes i metodologies de treball relacionats amb la sedimentologia, la tectònica de plaques i la introducció del marc conceptual de l'estratigrafia sísmica i seqüencial.

L'inici de l'estudi de conques sedimentàries va coincidir pràcticament amb el de la geologia com a disciplina científica. Molts dels geòlegs pioners, els que van assentar les bases per al desenvolupament de la geologia, van abordar l'estudi dels rebliments sedimentaris i de les conques que els contenien. Podríem esmentar, a tall d'exemple, William Smith (1769-1839) i Charles Lyell (1797-1875), dos geòlegs generalistes que van desenvolupar part de la seva recerca en conques sedimentàries. Des dels primers estudis duts a terme durant el segle XIX i fins a mitjans del segle XX va tenir lloc una etapa molt descriptiva i dominada per l'acumulació d'informació, incloent-hi aspectes estratigràfics, petrològics, paleontològics i sedimentològics. Ja des d'aquesta etapa es va veure clarament que una gran part de l'interès en l'estudi de les conques sedimentàries era motivat pels diversos —i, de vegades, abundants— recursos naturals que contenen.

A partir d'aquest moment, els autors coincideixen a assenyalar (Miall, 1990, 2000 i 2016; Catuneanu, 2006) que al llarg del segle XX poden distingir-se tres punts d'inflexió o tres llindars principals (*revolucions* és el terme emprat per Miall, 1990) en la forma de tractar l'estudi de la geologia sedimentària que van incidir directament en el desenvolupament i el progrés posterior de l'anàlisi de conques.

3.1. *L'inici de la sedimentologia moderna*

Després d'algunes contribucions pioneres fetes a l'inici del segle XX (Sorby, 1908), repeses en la dècada dels seixanta (Potter i Pettijohn, 1963) i amb un fort impuls durant els anys setanta i vuitanta, la sedimentologia va permetre una millor comprensió dels registres estratigràfics des del punt de vista dels processos

i condicions ambientals quan s'abandonen les perspectives quasi exclusivament descriptives que havien dominat fins aquell moment (Allen, 1993). A les dècades del 1950 i el 1960, el desenvolupament del concepte *règim hidràulic* i la seva aplicació a l'estudi sedimentològic dels rebliments de conca va permetre relacionar les estructures sedimentàries en dipòsits terrígens i les seves associacions amb determinats tipus de fluxos laminars i turbulents i amb processos de formació de sediments en els diversos ambients de dipòsit (Collinson i Thompson, 1982). Igualment, a partir dels anys seixanta i setanta, l'estudi dels grans sistemes d'acumulació de dipòsits carbonàtics a la regió de les Bahames i altres zones tropicals i subtropicals va permetre'n una millor comprensió, fet molt important a causa de la seva abundància i la presència freqüent en moltes conques sedimentàries (Roehl i Choquette, 1985). La discriminació de l'origen dels diversos dipòsits sedimentaris va obrir l'avenç cap al refinament de la interpretació paleoambiental. Aquest nou enfocament va permetre abandonar una visió estàtica i estudiar i analitzar els rebliments de conca com a resultat de l'evolució de sistemes dinàmics que interaccionaven entre ells i amb el seu entorn de conca sota la influència de la tectònica, el clima i els canvis del nivell de base. Al llarg d'aquests anys, es va generar una gran quantitat de models sedimentològics conceptuals que van assentar les bases per al futur desenvolupament de models numèrics (Miall, 2016).

3.2. *El paradigma de la tectònica de plaques*

Durant els anys seixanta del segle passat, es va traspasar un segon llindar amb la proposta del paradigma de la tectònica de plaques (Wilson, 1966; Le Pichon *et al.*, 1973). Des de finals del segle XIX i durant la primera meitat del segle XX, l'estudi de les grans conques sedimentàries es va dur a terme en el marc d'una concepció «immobilista», que es va concretar en la teoria del geosinclinal de Dana pels volts del 1873. Aquest geòleg nord-americà i d'altres de posteriors, centrats en els aspectes de l'evolució tectònica i estructural i les seves implicacions sedimentàries, van desenvolupar el concepte *geosinclinal* i el van vincular a l'existència de cicles orogènics. Aquests cicles s'iniciaven amb la formació d'extenses conques de gran llargària (solcs geosinclinals) el rebliment de les quals era després deformat i integrat en les grans serralades orogèniques. La teoria del geosinclinal va ser un paradigma útil, que va permetre avenços significatius i que va assolir el seu màxim desenvolupament doctrinal (i també la màxima expressió de les seves limitacions) durant la dècada dels seixanta del segle XX (Aubouin, 1965). A partir d'aquell moment, la tectònica de plaques o tectònica global (Wilson, 1966; Le Pichon *et al.*, 1973) presideix l'aproximació dels estudiosos de les ciències de la Terra als problemes plantejats quan s'aborda la comprensió de la dinàmica terrestre (figura 2). Això inclouria l'evolució del relleu i de les conques sedimentàries.

Aquesta nova teoria es va gestar al llarg de quasi seixanta anys des del moment en què Wegener va proposar la seva teoria de la deriva continental el 1912 (Le Pichon *et al.*, 1973). Pel que fa a l'anàlisi de conques, la tectònica de plaques va ampliar i obrir nous camps de recerca en moltes disciplines vinculades. També va permetre integrar molta informació dispersa que va guanyar sentit i significat dins del nou model global que, per primera vegada, donava un sentit evolutiu integral al registre tectònic i sedimentari reconegut a les grans conques continentals, marines i oceàniques del planeta. A partir de l'establiment del nou paradigma es va iniciar una línia de progrés centrat en la comprensió dels processos desenvolupats en les capes profundes de la Terra (nucli i mantell) i la seva influència en l'evolució de la litosfera i en la part més externa (escorça terrestre), incloent-hi la formació i l'evolució de conques sedimentàries. Des dels anys seixanta i fins a l'actualitat, s'han succeït avenços notables en la comprensió de l'origen i evolució dels diversos tipus de contextos tectònics gràcies als progressos de la geofísica i la geologia estructural, que han permès fer propostes realistes sobre l'estructura, les relacions i el comportament mecànic de les diverses capes terrestres involucrades en la tectònica de plaques (Busby i Ingersoll, 1995; Ingersoll, 2012; Busby i Azor, 2012; Allen i Allen, 2013).

L'estreta vinculació genètica dels diversos tipus de conques sedimentàries amb la dinàmica de la tectònica de plaques i el flux mantèl·lic condiciona clarament com les anomenem i les classifiquem. Aquestes classificacions, en primer lloc, tenen en compte el tipus de litosfera sobre la qual es formen les conques (continental, oceànica o de transició); en segon lloc, la seva situació respecte als límits de la placa (conques d'intraplaca *versus* conques marginals) i, finalment, el tipus de moviment del límit entre plaques més proper a la conca (límits de plaques tectòniques divergents, convergents o transformants) (Miall, 2000; Allen i Allen, 2013; Ingersoll, 2012; Busby i Ingersoll, 1995; Kingston *et al.*, 1983). Sense entrar en detalls i considerant exclusivament els processos litosfèrics, existeixen dos grans tipus de conques sedimentàries: les vinculades a l'aprimament i el subseqüent refredament de la litosfera (l'anomenada *associació de processos de fracturació intracontinental i deriva continental*) i les relacionades amb la flexió de plaques litosfèriques oceàniques o continentals (Allen i Allen, 2013).

3.3. Les propostes de l'estratigrafia sísmica i seqüencial

El tercer llinar a superar, entès com una de les darreres innovacions de la geologia sedimentària que afecta l'anàlisi de conques, va ser la introducció de dos conceptes estretament vinculats: l'estratigrafia sísmica i l'estratigrafia seqüencial (Payton, 1977). Com en molts altres casos en la història de la ciència, aquest progrés va resultar d'una acumulació de nous coneixements i conceptes instrumen-

tals d'abast inicialment limitat que finalment van convergir i es van combinar amb el progrés tecnològic en l'adquisició de dades del subsol. És a dir, abans, durant i després de l'esdeveniment conceptual de l'estratigrafia sísmica i seqüencial es van produir contribucions importants en el camp de l'anàlisi de conques i en l'estudi a gran escala del seu rebliment que van permetre arribar a la nova concepció.

Els primers passos de l'estratigrafia aplicada a l'estudi del rebliment de les conques sedimentàries es van caracteritzar sovint per una visió molt descriptiva i limitada als afloraments superficials produïts per l'erosió, ja que l'adquisició de dades de subsol era molt més limitada, tant pel cost que tenia com per la inexistència de la tecnologia adient. Aquest fet condicionava la percepció del significat del registre sedimentari, que sovint quedava restringit (sobretot en el món acadèmic, que no tenia accés als grans mitjans d'exploració del subsol) a una visió superficial, gairebé pel·lucular, molt bidimensional i descriptiva d'aquest registre. El terme *estratigrafia de pastís* (de l'anglès *layer cake stratigraphy*) resumeix molt gràficament aquesta situació. Tanmateix, sota aquestes condicions limitades ja es van desenvolupar conceptes que posteriorment es va veure que eren fonamentals. A tall d'exemple, podem mencionar els conceptes *canvis del nivell de base* (vegeu a Catuneanu, 2006: Gilbert, 1895; Barrell, 1917; Wheeler i Murray, 1957) i *seqüència* (Catuneanu, 2006: Wheeler, 1959; Sloss, 1962 i 1963), entesa com una unitat de dipòsit delimitada per discontinuïtats sedimentàries (Catuneanu, 2006).

