



Universitat
de les Illes Balears

TREBALL FI DE GRAU

MODEL DE CAIXES PER SIMULAR LA CIRCULACIÓ TERMOHALINA DE LES DUES CONQUES DEL MAR MEDITERRANI

Pedro Moisés Pizà

Grau de Física

Facultat de Ciències

Any Acadèmic 2020-21

MODEL DE CAIXES PER SIMULAR LA CIRCULACIÓ TERMOHALINA DE LES DUES CONQUES DEL MAR MEDITERRANI

Pedro Moisés Pizà

Treball de Fi de Grau

Facultat de Ciències

Universitat de les Illes Balears

Any Acadèmic 2020-21

Paraules clau del treball:

Canvi climàtic, Mediterrània, Model de caixes, Circulació Termohalina

Nom Tutor/Tutora del Treball Damià Gomis Bosch

Nom Tutor/Tutora (si escau)

S'autoritza la Universitat a incloure aquest treball en el Repositori Institucional per a la seva consulta en accés obert i difusió en línia, amb finalitats exclusivament acadèmiques i d'investigació

Autor		Tutor	
Sí	No	Sí	No
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Índex

1. Introducció	1
1.1. Descripció de la mar Mediterrània.....	1
1.2. La circulació termohalina a la Mediterrània	3
1.3. Canvi climàtic	5
2. Objectius	7
2.1. Objectiu general.....	7
2.2. Objectiu específic	7
3. Metodologia	8
3.1. Model de caixes basat en l'estructura de masses d'aigua	8
3.2. Esquema amb els intercanvis de calor i sal que es consideren en el model	8
3.3. Equacions que resulten de l'esquema i la seva integració	9
3.4. Determinació dels valors de les constants	11
3.5. Descripció dels experiments que es duran a terme	15
3.5.1 <i>Comprovació de que partint d'una Mediterrània plena d'aigua Atlàntica, cada caixa evoluciona cap a valors d'equilibri correctes</i>	15
3.5.2 <i>Comprovació de que partint dels valors d'equilibri, aquest es manté constant.</i> 16	
3.5.3 <i>Variació dels forçaments principals per estudiar l'evolució a 100 anys</i>	16
3.5.4 <i>Mantenim constant els paràmetres a partir dels 100 anys per veure el temps de resposta de la Mediterrània de l'experiment 3.5.3</i>	17
4. Resultats	17
4.1. Resultats obtinguts dels experiments descrits a 3.5.1 i 3.5.2.....	17
4.2. Resultats obtinguts de l'experiment descrit a 3.5.3 per a les dues variants	18
4.3. Resultats obtinguts de l'experiment descrit a 3.5.4	23
5. Discussió	25
5.1. Discussió dels resultats dels experiments descrits a 3.5.1 i 3.5.2.....	25
5.2. Discussió dels resultats de l'experiment descrit a 3.5.3 per a les dues variants	26
5.3. Discussió dels resultats de l'experiment descrit a 3.5.4	28
6. Conclusions	28
7. Referències bibliogràfiques	29
Annex	30

Introducció

1.1. Descripció de la mar Mediterrània

La mar Mediterrània és una conca semitancada que connecta tres continents (Europa, Àsia i Àfrica) i que abasta un àrea d'aproximadament 2.5 milions de km². La seva amplada màxima és de 1600km entre les parts més allunyades i té una profunditat mitjana de 1500m (la fondària màxima és de 5.267 metres, a la fossa Calypso, en el mar Jònic). La seva morfologia es caracteritza per estar dividit en dues conques: l'occidental i l'oriental, connectades a través de l'estret de Sicília.



Figura 1. Representació de les dues conques amb la separació de l'estret de Sicília, extreta de MEDCLIC

Cadascuna de les conques es fracciona al seu torn en mars més petits. A la conca oriental:

- El mar Adriàtic: situat entre Itàlia i els Balcans, es comunica amb la zona més oberta del Mediterrani oriental per l'estret d'Otranto.
- El mar Egeu: es troba entre Grècia i Turquia i està separat de la part principal del mediterrani oriental mitjançant diversos estrets.
- El mar Jònic: entre el sud de la península itàlica i el sud-oest de la península balcànica: cap al nord comunica amb el Mar Adriàtic a través de l'estret d'Otranto.
- La conca Llevantina: situada a la part més oriental de la conca oriental, entre Turquia, Egipte i Orient Mitjà.