Els progressos tecnològics i els mitjans que van afavorir un accés creixent a les dades del subsol i també van permetre ampliar gradualment la perspectiva amb què s'adquirien i s'analitzaven van ser aportats sobretot per les indústries i els serveis vinculats a la geologia econòmica i a l'exploració, l'explotació i la gestió de recursos hídrics, energètics i minerals. La necessitat d'aquestes indústries (en especial, la del petroli) de poder disposar d'un coneixement detallat del subsol de les conques va fer millorar de manera gradual i contínua dues tecnologies que van permetre l'adquisició cada cop més massiva de dades del subsol: les diagrafies de pou (figura 3; Galloway i Hobday, 1983) i la sísmica de reflexió (figura 4) amb la seva derivada, l'estratigrafia sísmica (Payton, 1977).

La implementació dels diversos tipus de diagrafies geofísiques de pou (especialment, les elèctriques) va permetre, amb un cost assumible, adquirir una gran quantitat d'informació sobre les litologies i els patrons d'acumulació en algunes conques parcialment emergides com, per exemple, les zones costaneres del golf de Mèxic (Galloway *et al.*, 1982; Galloway i Hobday, 1983). Aquesta extensa informació del subsol va ser recopilada pels geòlegs del Bureau of Economic Geology (vinculat a la Universitat de Texas) com un mitjà per analitzar i interpretar les acumulacions quilomètriques de sediments rics en hidrocarburs del golf de Mèxic més enllà de la descripció i denominació d'unitats litològiques. Les dades disponibles van permetre adquirir una visió millor del desenvolupament areal i

de la tridimensionalitat dels dispositius sedimentaris antics que havien donat lloc al rebliment de la conca. Els conceptes *sistema deposicional* i *episodi deposicional* (Galloway i Hobday, 1983; Miall, 1990 i 2000), com a conjunts de dipòsits genèticament relacionats entre ells i diferenciables dels d'altres sistemes veïns, va derivar-se de manera natural de l'anàlisi d'aquesta informació. Tal com ha destacat Miall (1990 i 2000), aquests conceptes no van ser formalitzats específicament però sí enunciats i utilitzats pels seus creadors i nombrosos grups de recerca (Galloway *et al.*, 1982; Galloway i Hobday, 1983). La millora de les tècniques d'adquisició de registres geofísics de sondejos (resistivitat, potencial espontani, radioactivitat natural, etc.) ha continuat fins a l'actualitat i, avui, juntament amb la sísmica de reflexió 3D, aporten una informació quantitativament i qualitativa molt significativa per a l'anàlisi de conques.

L'aplicació tant en conques emergides com submarines (fonamentalment situades en zones de marges continentals) de les tècniques d'adquisició de dades de la sísmica de reflexió va obrir una nova perspectiva per a la comprensió del rebliment de les conques sedimentàries. Per primera vegada va ser possible establir la geometria i les relacions espacials mútues de cossos sedimentaris que s'estenien de desenes a centenars de quilòmetres, de gran potència i dipositats durant desenes de milions d'anys al llarg de les regions de plataforma i talús dels marges continentals (figura 5). L'anàlisi i la interpretació d'aquestes geometries i la comparació realitzada entre registres de diversos marges continentals va portar al desenvolupament del nou concepte *seqüència deposicional* (Payton, 1977; Vail *et al.*, 1977), entesa com un conjunt genètic de dipòsits delimitats a partir del reconeixement de superfícies de contacte consistents en discontinuïtats estratigràfiques o les seves superfícies de continuïtat equivalents (figura 6). Les seqüències successives serien originades pels canvis relatius del nivell del mar. El concepte *seqüència deposicional*, entesa com el conjunt de dipòsits formats entre dos descensos successius del nivell del mar, s'integrava dins del paradigma de l'estratigrafia seqüencial (figures 5 i 6). Com es pot deduir, aquest pas conceptual va ser inicialment aportat des del món de la indústria petrolera, concretament per l'equip del grup de recerca d'Exxon (Payton, 1977; Mitchum, 1977; Vail *et al.*, 1977) i va implicar un canvi radical en la manera d'abordar l'anàlisi del rebliment de les conques sedimentàries. Paral·lelament, i amb posterioritat a l'aportació dels treballs seminals sobre el concepte d'estratigrafia seqüencial, hi va haver altres aportacions similars o pràcticament idèntiques:

- unitats tectonosedimentàries (Garrido-Megías, 1973), analitzades i detallades a Riba, 1989; Pardo *et al.*, 1989; Santanach, 1989, i Pérez Rivarés *et al.*, 2018;
- seqüències genètiques (Frazier, 1974; Galloway, 1989);
- seqüències transgressives-regressives (Johnson i Murphy, 1984; Embry, 1995; Embry i Johannessen, 1992; López Blanco, 1996 i 2006).

Totes elles, amb matisos i en alguns moments amb certes divergències, centren l'atenció en l'estudi i la comprensió del rebliment sedimentari des d'un punt de vista genètic i evolutiu.

Des de la seva definició en els anys setanta del segle xx (Mitchum, 1977), el concepte i l'aplicació de l'estratigrafia seqüencial va ser objecte de refinament i modificació sobretot per membres de l'equip del centre de recerca d'Exxon (on va néixer la proposta) i d'investigadors vinculats (Vail, 1987; Wagoner *et al.*, 1988 i 1990; Wilgus *et al.*, 1988; Christie-Blick, 1991; Haq *et al.*, 1987; Posamentier i Vail, 1988). També autors no vinculats a Exxon van fer diverses aportacions (Hunt i Tucker, 1992 i 1995; Helland-Hansen i Gjelberg, 1994; Helland-Hansen i Martinsen, 1996). Alguns dels fonaments enunciats van ser objecte de nombroses revisions crítiques i van haver de ser matisats i modificats. Així, la proposta que les seqüències deposicionals podien ser sincròniques i reconegudes a escala global va ser durament criticada i refutada (Miall, 2000). La contrastació de registres sedimentaris reals amb els models estratigràfics que es propugnaven a partir de les idees inicials de l'estratigrafia seqüencial va demostrar també que aquests models eren excessivament reduccionistes i simplistes. Aquesta contrastació es va desenvolupar a partir del treball realitzat sobre afloraments extensos i de qualitat de sistemes sedimentaris especialment accessibles per al seu estudi en superfície i de la revisió d'exemples basats en dades del subsol (Catuneanu, 2006; López Blanco, 2006; Abreu, 2010; Catuneanu *et al.*, 2011; Miall, 2016). Avui es pot considerar que l'organització seqüencial del rebliment d'una conca és el resultat de tots els canvis que l'han afectat durant la seva evolució a causa de diversos factors: per exemple, canvis simultanis i/o successius de subsidència, d'aportació externa o producció interna de sediment, del nivell de base, del nivell d'acumulació del sediment, etc. S'ha completat així un cicle d'avenç i de discussió i d'aplicació de conceptes iniciat a partir d'una visió a gran escala del rebliment de les conques sedimentàries i acabat amb un retorn a l'anàlisi detallada d'afloraments que, en condicions favorables, aporta un grau de resolució no assolible en el subsol.

Amb la perspectiva de poc més de quaranta anys des de la definició de les diverses propostes d'estratigrafia seqüencial i considerant les discussions i els debats que s'han produït, podríem afirmar que els principals problemes i controvèrsies derivaven d'un excés d'afany unificador i de l'establiment de models «únic» d'aplicació universal, que cobrissin tots els casos i situacions. Avui podem afirmar que la contribució més important de l'estratigrafia seqüencial ha estat posar l'accent en la necessitat d'una comprensió millor dels processos que generen les acumulacions de sediment. La metodologia d'anàlisi seqüencial dels rebliments de conques sedimentàries tendeix a prescindir de models apriorístics i a posar èmfasi en les informacions específiques disponibles a cada conca. L'organització

estratigràfica del rebliment de les conques sedimentàries depèn tant de factors globals com locals i, per tant, cap model pot reemplaçar l'observació i les dades específiques de cada conca. Aquesta diversitat no impedeix que, dins de l'actual marc conceptual de l'estratigrafia seqüencial (més obert i menys pendent de models prefixats), el treball a realitzar se centri en elements i criteris comunament acceptats, com poden ser els patrons d'acumulació dels dipòsits i l'anàlisi de les superfícies potencialment útils per a la subdivisió estratigràfica (Catuneanu *et al.*, 2011). És molt possible que en un termini curt sigui possible formalitzar una metodologia i models alternatius que recullin aquest enfocament obert.

4. PRESENT I FUTUR DELS AVENÇOS EN L'ANÀLISI DE CONQUES

Quins han estat recentment i en quina línia es poden desenvolupar en el futur immediat els nous progressos i millores en l'anàlisi de conques? Com en etapes anteriors, els avenços tecnològics seran un altre cop decisius en el desenvolupament de nous salts conceptuals. Des del darrer terç del segle xx i en els anys ja transcorreguts del segle XXI han seguit produint-se millores substancials en diversos aspectes, d'entre les quals destacaria l'enorme progrés instrumental de la informàtica i el desenvolupament d'ordinadors i de sistemes de computació cada cop més compactes i amb més capacitat de gestió de dades i més velocitat de càlcul. El simple increment cada pocs anys de la capacitat i velocitat de càlcul numèric i d'emmagatzemament de dades dels computadors i supercomputadors «convencionals» ha donat pas a grans avenços en el present i permet albirar un futur qualificable de sorprenent. A partir de les dades digitals obtingudes del subsol gràcies als nous mètodes d'adquisició, el processament i la visualització de la informació obtinguda es fa de manera molt més ràpida i la possibilitat de treballar amb imatges i models tridimensionals que poden ser visualitzats i sobretot analitzats com a tals han fet avançar molt ràpidament els procediments de treball (Miall, 2016).

4.1. Millores en l'adquisició de dades

L'adquisició de les dades del subsol (sísmica de reflexió 3D, cronoestratigrafia sísmica computacional, diagrafies de pou) i el processament, l'anàlisi posterior i l'explotació d'aquestes dades han fet un pas endavant molt notable gràcies a la millora tecnològica i informàtica esmentada. Això ha permès obtenir imatges i registres en 3D del subsol de les conques amb una nitidesa i resolució molt millors que les disponibles a finals del segle xx. L'actual qualitat dels registres de sísmica de reflexió, que des dels anys setanta del segle xx ja podia ser adquirida en registres 3D, permet assolir nivells de resolució molt bons i arribar a obtenir informació

sobre zones del subsol que fins fa relativament poc eren inaccessibles. Un exemple que palesa aquest fet és la relativament recent i cada cop més freqüent adquisició massiva de dades de sísmica de reflexió de les estructures geològiques i les conques sedimentàries situades per sota de potents nivells de sal, tant a la Mediterrània com als marges continentals del Brasil i de l'Àfrica occidental. Aquest ha estat un assoliment que semblava impossible no fa gaires anys i que ha obert nous horitzons d'exploració del subsol en situacions i medis de frontera (Paffenholz *et al.*, 2002).

4.2. Avenços de la modelització numèrica

Un model pot ser considerat una representació limitada d'un sistema natural o d'un procés o conjunt de processos (en aquest cas, geològics). Els models geològics són de diversos tipus i molt variats (Dalmasso *et al.*, 2001; Paola, 2000; Tetzlaff, 2004; Clavera, 2016). A grans trets podem parlar, d'una banda, de models numèrics estàtics que cerquen la reconstrucció geoestadística de cossos i, de l'altra, de models dinàmics o evolutius que generen representacions de successius estadis d'evolució del sistema a partir d'una interacció de processos controlats per diversos factors (subsidiència, aportacions de sediment i canvis del nivell de base). En ambdós casos, els models numèrics apunten l'establiment de la geometria dels cossos sedimentaris integrats en un sistema sedimentari i de la distribució de l'heterogeneïtat d'algunes de les seves propietats més significatives en termes d'exploració de recursos o gestió del subsol (porositat, permeabilitat). Els models evolutius numèrics de cossos sedimentaris i de les conques que els contenen (incloent-hi aspectes estructurals, sedimentaris, petrofísics, de circulació de fluids i d'evolució tèrmica durant l'enterrament) es construeixen i es calculen sovint en 3D i en molts casos en 4D, si es considera la dimensió temporal.

El desenvolupament de programes de modelització numèrica de conques és una línia de treball instrumental que des de finals del segle xx està generant avenços molt significatius en l'anàlisi de conques. El desenvolupament dels models numèrics ha representat un nou salt qualitatiu que ha permès replantejar objectius. El progrés en l'experimentació numèrica ha augmentat exponencialment des que es pot disposar del suport d'un maquinari amb una velocitat de càlcul creixent i una major capacitat de gestió de grans bases de dades, fets que permeten modelitzar l'evolució tectonoestructural de les conques i/o dels sistemes sedimentaris que n'integren el reblliment. La capacitat de produir models numèrics, amb els quals es pot experimentar la variació de paràmetres per donar lloc a reblliments de conca amb diverses característiques, és una realitat des de la dècada dels noranta del segle passat, com també ho és la realització d'experiments numèrics que combinen processos tectònics i d'erosió-sedimentació.

L'increment exponencial del volum i de la disponibilitat de bases de dades i la millora de la capacitat dels ordinadors en el càlcul i gestió de grans quantitats d'informació han estat factors clau en el camp de la modelització de conques. L'avenç experimentat en aquest camp s'ha concretat en el desenvolupament de nombrosos programes comercials i acadèmics que poden ser utilitzats en ordinadors personals amb una capacitat de càlcul creixent i combinats amb sistemes de visualització cada cop més amables. De tot plegat en resulten productes que permeten assolir visions, inèdites fa pocs anys, dels cossos sedimentaris i permeten entendre'ls millor des de les perspectives d'exploració, d'extracció i de gestió de recursos. Són nombrosos els estudis realitzats en aquest camp als centres de recerca del nostre país (Bitzer i Salas, 2002; Gratacós, 2004; Falivene, 2006; Falivene *et al.*, 2007; Gratacós *et al.*, 2009; Cabello, 2010; Cabello *et al.*, 2018 i en premsa; Carmona, 2016; Clavera, 2016; tots ells amb referències dels treballs seminals més significatius d'aquest camp).

Els models evolutius numèrics de conca poden combinar-se amb els models evolutius analògics inicialment centrats en l'estudi de sistemes estructurals. Ambdues aproximacions, analògica i numèrica, són clarament complementàries i no és infreqüent el desenvolupament paral·lel de models analògics i numèrics centrats en situacions similars, amb l'objectiu de poder comparar-ne els resultats obtinguts. La comparació dels resultats dels experiments numèrics i analògics dona fe de la bondat d'aquests mètodes per avançar en una millor comprensió de l'evolució de les conques.

Dins del camp de la modelització numèrica, cal fer esment de la irrupció als estudis geològics —i a l'anàlisi de conques en particular— del fenomen de les dades massives o megadades (*big data*; Domingo-Ferrer, 2016). El concepte *dades massives*, nascut sobretot en relació amb els estudis de mercat del consum i dels consumidors, ha estat descrit com un terme calaix de sastre segons sigui utilitzat per diferents tipus de professionals, des de venedors a usuaris i professionals del negoci en general fins als desenvolupadors de noves tècniques i estratègies per explotar informació massiva. Generalment s'indica que el terme inclou, en primer lloc, les grans bases de dades pròpiament dites, però també els procediments seguits per gestionar les dades, treure'n profit i fer aflorar relacions a partir de gran quantitat d'informacions heterogènies. És a dir, les estratègies i tècniques que persegueixen reunir, organitzar, processar i obtenir noves perspectives de determinats temes o objectes d'estudi utilitzant bases de dades que hom podria qualificar de gegantines, però també d'heterogènies o, fins i tot, d'inconnexes (Ellingwood, 2016). Els conceptes *dades massives*, *intel·ligència artificial*, *aprenentatge automàtic*, *models lògics difusos* i els de tècniques com la *mineria i explotació de dades* i *xarxes neuronals artificials* es vinculen conceptualment i instrumental al concepte *dades massives* (López de Mántaras, 2018).

En el camp de les ciències de la Terra i, més específicament, en el de l'anàlisi de conques, estariem parlant de bases de dades geofísiques d'ampli abast (sísmica de reflexió 2D i 3D, gravimetria, dades electromagnètiques), dades més localitzades en l'àmbit dels pous d'exploració (evolució de la temperatura, registres geofísics i la informació petrofísica que se'n deriva), dades geològiques (roques presents, estratigrafia, estructura), dades hidrogeològiques (característiques i evolució d'aqüífers i aqüítards) i hidroquímiques (composició dels soluts de les aigües subterrànies de la conca), i dades geoquímiques inorgàniques i orgàniques (distribució d'elements traça, contingut en matèria orgànica i el seu grau de maduració, compostos orgànics preservats). Segons les visions més optimistes, les dades massives combinades amb una capacitat de càlcul incrementada exponencialment haurien de permetre una millor comprensió integral de les conques sedimentàries i modelar la interacció entre els processos superficials i profunds de la Terra. Aquest és un dels objectius declarats i perseguits en projectes molt ambiciosos desenvolupats per consorcis acadèmia-indústria i que cerquen la consecució de models de conca no ja en quatre dimensions (les tres espacials i el temps), sinó en cinc, afegint-hi com a dimensió l'estimació de la incertesa (vegeu-ne un exemple sobre Genesis Hub a Oil & Gas Australia, 2014, i a EarthByte, 2014). Aquest salt qualitatiu cerca inicialment millorar l'eficàcia i la qualitat de l'anàlisi de conques, sobretot per a l'exploració de dipòsits minerals i de reservoris d'hidrocarburs, ja que precisa les possibilitats de la seva presència, ubicació i característiques en les diverses conques (Nimmagadda *et al.*, 2017; Nash, 2017; Milam, 2018). Però és evident que la seva aplicació es pot estendre a altres dominis relacionats de forma més general amb la gestió del medi geològic del subsol. L'escenari del desenvolupament i l'extensió gradual de les dades massives ja és un fet i les diferències que podem trobar en la capacitat per a la seva aplicació, per exemple entre el domini acadèmic i l'industrial i, en general, entre diversos grups de treball, són essencialment de mitjans (ens referim tant a les bases de dades com al maquinari necessari per gestionar-les). Les grans corporacions poden generar i disposar de grans bases de dades i accedir a mitjans de supercomputació que els permeten realitzar processaments i anàlisis de dades de manera massiva amb resultats potencialment notables. Els equips de treball acadèmics han d'associar-se amb les grans o mitjanes corporacions per accedir-hi.