A la conca occidental:

- El mar d'Alboran: és la regió més occidental del mar Mediterrani i es connecta amb l'Oceà Atlàntic per l'estret de Gibraltar.
- La conca Algeriana: situada entre la costa d'Algèria, les illes Balears i Sardenya.
- El mar Balear: regió situada entre la costa oriental de la península Ibèrica i les illes Balears.
- La mar Tirrena: situada entre Còrcega i Sardenya i la península Itàlica.
- El mar Ligur: entre l'illa de Còrcega i el Golf de Gènova.



Figura 2. Visualització d'alguns dels mars més importants del mediterrani.

El mar mediterrani intercanvia aigua i calor amb l'Oceà Atlàntic a través de l'Estret de Gibraltar, que és la seva connexió amb els oceans globals. A més, també està connectat amb el mar Negre per l'estret de Bòsfor i amb la mar Roja pel Canal de Suez, tot i que l'intercanvi d'aigua amb la mar Roja és negligible. També intercanvia calor i aigua amb l'atmosfera, a través de la seva superfície, i dels continents rep l'aigua dels rius. Des del punt de vista climàtic, aquests són els forçaments fonaments: els fluxos de calor determinen el contingut de calor (i per tant la temperatura) de la conca, mentre els fluxos d'aigua (expressats com a fluxos de volum) determinen la salinitat de la conca. En el cas del Mediterrani, i considerant l'intercanvi amb el mar Negre com un riu més, podem escriure:

$$\frac{d\text{Calor}}{dt} = \text{fluxos superficials} + \text{flux per Gibraltar} \quad [1]$$

$$\frac{d\text{Salinitat}}{dt} = [\text{Evaporació} - \text{Precipitació} - \text{Rius}] (\text{EPR}) + \text{flux per Gibraltar} \quad [2]$$

En un estat d'equilibri els dos balanços han de ser nuls. En el cas del segon, es poden donar dues situacions diferents segons si el terme EPR es positiu o negatiu:

- S'anomena **conca de dilució** si la precipitació i l'aportació dels rius guanyen a l'evaporació. Això implica que hi ha d'haver un flux de sortida d'aigua cap a fora de la conca, del contrari el nivell del mar aniria pujant indefinidament. Però té una altra conseqüència: mentre que l'aigua de precipitació i rius és dolça, la que surt de la conca és salada, i per tant això faria que la salinitat disminuís contínuament. Això no és així perquè l'estat d'equilibri real al qual s'arriba és un flux de sortida a les capes altes i un flux d'entrada a sota. El flux net segueix essent de sortida, per compensar el fet que EPR és negatiu, però això permet que la salinitat es mantingui constant. La raó és que malgrat surt més aigua de la que entra, la salinitat (en kg de sal/m³ per exemple) de l'aigua que entra és més elevada que la salinitat de l'aigua que surt, i el balanç de sal és nul. L'estat d'equilibri és per tant una conca amb una salinitat inferior als contorns, però constant. Es el cas del mar Bàltic, per exemple, o de les ries gallegues.

- S'anomena **conca de concentració** si l'evaporació és superior a la suma de la precipitació i l'aportació dels rius, com passa a la Mediterrània. Si el Mediterrani fos un mar tancat, el nivell del mar disminuiria de manera continuada (uns 60-65 cm/any). Si això no passa és perquè hi ha un flux d'entrada net d'aigua Atlàntica que compensa el dèficit. Fent la conversió pertinent, els 60-65 cm/any multiplicats per l'àrea de la conca donen un flux de l'ordre de 0.05 Sv ($1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$). Aplicant el mateix raonament que a l'apartat anterior, mentre que l'aigua que s'evapora en excés és dolça (la sal queda al mar), la que entra a la conca per Gibraltar és salada, i per tant si només hi hagués un flux d'entrada la salinitat augmentaria contínuament. Això no és així perquè per sota de l'aigua que entra per les capes altes (que és de l'ordre de 0.85 Sv) hi ha un flux de sortida (de l'ordre de 0.80 Sv). El flux net segueix essent 0.05 Sv d'entrada, per compensar el fet que EPR és positiu, però això permet que la salinitat es mantingui constant. La raó és que malgrat entra més aigua de la que surt, la salinitat de l'aigua que surt és més elevada que la salinitat de l'aigua que entra, i el balanç de sal és nul. L'estat d'equilibri és per tant un estat de salinitat superior als contorns, que es un dels fets distintius del Mediterrani.