El que s'ha exposat als paràgrafs anteriors podria transmetre la idea que l'aportació des del món acadèmic o de la recerca no vinculada o associada a la indústria només podrà ser menor que la contribució feta des de les grans corporacions que disposen de grans mitjans. Tanmateix, com s'ha indicat, la formació de consorcis cooperatius és una via perquè els grups de recerca acadèmics puguin accedir a les dades massives i la seva anàlisi. I també, des d'un àmbit més modest però molt eficaç, els centres universitaris i de recerca poden assolir resul-

tats bons i significatius, tot i no poder treballar amb dades massives. Els ordinadors i estacions de treball actuals assoleixen nivells de capacitat i de velocitat de càlcul ja molt notables, i els grups de treball de l'acadèmia poden desenvolupar metodologies amb fluxos de treball que combinen i integren diverses fonts d'informació analògica i digital que, finalment, aporten resultats molt vàlids i molt arrelats a les dades «dures», sobretot a escales de treball regionals. A tall d'exemple es pot fer referència a les contribucions de l'Institut de Recerca Geomodels, de la Universitat de Barcelona, integrat per diversos grups d'investigadors amb objectius pluridisciplinaris i que al llarg dels anys han anat desenvolupant capacitats diverses en el camp de l'anàlisi de conques, la reconstrucció de reblliments sedimentaris i la modelització de conques (Geomodels, http://www.ub.edu/geomodels/Home_cat_2.html).

5. COLOFÓ: LA IMPORTÀNCIA I L'INTERÈS FUTURS DE L'ANÀLISI DE CONQUES

La importància de l'anàlisi de conques és evident i clarament transcendental en la nostra societat, que demana recursos naturals sovint no renovables o difícilment reciclables amb una progressió de consum, que és, tot i que oscil·lant, generalment creixent (Fundación Santander Central Hispano, 2005).

Pràcticament tots els recursos energètics utilitzats en el transport i en la producció industrial i d'energia, en què es basa l'economia actual —anomenada *economia del carboni* (carbó, petroli, gas natural)—, són extrets de conques sedimentàries. Pel que fa al carbó, la major part de la producció és utilitzada per produir electricitat en les centrals tèrmiques. A causa dels greus problemes ambientals que planteja, la tendència en bona part dels països més desenvolupats, malgrat alguns vaivens polítics, és reduir-ne gradualment el consum (Friedman, 2018a). Tot i això, el consum de petroli i de gas natural encara serà molt significatiu en bona part del segle XXI, malgrat el desig i la necessitat d'anar-ne reduint el consum. Pel que fa tant al petroli com al gas natural, hi ha noves conques que fins ara han estat quasi inexplorades, com per exemple les regions de l'Àrtic i els marges orientals de l'Àfrica oriental. Arribat el cas, caldrà instal·lar en aquestes àrees de frontera, i potser en altres que encara no s'han descobert, les infraestructures necessàries per a l'explotació i la gestió dels recursos energètics d'aquestes conques. Això requerirà un coneixement profund de les seves característiques i l'anàlisi de conques serà fonamental. Altres grans conques ja han estat prèviament explorades i explotades durant decennis, com les de les regions de l'Orient Mitjà, l'Àfrica del Nord, els marges continentals atlàntics de l'Àfrica occidental i el Brasil, l'Amèrica del Nord i del Sud, etc. En relació amb aquestes conques —ben conegudes i amb una llarga experiència d'exploració i extracció (conques madures)— ha sorgit recentment el concepte *superconques globals*, que en essèn-

cia planteja la possibilitat de millorar la recuperació i d'allargar la vida dels camps de petroli gegants i d'algunes de les grans conques petrolieres mundials (Brown, 2018a i 2018b; Friedman, 2018b). Les condicions per assolir aquest objectiu inclouen tant aspectes estrictament geologicoexploratoris (capacitat productiva demostrada i potencial de nova producció; existència d'almenys dues o més roques mare d'hidrocarburs i sistemes de petroli) com d'infraestructures i marc legal (infraestructures petrolieres i gasístiques ja actives, accés fàcil als mercats i legislació no restrictiva). Fins a vint-i-cinc grans conques poden ser qualificades de superconques i les expectatives de recuperació de petroli s'estimen en 859 milions de barrils (Brown, 2018a). El plantejament del concepte *superconques* implica que cal millorar el coneixement que es té de les conques i optimitzar l'extracció dels recursos disponibles minimitzant l'impacte ambiental i assegurant que sigui possible la màxima recuperació.

Pel que fa als recursos de diverses menes minerals metàl·liques i de minerals de l'urani susceptibles de ser utilitzats en centrals de fissió nuclear (Kyser, 2007) i de matèries primeres (roques i sediments per a la construcció, materials refractaris, salmorres amb elevades concentracions d'elements químics d'interès industrial i estratègic, etc.), molts d'ells procedeixen també de conques sedimentàries, algunes d'elles actuals. Les mateixes idees expressades en relació amb el petroli i el gas natural es poden aplicar a aquests recursos.

Tanmateix, si el consens polític generalment acceptat sobre la necessitat de reduir dràsticament les emissions de CO₂ i la tendència a la descarbonització de l'economia es manté, al llarg del segle XXI el paper de les conques sedimentàries com a font de productes energètics disminuirà i deixarà pas gradualment a la recerca de nous tipus de recursos naturals i a funcions més ajustades a les necessitats humanes del moment.

Els grans aquífers (antics i moderns) que s'han identificat en algunes conques sedimentàries de gran extensió contenen recursos d'aigües subterrànies que es faran cada cop més necessaris per mantenir el subministrament per al consum humà, agrícola i industrial. A tall d'exemple podem mencionar el sistema d'aquífer del gres de Núbia, un reservori subterrani d'aigua, de qualitat diversa però totalment aprofitable, que s'estén per bona part del nord d'Àfrica, a la regió del desert del Sàhara (Líbia, Egipte i Algèria i Txad oriental fonamentalment; Sayed *et al.*, 2001; Abd El Samie i Sadek, 2001; Dahab *et al.*, 2001). Des que es va descobrir, s'han desenvolupat importants projectes d'irrigació i subministrament per al consum humà. L'actual situació política ha esdevingut una complicació notable, però des del començament del segle XXI s'ha treballat per millorar-ne el coneixement geològic des de diverses perspectives, incloent-hi l'anàlisi del reblliment sedimentari de les conques on es va formar l'aquífer. Si es vol desenvolupar una gestió racional i justa d'aquest aquífer serà necessari disposar d'una bona informació de base

sobre la geometria, distribució i connectivitat dels cossos gresosos que l'integren. La modelització dels sistemes sedimentaris i de les conques que els inclouen seran fonamentals, en especial tenint en compte el caràcter transfronterer de l'aquífer i els seus recursos.

També es planteja que en un futur no llunyà caldrà aprofitar millor les acumulacions de salmorres existents a les conques sedimentàries (no només les somes, sinó també les profundes) per extreure'n recursos químics. N'és un exemple el cas del liti, que fonamentalment s'explota a l'Argentina, Bolívia i el Tibet. Avui el liti ja és molt important i ha esdevingut un element estratègic en aquest segle a causa de la seva utilització en la fabricació de bateries de llarga durada, tant per a mòbils i ordinadors com per a vehicles. Però també —i no és un tema menor— podrà ser utilitzat en la possible futura tecnologia de l'energia de fusió nuclear, com una font d'àtoms de triti dins del procés de fusió. La racionalització i planificació adequada d'aquestes explotacions és complexa i presenta nombrosos problemes (Morris, 2015). Conèixer millor les característiques dels reservoris que contenen salmorres amb liti permetrà solucionar part dels greus problemes tècnics que es plantegen per a l'extracció d'aquestes salmorres.

Des d'una altra perspectiva, la porositat de les grans formacions rocoses existents en el subsol de les conques sedimentàries pot acollir residus resultants de l'activitat humana. La captura-segrestament i emmagatzematge de CO₂ en reservoris subterranis de conques sedimentàries és una tècnica ja llargament aplicada per les companyies petrolieres. El desenvolupament generalitzat d'aquesta estratègia requerirà un molt bon coneixement de les característiques dels reservoris. Cal una aproximació similar per a reservoris subterranis de productes químics residuals o per a recursos fluids (gas natural) que es vulguin emmagatzemar per racionalitzar-ne l'ús i la gestió. Tant per als uns com per als altres, caldrà trobar una destinació segura i gestionable en el subsol. Experiències molt recents en el nostre entorn proper, com la del magatzem de gas del projecte Castor, assenyalen la importància d'un coneixement acurat del subsol per assolir l'èxit.

El desenvolupament i la gestió adients dels recursos existents en les conques sedimentàries (entenen el mateix subsol com un recurs) requerirà el desenvolupament de noves tècniques i conceptes que, tot i no ser tots ells estrictament propis de l'anàlisi de conques, hi estaran estretament vinculats. Aquest seria el repte plantejat en el futur a mitjà termini. Caldrà generar nou coneixement i/o noves aproximacions que siguin útils en la presa de decisions per tot allò que afecti la futura gestió —i ja no tan sols l'explotació— de les conques sedimentàries.

AGRAÏMENTS

L'activitat de recerca relacionada amb aquesta contribució s'ha realitzat en el marc del projecte SEROS CGL2014-55900P i de les activitats de l'Institut de Recerca Geomodels, finançat en part pel projecte 2014SGR467 de la Generalitat de Catalunya. Aquesta comunicació ha estat possible gràcies a la col·laboració dels companys del Departament de Dinàmica de la Terra i de l'Oceà i de l'Institut de Recerca Geomodels: Patrícia Cabello, Oriol Falivene i Òscar Gratacós van compartir el resultat de la seva recerca i experiència en el camp de la modelització numèrica de cossos i sistemes sedimentaris; Miguel Garcés, Miguel López Blanco i Alberto Sáez també van contribuir en la discussió sobre estratigrafia seqüencial amb els resultats dels seus treballs d'anàlisi de conques a la regió d'avantpaís sud-pirinenca, i Mariano Marzo i Montserrat Inglés van revisar i comentar una versió preliminar del text.

Finalment, vull expressar el meu agraïment a la meva família, esposa i fills per ser-hi sempre, ben a prop. I a tots els amics i amigues que m'han acompanyat i donat suport al llarg dels anys.

REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES

- ABREU, V. (ed.) (2010). *Sequence stratigraphy of siliciclastic systems: The ExxonMobil methodology: Atlas of exercises*. Tulsa (Oklahoma): SEPM. 226 p. (SEPM. Concepts in Sedimentology and Paleontology; 9)
- ALLEN, J. R. L. (1993). «Sedimentary structures: Sorby and the last decade». *Journal of the Geological Society*, vol. 150 (3), p. 417-425.
- ALLEN, P. A.; ALLEN, J. R. (1990). *Basin analysis: Principles and applications*. Oxford: Blackwell Publishing Ltd. 451 p.
- (2005). *Basin analysis: Principles and applications*. 2a ed. Oxford: Blackwell Publishing Ltd. 549 p.
- (2013). *Basin analysis: Principles and applications to petroleum play assessment*. 3a ed. Oxford: Blackwell Publishing Ltd. 619 p.
- AUBOUIN, J. (1965). *Geosynclines*. Amsterdam: Elsevier. 352 p.
- BITZER, K.; SALAS, R. (2002). «SIMSAFADIM: three-dimensional simulation of stratigraphic architecture and facies distribution modeling of carbonate sediments». *Computers and Geosciences*, vol. 28 (10), p. 1177-1192.
- BJORLYKKE, K. (2015). *Petroleum geoscience*. 2a ed. Heidelberg: Springer.
- BROWN, D. (2018a). «The imminent age of the super basin». *AAPG Explorer*, vol. 39 (1), p. 8.
- (2018b). «Mexico's sureste basin. An archetype of a "super basin"». *AAPG Explorer*, vol. 39 (1), p. 12.

- BUSBY, C.; AZOR, A. (ed.) (2012). *Tectonics of sedimentary basins: Recent advances*. [S. l.]: Wiley-Blackwell. 664 p.
- BUSBY, C.; INGERSOLL, R. V. (ed.) (1995). *Tectonics of sedimentary basins*. Oxford: Blackwell Publishing Ltd. 579 p.
- CABELLO, P. (2010). *Modelos 3D de facies en sistemas deltaicos a partir de afloramientos*. Tesi doctoral. Universitat de Barcelona. 183 p.
- CABELLO, P.; DOMÍNGUEZ, D.; MURILLO, M.; LÓPEZ BLANCO, M.; GARCIA-SELLES, D.; CUEVAS, J. L.; MARZO, M.; ARBUÉS, P. (2018). «From conventional outcrop datasets and digital outcrop models to flow simulation in the Pont de Montanyana point-bar deposits (Ypresian, Southern Pyrenees)». *Marine and Petroleum Geology*, vol. 94 (juny), p. 19-42.
- CABELLO, P.; LOPEZ, C.; GAMBA, N.; DUSSAN, M. I.; TORRES, E.; BALLESTEROS-TORRES, C. I.; CANTRISANO, M. T.; MARFISI, N.; CALVO, R.; VAZQUEZ TASED, Y. M.; RAMOS, E. (en premsa). «An integrated approach to define new plays in mature oil basins: the example from the Middle Magdalena Valley basin (Colombia)». *AAPG Bulletin*.
- CARMONA, A. (2016). *Combining discrete element and process-based sedimentary models: A new tool to model syntectonic sedimentation*. Tesi doctoral. Universitat de Barcelona. 200 p.
- CATUNEANU, O. (2006). *Principles of sequence stratigraphy*. Amsterdam: Elsevier. 375 p.
- CATUNEANU, O.; GALLOWAY, W. E.; KENDALL, C.; MIAL, A.; POSAMENTIER, H. W.; STRASSER, A.; TUCKER, M. E. (2011). «Sequence stratigraphy: methodology and nomenclature». *Newsletters on Stratigraphy*, vol. 44 (3), p. 173-245.
- CHRISTIE-BLICK, N. (1991). «Onlap, offlap, and the origin of unconformity-bounded depositional sequences». *Marine Geology*, vol. 97, p. 35-56.
- CLAVERA, R. (2016). *Forward numerical modelling of carbonate basins: An ecological approach*. Tesi doctoral. Universitat de Mines i Tecnologia de Freiberg.
- COLLINSON, J. D.; THOMPSON, D. B. (1982). *Sedimentary structures*. Londres: Allen & Unwin. 194 p.
- DAHAB, K. A.; EBRAHEEM, A. M.; EL SAYED, E. A. (2001). «A study of hydrogeological conditions of the Nubian Sandstone aquifer in the area between Abu Simbel and Toshka, Western Desert, Egypt». *American Geophysical Union Spring Meeting Abstracts*.
- DALMASSO, H.; MONTAGGIONI, L.; BOSENCE, D.; FLOQUET, M. (2001). «Numerical modelling of carbonate platforms and reefs. Approaches and opportunities». *Energy, Exploration and Exploitation*, vol. 19 (4), p. 315-345.
- DOMINGO-FERRER, J. (2016). *Privadesa en temps de megadades: entre el nihilisme i el fonamentalisme*. Discurs de presentació de Josep Domingo-Ferrer com a membre numerari de la Secció de Ciències i Tecnologia, llegit el dia 21 de novembre de 2016. Barcelona: IEC. 16 p.
- EARTHBYTE (2014). «The basin GENESIS Hub» [en línia]. <<https://www.earthbyte.org/the-basin-genesis-hub>> [Consulta: 27 gener 2018].

- EINSELE, G. (1992). *Sedimentary basins: Evolution, facies and sediment budget*. Heidelberg: Springer. 628 p.
- (2000). *Sedimentary basins: Evolution, facies and sediment budget*. 2a ed. Heidelberg: Springer. 792 p.
- EL SAMIE, S. A.; SADEK, M. (2001). «Groundwater recharge and flow in the Lower Cretaceous Nubian Sandstone aquifer in the Sinai Peninsula, using isotopic techniques and hydrochemistry». *Hydrogeology Journal*, vol. 9 (4), p. 378-389.
- ELLINGWOOD, J. (2016). «An introduction to big data concepts and terminology». *Digital Ocean* [en línia]. <<https://www.digitalocean.com/community/tutorials/an-introduction-to-big-data-concepts-and-terminology>> [Consulta: 26 març 2018].
- EMBRY, A. F. (1995). «Sequence boundaries and sequence hierarchies: problems and proposals». A: STEEL, R. J.; FELT, V. L.; JOHANNESSEN, E. P.; MATHIEU, C. (ed.). *Sequence stratigraphy of the Northwest European Margin*. Amsterdam: Elsevier. (Norwegian Petroleum Society Special Publication; 5), p. 1-11.
- EMBRY, A. F.; JOHANNESSEN, E. P. (1992). «T-R sequence stratigraphy, facies analysis and reservoir distribution in the uppermost Triassic-Lower Jurassic succession, western Sverdrup basin, Arctic Canada». A: VORREN, T. O.; BERGSAGER, E.; DAHL-STAMNES, O. A. [et al.] (ed.). *Arctic geology and petroleum potential*. Amsterdam: Elsevier. (Norwegian Petroleum Society Special Publication; 2), p. 121-146.
- FALIVENE, O. (2006). *Testing three-dimensional facies reconstruction and modelling techniques applied to cored and outcropping analogues*. Tesi doctoral. Universitat de Barcelona. 358 p.
- FALIVENE, O.; CABRERA, L.; MUÑOZ, J. A.; ARBUÉS, P.; FERNÁNDEZ, O.; SÁEZ, A. (2007). «Statistical grid-based facies reconstruction and modelling for sedimentary bodies. Alluvial-palustrine and turbiditic examples». *Geologica Acta*, vol. 5 (3), p. 199-230.
- FRAZIER, D. E. (1974). *Depositional episodes: Their relationship to the Quaternary stratigraphic framework in the northwest portion of the Gulf Basin*. Texas (Austin): Bureau of Economic Geology Geological. Universitat de Texas.
- FRIEDMAN, B. (2018a). «A “once-in-a-generation” opportunity». *AAPG Explorer*, vol. 39 (1), p. 10-11.
- (2018b). «Gulf of Mexico: where big fields are getting bigger». *AAPG Explorer*, vol. 39 (1), p. 14-15.
- FUNDACIÓN SANTANDER CENTRAL HISPANO (2005). «El protagonismo de las materias primas». *Cuadernos de Sostenibilidad y Patrimonio Natural*, núm. 8. 65 p.
- GALLOWAY, W. E. (1989). «Genetic stratigraphic sequences in basin analysis (I). Architecture and genesis of flooding surface bounded depositional units». *AAPG Bulletin*, vol. 73, p. 125-142.
- GALLOWAY, W. E.; HOBDAY, D. K. (1983). *Terrigenous clastic depositional systems*. Berlín; Heidelberg: Springer. 423 p.