Si algun dels termes de la dreta de [1] ó [2] varia per alguna causa, aleshores es romp l'equilibri i el sistema evolucionarà cap a un nou estat d'equilibri. En el cas de [2], però, suposarem una restricció important: que $[d\text{Volum}/dt]$ és nul, fins i tot fora de l'equilibri. És a dir, suposarem que si EPR varia, també ho fa el flux de volum net a través de Gibraltar, del contrari tindríem un nivell del mar més alt o més baix que a l'Atlàntic, i això és impossible (estam negligint aquí factors externs a la conca, com el desgel dels pols). El que si variarà, però, és la salinitat, perquè si EPR es fa més positiu, per exemple, i substituïm el dèficit extra (d'aigua dolça) per aigua Atlàntica (salada), la salinitat de la conca augmentarà. Ho farà fins que s'arribi a un nou estat d'equilibri en que l'aigua que surt per sota a Gibraltar transporti més sal que abans i compensi el desequilibri originat.

Els aspectes descrits fins ara representen el Mediterrani com si fos una massa d'aigua homogènia, però la realitat és bastant més complexa. En una primera visió simplificada, es pot dir que la Mediterrània consta de diverses masses d'aigua: una capa superficial d'aigua Atlàntica (que es va modificant a mesura que penetra dins la conca) i una capa intermèdia i una fonda d'aigües transformades. La capa superficial intercanvia aigua i calor amb l'atmosfera, però també hi ha intercanvis amb les capes intermèdia i fonda. És el que s'anomena "circulació termohalina", que es descriurà a continuació (*Ballabrera, 2009*).

1.2. La circulació termohalina a la Mediterrània

Els mars i oceans tenen una estructura vertical en capes i corrents que són, essencialment horitzontals. Aquests corrents tot i que la seva velocitat és molt més petita que la dels vents, transporten una quantitat de calor del mateix ordre que aquests. Això és degut a que la densitat de l'aigua és mil vegades superior a la de l'aire i també la seva capacitat calorífica és més elevada. Els corrents marins també transporten sal, i ho fan de tal manera que a l'interior de l'oceà els intercanvis són molt lents (també en el cas de la temperatura, però menys). Aquesta conservació de la salinitat i temperatura al llarg de molt de temps fa que el concepte de 'massa d'aigua' (aigua amb una temperatura i salinitat determinades) sigui especialment rellevant en oceanografia.

Les causes de que els intercanvis de calor i sal siguin lents són: i) *L'alta capacitat calorífica* fa que, per a que un corrent d'aigua variï la seva temperatura durant el seu recorregut, ha

d'intercanviar quantitats de calor importants amb l'entorn; ii) *El baix coeficient de difusió molecular*, tan per a la temperatura com per a la sal. De fet, els intercanvis difusius a escala molecular són negligibles enfront de la *difusió turbulenta*, que tampoc és molt gran si les velocitats dels corrents no ho són. Per tant, a l'interior dels oceans els intercanvis de calor i de sal entre capes o entre regions provenen fonamentalment dels intercanvis d'aigua (és a dir, de la calor i la sal que transporta l'aigua intercanviada). Evidentment els intercanvis superficials són una excepció, en el sentit que hi ha intercanvis de calor importants no lligats a intercanvis d'aigua, sinó a la radiació, al calor sensible i al calor latent). En el cas de la salinitat, els oceans intercanvien aigua amb l'atmosfera, però no sal.

En el cas del mar Mediterrani, tot i ésser de dimensions reduïdes, s'hi donen molts dels processos dinàmics oceànics rellevants del clima global, com el fet de tenir una circulació termohalina a escala de conca, amb formació d'aigua fonda i transformació d'aigües a diferents indrets (Ballabrera, 2009). Aquesta circulació es resumeix a continuació, capa a capa.

- *La capa més superficial* arriba més a o menys fins als 150m de profunditat. Degut a que al llarg del seu recorregut cap a l'est l'evaporació guanya a la pluja i els rius, la seva salinitat augmenta d'oest cap a est fins a arribar a la conca Llevantina, on la concentració de sal és màxima (tot i que gràcies al mar Negre la salinitat es redueix un poc). Mentre les aigües que entren per Gibraltar tenen una salinitat de l'ordre de 36-36.5, a la conca occidental de la mediterrània el valor ja està al voltant de 37.2 i a la part oriental és de 38.7. Cal dir aquí que les unitats de salinitat que s'empren realment en oceanografia són kg de sal/1000kg d'aigua (que no és exactament el mateix que kg de sal/m³). Atès que es tracta d'unitats de massa dividit per unitats de massa, es va acordar considerar-la com a adimensional, i per tant no es solen posar unitats als valors.

Pel que fa a les temperatures superficials, hi ha una semblança amb la salinitat: mentre a la part occidental es d'aproximadament 16.5°, a l'oriental és de 17.3°. Tot i així, en conjunt el mar Mediterrani cedeix més calor a l'atmosfera de la que rep: de l'ordre de 5 W/m² de mitjana espacial. Aquesta pèrdua de calor és compensada pel calor que entra per l'estret de Gibraltar. El que passa, en aquest cas, és que el flux d'entrada transporta més calor que el de sortida.

- *La capa intermèdia*: considerades les aigües amb major salinitat del mediterrani, es troben entre els 150 i els 600 metres aproximadament. Aquestes aigües adquireixen la seva temperatura i salinitat a la conca oriental, quan a l'hivern, els forts vents del nord, que són freds i secs, indueixen una evaporació molt marcada (augmentant la salinitat i la pèrdua de calor latent) i un refredament també important (pèrdua de calor sensible). Això provoca un augment de la densitat que fa que l'aigua superficial s'enfonsi fins a nivells intermedis, atès que la densitat no augmenta tant com per baixar fins a nivells fonsos. Aquest procés es dona al sud d'Anatòlia, i la massa d'aigua que es forma es denomina Aigua Intermèdia Llevantina (LIW). Una vegada formada, la LIW es desplaça fins a la conca occidental perdent un poc de salinitat al llarg del seu recorregut, per acabar sortint, en part, per l'estret de Gibraltar. Els valors de la salinitat d'aquesta capa, a la conca occidental és de 38.5 aproximadament, mentre a la conca oriental, on es forma, és de 38.9. Pel que fa a la temperatura, a la conca occidental i oriental prenen uns valors al voltant de 13.7° i 14.6°, respectivament.

- *La capa fonda*: formada de manera independent a les conques occidental i oriental, és la que ocupa els nivells per davall dels 600m). Durant l'hivern, els vents freds i secs continentals provoquen una evaporació molt que produeix un augment de la salinitat. En tractar-se de

vents freds, també es produeix un refredament de la capa superficial. Tot plegat fa que la densitat augmenti prou com per enfonsar l'aigua superficial fins als nivells més fondos.

Les zones de formació d'aigua fonda són: el golf de Lleó a la conca occidental, i el mar Adriàtic a la conca oriental (excepcionalment, quant hi ha hiverns molt freds, també s'ha format aigua fonda al mar Egeu) (Ballabrera, 2009). Aquestes aigües fondes queden estancades, sense que hi pugui haver intercanvis entre les conques occidental i oriental, perquè es troben per davall de la màxima profunditat de l'estret de Sicília. La temperatura i la salinitat de la capa fonda tenen uns valors aproximats de 13.1° i 38.3° respectivament a la conca occidental, mentre que a la conca oriental són de 14° i 38.81, aproximadament.

1.3. Canvi climàtic

El canvi climàtic es un tema d'actualitat que desperta un interès especial en l'opinió pública. Els canvis són de fet una característica pròpia del sistema climàtic, que està en evolució constant en resposta als canvis que es produeixen en els forçaments del sistema. Poden ser deguts a processos naturals, com erupcions volcàniques o els cicles solars. Però els canvis observats a dia d'avui tenen un origen antropogènic. En els darrers 50 anys, especialment, s'està produint un ràpid escalfament global com a conseqüència de l'activitat humana (Zúñiga-López i Crespo del Arco, 2010).

Per a l'estudi del canvi climàtic, el Mediterrani es comporta com un laboratori natural, atès que s'hi donen una bona part dels processos que també es donen a escala global. Els principals factors de canvi en el cas del mar Mediterrani són: i) *L'intercanvi de calor amb l'atmosfera*: si l'atmosfera s'escalfa primer, degut a la major inèrcia dels oceans, això modificarà els intercanvis de calor superficials amb el mar; ii) *L'evaporació i la precipitació*: l'escalfament de l'atmosfera té com a conseqüència un augment de l'evaporació a escala global. Pel que fa a pluges i rius, les projeccions climàtiques mostren que a la regió disminuiran, augmentant així el dèficit hídric de la conca (Vargas-Yáñez et al., 2007).

Tot plegat fa que s'esperin canvis en la circulació termohalina i en les temperatures i salinitats de les capes descrites anteriorment. Per analitzar el canvi climàtic, una eina fonamental són els models numèrics. Els canvis en els principals forçaments del Mediterrani que indiquen els models climàtics atmosfèrics es quantifiquen a continuació; la informació s'ha obtingut de l'article publicat per Adloff et al. (2015).