- GALLOWAY, W. E.; HOBBDAY, D. K.; MAGARA, K. (1982). «Frio formation of Texas Gulf Coastal Plain depositional systems, structural framework and hydrocarbon distribution». *AAPG Bulletin*, vol. 6, p. 649-688.
- GARRIDO-MEGÍAS, A. (1973). *Estudio geológico y relación entre tectónica y sedimentación del Secundario y Terciario de la vertiente meridional pirenaica en su zona central (provincias de Huesca y Lérida)*. Tesis doctoral. Universitat de Granada. 395 p.
- GRATACÓS, Ò. (2004). *SIMSAFADIM-CLASTIC: Modelización 3D de transporte y sedimentación clástica subacuática*. Tesis doctoral. Universitat de Barcelona. 216+XXXIX p.
- GRATACÓS, Ò.; BITZER, K.; CABRERA, L.; ROCA, E. (2009). «SIMSAFADIM-CLASTIC: a new approach to mathematical 3D forward simulation modelling for terrigenous and carbonate marine sedimentation». *Geologica Acta*, vol. 7 (3), p. 311-322.
- HAQ, B. U.; HARDENBOL, J.; VAIL, P. R. (1987). «Chronology of fluctuating sea level since Triassic (250 million years ago to present)». *Science*, vol. 235, p. 1156-1166.
- HELLAND-HANSEN, W.; GJELBERG, J. G. (1994). «Conceptual basis and variability in sequence stratigraphy: a different perspective». *Sedimentary Geology*, vol. 92, p. 31-52.
- HELLAND-HANSEN, W.; MARTINSEN, O. J. (1996). «Shoreline trajectories and sequences: description of variable depositional-dip scenarios». *Journal of Sedimentary Research*, vol. 66 (4), p. 670-688.
- HUNT, D.; TUCKER, M. E. (1992). «Stranded parasequences and the forced regressive wedge systems tract: deposition during base-level fall». *Sedimentary Geology*, vol. 81, p. 1-9.
- (1995). «Stranded parasequences and the forced regressive wedge systems tract: deposition during base-level fall. Reply». *Sedimentary Geology*, vol. 95, p. 147-160.
- INGERSOLL, R. V. (2012). «Tectonics of sedimentary basins, with revised nomenclature». A: BUSBY, C.; AZOR, A. (ed.) (2012). *Tectonics of sedimentary basins: Recent advances*. [S. l.]: Wiley-Blackwell. 664 p.
- JOHNSON, J. G.; MURPHY, M. A. (1984). «Time-rock model for Siluro-Devonian continental shelf, western United States». *GSA Bulletin*, vol. 95, p. 1349-1359.
- KINGSTON, D. R.; DISHROON, C. P.; WILLIAMS, P. A. (1983). «Global basin classification». *AAPG Bulletin*, vol. 67, p. 2175-2193.
- KYSER, T. K. (2007). «Fluids, basin analysis, and mineral deposits». *Geofluids*, vol. 7, p. 238-257.
- LE PICHON, X.; FRANCHETEAU, J.; BONNIN, J. (1973). *Plate tectonics*. Amsterdam: Elsevier. 299 p. (Developments in Geotectonics; 6)
- LOPEZ BLANCO, M. (1996). *Estratigrafía secuencial de sistemas deltaicos en cuencas de antepaís: Ejemplos de Sant Llorenç del Munt, Montserrat y Roda (Paleógeno, cuenca de antepaís surpirenaica)*. Tesis doctoral. Universitat de Barcelona. 238 p.
- (2006). «Stratigraphic and tectonosedimentary development of the Eocene Sant Llorenç del Munt and Montserrat fan-delta complexes (Southeast Ebro Basin margin, North-east Spain)». *Contributions to Science*, vol. 3 (2), p. 125-148.

- LÓPEZ DE MÁNTARAS, R. (2018). *Passat, present i futur de la intel·ligència artificial: algunes reflexions*. Discurs de presentació de Ramon López de Mántaras com a membre numerari de la Secció de Ciències i Tecnologia (19 de febrer de 2018). Barcelona: IEC.
- MIAL, A. D. (1985). *Principles of sedimentary basin analysis*. Heidelberg: Springer. 490 p.
- (1990). *Principles of sedimentary basin analysis*. 2a ed. Heidelberg: Springer. 668 p.
- (2000). *Principles of sedimentary basin analysis*. 3a ed. Heidelberg: Springer. 616 p.
- (2016). *Stratigraphy: A modern synthesis*. Heidelberg: Springer. 454 p.
- MILAM, K. (2018). «Searching for energy resources with network analysis». *AAPG Explorer*, vol. 39 (1), p. 13.
- MITCHUM, R. M. Jr. (1977). «Seismic stratigraphy and global changes of sea level. Part 11: Glossary of terms used in seismic stratigraphy». A: PAYTON, C. E. (ed.). *Seismic stratigraphy: Applications to hydrocarbon exploration*. [S. l.]: American Association of Petroleum Geologists, p. 205-212. (AAPG Memoir; 26)
- MORRIS, D. Z. (2015). «The era of the electric car promises a lithium mining boom, but new lithium startups are floundering. Here's why». *Fortune* [en línia]. <<http://fortune.com/2015/04/26/lithium-mining>> [Consulta: 15 febrer 2018].
- NASH, S. (2017). «Breakthrough big data and deep learning in today's oil industry: interview with Kamal Hami-Eddine». *AAPG Blog* [en línia]. <<http://www.aapg.org/publications/blogs/learn/article/Articleid/37297/breakthrough-big-data-and-deep-learning-in-todays-oil-industry-interview-with-kamal-hami-eddine>> [Consulta: 10 febrer 2018].
- NIMMAGADDA, S. L.; RINERS, T.; RUDRA, A. (2017). «An upstream business data science in a big data perspective». *Procedia Computer Science*, vol. 112, p. 1881-1890.
- OIL & GAS AUSTRALIA (2014). «Big data used for basin analysis» [en línia]. <<http://www.oilandgasaustralia.com.au/big-data-used-for-basin-analysis>> [Consulta: 7 febrer 2018].
- PAFFENHOLZ, J.; STEFANI, J.; McLAIN, B.; BISHOP, K. (2002). «SIGSBEE_2A Synthetic subsalt dataset: image quality as function of migration algorithm and velocity model error». A: *Extended abstracts book: 64th EAGE conference and exhibition*. Houten (Holanda): EAGE. 4 p.
- PAOLA, C. (2000). «Quantitative models of sedimentary basin filling». *Sedimentology*, vol. 47, p. 121-178.
- PARDO, G.; VILLENA, J.; GONZÁLEZ, A. (1989). «Contribución a los conceptos y a la aplicación del análisis tectosedimentario. Rupturas y unidades tectosedimentarias como fundamento de correlaciones estratigráficas». *Revista de la Sociedad Geológica de España*, vol. 2 (3-4), p. 199-221.
- PAYTON, C. E. (ed.) (1977). *Seismic stratigraphy: Applications to hydrocarbon exploration*. [S. l.]: American Association of Petroleum Geologists. (AAPG Memoir; 26)
- PÉREZ RIVARÉS, J.; ARENAS, C.; PARDO, G.; GARCÉS, M. (2018). «Temporal aspects of genetic stratigraphic units in continental basins: examples from the Ebro basin, Spain». *Earth Science Reviews*, vol. 178, p. 136-153.
- POSAMENTIER, H. W.; VAIL, P. R. (1988). «Eustatic control on clastic deposition. II. Sequence