Pel que fa al terme EPR (Evaporació-Precipitació-Rius), la Taula 1 mostra com variarien els valors des de l'actualitat fins a escenaris futurs (a 100 anys). Pel que fa als valors actuals, s'han tret de dues bases de dades distintes, anomenades de forma abreujada com HIS i HIS-F (veure Adloff et al., 2015), per a més detalls). Hi ha una certa diferència entre les dues: una dona un balanç total de 1.78 m/dia (65 cm/any) mentre que l'altre dóna 1.59 mm/dia (58 cm/any). Aquesta diferència és de l'ordre d'un 11% i no ha de preocupar, atesa la incertesa que hi ha en altres magnituds.

Respecte a escenaris futurs, es donen dades per a dos escenaris SRES (basats en emissions): l'A1B i l'A2-F. Mentre el primer pressuposa una contenció moderada de les emissions, l'A2 pressuposa que no s'aconsegueix limitar-les i segueixen creixent. En la nova nomenclatura dels escenaris, basada en concentracions, l'A1B seria equivalent al RCP6.0 i l'A2-F seria equivalent al RCP8.5. El que mostren els resultats és un increment de l'evaporació i una disminució de la precipitació i aportacions dels rius i del Mar Negre. Per tant, el que s'espera

és un increment significatiu del dèficit hídric, que seria de +0.82 mm/dia en el cas de l'escenari A1B i de +0.96 mm/dia en el cas de l'escenari A2-F.

En aquest treball es partirà dels valors actuals obtinguts de la base de dades HIS. Respecte a aquests valors, al cap de 100 anys l'increment del dèficit hídric de la conca seria del 46% i del 53% sota els escenaris A1B i A2-F, respectivament. Aquí considerarem com a valor futur un augment del 50% (és a dir, entremig dels valors dels escenaris). A la *Taula 2* es mostren resumits els valors totals actuals i futurs d'EPR, però ara expressats en Sv i per conques.

(mm/dia)	E	P	E-P	R	B	Corr	Total (EPR)
Valors actuals [HIS]			2.48	0.22	0.28	0.20	1.78
Valors actuals [HIS-F]	3.94	1.70	2.24	0.22	0.28	0.15	1.59
Incrementos futurs [A1B]	+0.41	-0.16	+0.60	-0.07	-0.15	0.00	+0.82
Incrementos futurs [A2-F]	+0.49	-0.20	+0.73	-0.06	-0.17	0.00	+0.96

Taula 1. Valors actuals de les variables Evaporació (E), Precipitació (P), Evaporació menys Precipitació (E-P), aportació de rius (R) i del mar Negre (B) en mm/dia, obtinguts a partir de dues bases de dades diferents (HIS i HIS-F, ambdues basades en el període 1961-1990). El terme Corr és una correcció que es fa a posteriori al balanç total (veure Adloff et al., 2015, per a més detalls). Es mostren també els increments de cada variable prevists al cap de 100 anys (mitjanes del període 2070-2099) sota dos escenaris climàtics diferents.

(Sv)	Conca W	Conca E	Total (EPR)
Valors actuals [HIS]	0.010	0.040	0.050 (1.78mm/dia)
Valors futurs emprats aquí	0.015	0.060	0.075 (2.67mm/dia)

Taula 2. Valors actuals i futurs (al cap de 100 anys) del terme EPR (en Sv) emprats en aquest treball, per a cada conca i pel conjunt del Mediterrani.

Pel que fa als fluxos de calor superficial, ja s'ha dit que el seu valor actual és d'aproximadament 5W/m². En la metodologia que s'emprarà més endavant es treballarà amb fluxos absoluts entre capes, no per unitat d'àrea. A més, i per fer-ho més senzill, es dividiran els fluxos de calor per la capacitat calorífica de 1 m³ d'aigua, de tal manera que els fluxos de calor quedaran expressats en Sv°C. Per passar d'un sistema a l'altre s'ha de fer:

$$\text{SHF}(\text{W/m}^2) \cdot \text{Àrea}(\text{m}^2) / [\rho(\text{kg/m}^3) \cdot C_v(\text{J/Kg}^\circ\text{C})] =$$

$$= (5.0\text{W/m}^2) \cdot (2.5 \cdot 10^{12}\text{m}^2) / [(1027 \text{ kg/m}^3) \cdot (4180 \text{ J/Kg}^\circ\text{C})] = 2.75 \cdot 10^6 (\text{m}^3/\text{s})^\circ\text{C} = 2.75 \text{ Sv}^\circ\text{C}$$