- and systems tract models». A: WILGUS, C. K.; HASTINGS, B. S.; KENDALL, C.; POSAMENTIER, H. W.; ROSS, C. A.; WAGONER, J. C. van (ed.). *Sea level changes: An integrated approach*. Tulsa (Oklahoma): SEPM, p. 125-154. (SEPM. Special Publication; 42)
- POTTER, P. E.; PETTIJOHN, F. J. (1963). *Paleocurrents and basin analysis*. Heidelberg: Springer.
- RIBA, O. (1989). «Unidades tectosedimentarias y secuencias deposicionales». *Revista de la Sociedad Geológica de España*, vol. 2 (3-4), p. 189-198.
- ROEHL, P. E.; CHOQUETTE, P. W. (ed.) (1985). *Carbonate petroleum reservoirs*. Berlín: Springer. 622 p.
- SANTANACH, P. (1989). «Reflexiones sobre los mecanismos de incidencia de la tectónica en la división estratigráfica de rellenos de cuenca. Implicaciones en la correlación estratigráfica». *Revista de la Sociedad Geológica de España*, vol. 2 (3-4), p. 223-234.
- SAYED, E. E.; DAHAB, K. A.; KOM, S. E.; EBRAHEEM, A. M. (2001). «Hydrogeological and hydrogeochemical aspects of the Nubian Sandstone aquifer in East Oweinat area, SW Egypt». *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie-Abhandlungen*, vol. 233 (1), p. 121-152.
- SORBY, H. C. (1908). «On the application of quantitative methods to the study of the structure and history of rocks». *Quarterly Journal of the Geological Society*, vol. 64, p. 171-232.
- TETZLAFF, D. M. (2004). «Input uncertainty and conditioning in siliclastic process modeling». A: *Geological prior information: Informing science and engineering*. Londres: Geological Society, p. 95-109. (Geological Society Special Publications; 239)
- VAIL, P. R. (1987). «Seismic stratigraphy interpretation procedure». A: BALLY, A. W. (ed.). *Atlas of seismic stratigraphy*, p. 1-10. (AAPG Studies in Geology; 27)
- VAIL, P. R.; MITCHUM, R. M. Jr.; THOMPSON III, S. (1977). «Seismic stratigraphy and global changes of sea level. Part four: Global cycles of relative changes of sea level». A: PAYTON, C. E. (ed.). *Seismic stratigraphy: Applications to hydrocarbon exploration*. [S. l.]: American Association of Petroleum Geologists, p. 83-98. (AAPG Memoir; 26)
- WAGONER, J. C. van; MITCHUM, R. M. Jr.; CAMPION, K. M.; RAHMANIAN, V. D. (1990). *Siliclastic sequence stratigraphy in well logs, core and outcrops: Concepts for high resolution correlation of time and facies*. Tulsa (Oklahoma): American Association of Petroleum Geologists. 55 p. (AAPG Methods in Exploration Series; 7)
- WAGONER, J. C. van; POSAMENTIER, H. W.; MITCHUM, R. M. Jr.; VAIL, P. R.; SARG, J. F.; LOUITT, T. S.; HARDENBOL, J. (1988). «An overview of sequence stratigraphy and key definitions». A: WILGUS, C. K.; HASTINGS, B. S.; KENDALL, C.; POSAMENTIER, H. W.; ROSS, C. A.; WAGONER, J. C. van (ed.). *Sea level changes: An integrated approach*. Tulsa (Oklahoma): SEPM, p. 39-45. (SEPM. Special Publications; 42)
- WILGUS, C. K.; HASTINGS, B. S.; KENDALL, C.; POSAMENTIER, H. W.; ROSS, C. A.; WAGONER, J. C. van (ed.) (1988). *Sea level changes: An integrated approach*. Tulsa (Oklahoma): SEPM. (SEPM. Special Publications; 42)
- WILSON, J. T. (1966). «Did the Atlantic close and then re-open?» *Nature*, vol. 211, p. 676-681.

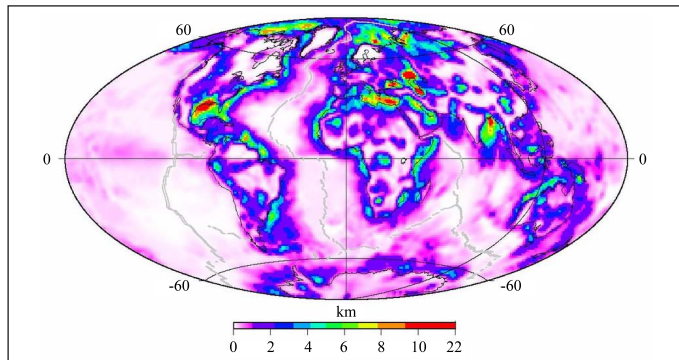


FIGURA 1. Les conques sedimentàries són regions de l'escorça terrestre dominades per la subsidència que genera l'espai disponible per a l'acumulació dels sediments que es transformaran en roques. La potència acumulada depèn d'aquest espai i de l'aportació i/o producció de sediments. El mapa global mostra que les espessors menors corresponen a algunes zones continentals i a les conques oceàniques actuals (colors rosat i blanc). Les conques amb més potència de sediments (més de quinze quilòmetres, en colors vermells) es troben al sud del mar Caspi i al sector occidental del golf de Mèxic. Les conques preserven el registre de bona part de la història de la interacció entre la litosfera, la hidrosfera i la biosfera. També contenen, entre altres recursos, la pràctica totalitat dels recursos energètics (carbó, petroli i gas natural) que han permès el desenvolupament de l'actual «economia del carboni». Compareu amb la figura 2 la distribució de les grans conques sedimentàries amb la de les plaques tectòniques.

FONT: <http://wattsgeophysics.co.uk/research/sedimentary-basins>.

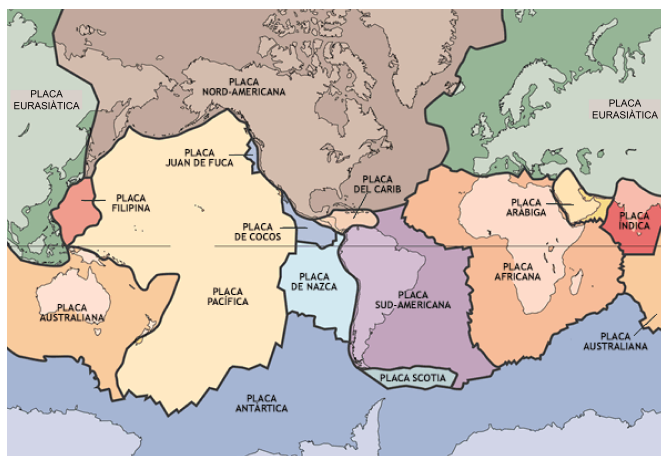


FIGURA 2. Les principals plaques tectòniques que integren l'escorça terrestre. Compareu amb la figura 1 la distribució de les plaques i els seus límits amb la de les grans conques sedimentàries.

FONT: https://ca.wikipedia.org/wiki/Placa_tect%C3%B2nica.

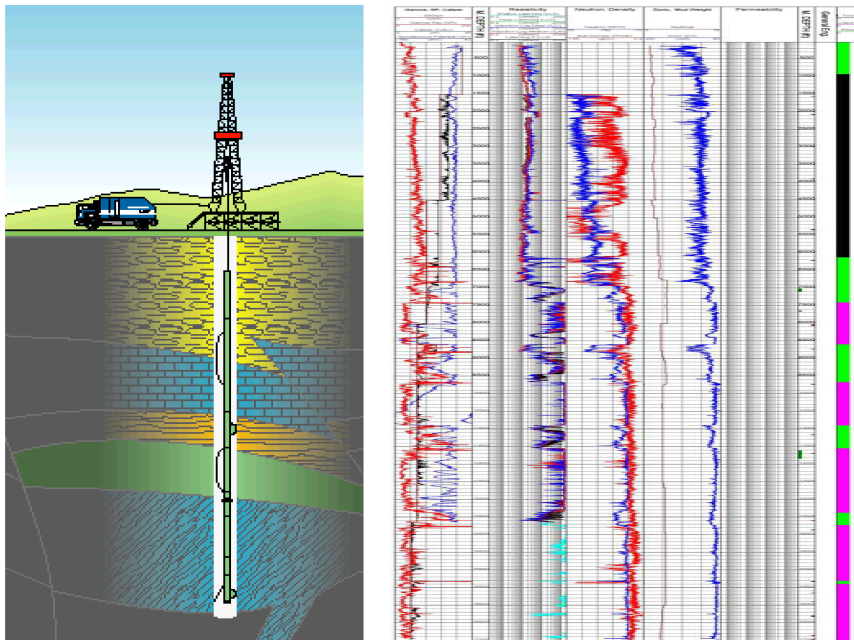


FIGURA 3. Exemples de registres geofísics obtinguts durant la perforació de sondeigs d'exploració del subsol.

FONT: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=11409674>.

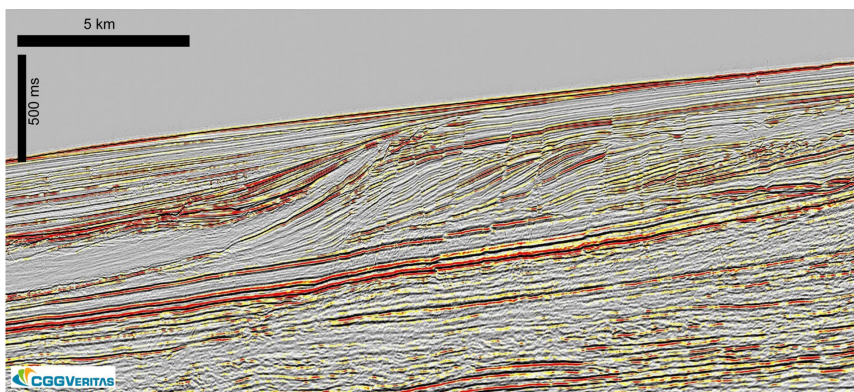


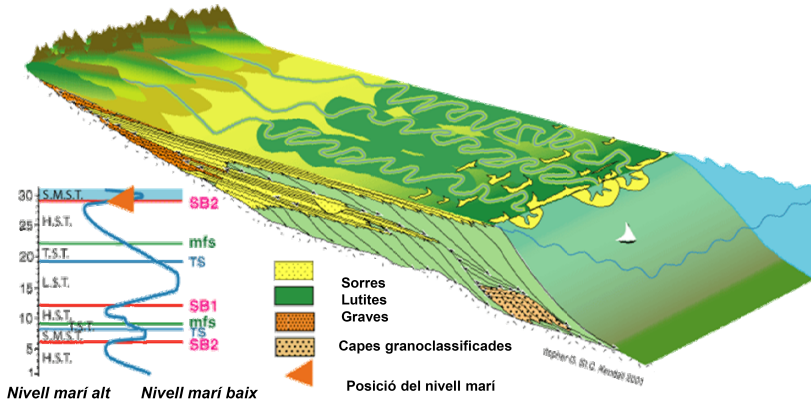
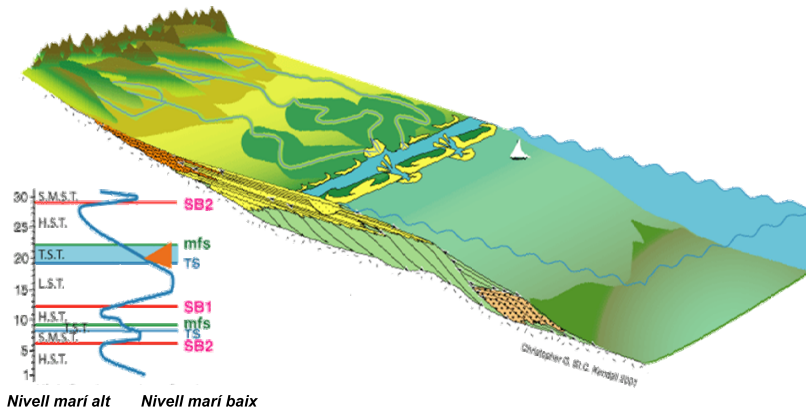
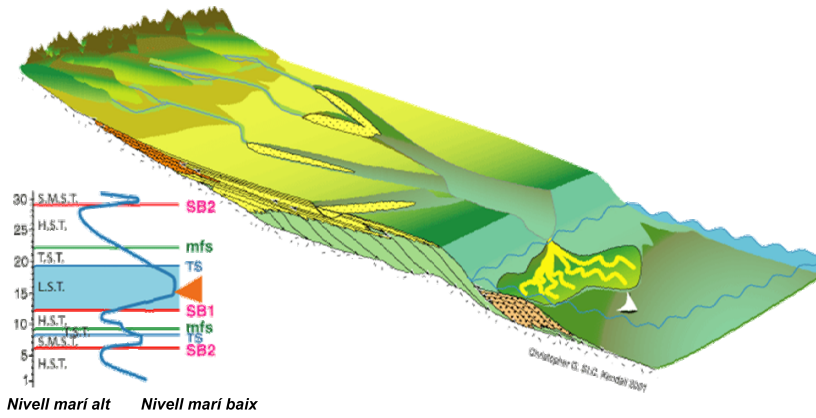
FIGURA 4. Perfil de sísmica de reflexió del marge continental de Namíbia (Àfrica occidental). La imatge, amb una escala vertical referida a temps doble d'emissió i captació de les ones reflectides, mostra la geometria a gran escala dels dipòsits formats al marge continental de Namíbia.

FONT: CGG VERITAS (<http://www.seismicatlas.org/uploaded/image/201309/21916a9a-2153-4ed2-9d89-5d005f5bdea5.jpg>).

FIGURA 5. Evolució de sistemes sedimentaris durant canvis successius del nivell relatiu del mar. De dalt a baix: configuracions de les associacions de sistemes sedimentaris de nivell marí relatiu baix, ascendent i alt. Els diversos sistemes continentals, de transició i marins, experimenten canvis en la seva distribució, i els dipòsits sedimentaris resultants s'organitzen de manera diferent en cada situació evolutiva.

NOTA: Tractes sedimentaris: HST, tracte de nivell marí alt; LST, tracte de nivell marí baix; SMST, tracte de marge de plataforma; TST, tracte transgressiu de nivell marí ascendent. Superfícies: MFS, superfície d'inundació màxima; SB1 i SB2, límits de seqüència tipus 1 i 2, respectivament; TS, superfície transgressiva.

FONT: Adaptat de Christopher G. St. Kendall (2001), *Sequence stratigraphy* (en línia). http://www.seddepeq.co.uk/SEQ_STRAT/Sequence_Stratigraphy/sequence_strat_basic.htm.



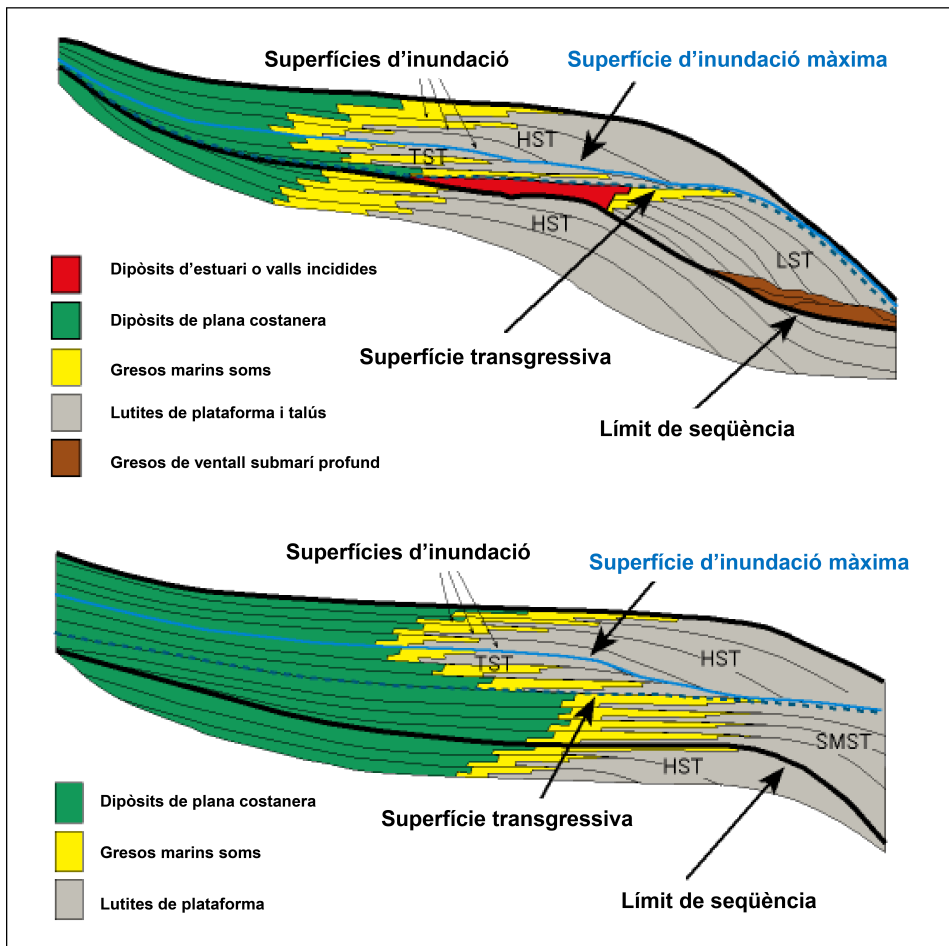


FIGURA 6. Els dos tipus de seqüències deposicionals. Part superior: seqüències de tipus 1 delimitades a la seva base per una superfície causada per una baixada molt accentuada del nivell marí relatiu, que se situa per sota del marge de la plataforma continental, en la seva transició cap al talús continental. En aquest cas es poden formar extenses superfícies erosives subaèries que afecten la plataforma continental. Part inferior: seqüències de tipus 2 delimitades a la seva base per una superfície causada per una baixada del nivell relatiu marí, que no arriba a situar-se per sota del marge de la plataforma continental. En aquest cas no es formen extenses superfícies erosives subaèries que afectin tota la plataforma continental.

NOTA: Tractes sedimentaris: HST, tracte de nivell marí alt; LST, tracte de nivell marí baix; SMST, tracte de marge de plataforma; TST, tracte transgressiu de nivell marí ascendent.

FONT: Adaptat de Wagoner *et al.* (1990), *UGA stratigraphy lab* (en línia). <https://strata.uga.edu/sequence/types.html>.