D'aquest total, els fluxos corresponents a la conca occidental i a la conca oriental són 0.30 Sv°C i 2.45 Sv°C, respectivament. Pel que fa als valors futurs, Adloff et al. (2015) mostren una reducció de -1W/m² sota l'escenari A1B i de -2.5 W/m² sota l'escenari A2-F. De tota manera, altres models mostren reduccions més dràstiques, concretament que els fluxos de calor superficials tendrien a ser nuls a finals d'aquest segle. Aquesta és la hipòtesi amb que es treballarà aquí, tot i que també es farà algun experiment amb els valors d'Adloff et al. (2015) per comparar. La *Taula 3* resumeix tots els valors exposats aquí.

(Sv°C)	Conca W	Conca E	Total
Valors actuals [HIS]	+0.30	+2.45	+2.75
Valors futurs [A1B]	+0.03	+2.17	+2.20
Valors futurs [A2-F]	- 0.39	+1.76	+1.37
Valors futurs emprats aquí	0.0	0.0	0.0

Taula 3. Fluxos de calor superficial (en Sv°C) per a cada conca i per el conjunt del Mediterrani. Es mostren els valors actuals, els futurs (al cap de 100 anys) emprats per Adloff et al. (2015) i els que s'empraran aquí en primera instància (tot i que també es mostraran resultats amb els anteriors). El signe positiu indica flux de calor del mar cap a l'atmosfera.

1. Objectius

2.1. Objectiu general

L'objectiu principal és entendre com funciona el clima marí del Mediterrani, visualitzant la relació que hi ha entre els forçaments principals (el terme EPR, els fluxos de calor superficials i el transport de volum, calor i sal a través de Gibraltar) i la temperatura i salinitat d'equilibri. L'exercici es farà en el context actual de canvi climàtic; per això s'estudiarà l'evolució de la Mediterrània sota els canvis previstos en els forçaments. Concretament, es realitzaran diversos experiments per entendre el paper que juga cadascun dels distints forçaments i les conseqüències dels seus canvis, visualitzats de manera específica en l'evolució de la temperatura i la salinitat de la conca. No només interessin els valors de les noves temperatures i salinitats, sinó també altres aspectes com la rapidesa de la seva evolució o saber què passaria si s'arribessin a estabilitzar els forçaments.

2.2. Objectiu específic

Dur a terme tots els experiments previstos emprant un model numèric de circulació cau fora de l'abast d'un TFG. Per això, com a objectiu específic, es pretén aprendre a emprar un model de caixes, com una alternativa més simple que els models numèrics. Un model de caixes consisteix bàsicament en fer una divisió de la Mediterrània en diverses parts (caixes) de tal manera que dintre de cada caixa la temperatura i la salinitat es consideraren homogènies. El model considera fluxos de calor i d'aigua entre caixes adjacents, amb l'atmosfera i amb l'Oceà Atlàntic a través de Gibraltar. La gran avantatge dels models de caixes és que són molt econòmics des del punt de vista computacional, i per tant permeten dur a terme molts d'experiments a un cost molt baix. A més, permeten un seguiment conceptual molt entenedor dels processos que tenen lloc. La principal desavantatge, òbviament, és que són una visió molt simplificada de la realitat.

En aquest treball es dividirà la Mediterrània en les seves dues conques, cadascuna de les quals estarà dividida en 3 caixes segons la profunditat. Així tindrem un total de 6 compartiments, i per a cadascun d'ells es plantejaran les equacions d'evolució per a la temperatura i la salinitat. Les equacions s'integraran numèricament mitjançant un codi simple que donarà en tot moment l'evolució de cada magnitud, una vegada prescrits els forçaments i una sèrie de paràmetres que governen la circulació termohalina. Els detalls de tot plegat es donen a la secció següent.

2. Metodologia

3.1. Model de caixes basat en l'estructura de masses d'aigua

El model de caixes, com s'ha mencionat anteriorment, és un mètode que ens ajuda d'una manera més simple que els models numèrics a estudiar la Mediterrània. Aquí s'emprarà per predir l'evolució de calor i sal dintre de les dues conques; per a això, es dividirà cada conca (oest i est) en 3 caixes segons la seva profunditat. En base a les masses d'aigua definides a la introducció, la primera caixa anirà de de la superfície fins els 150m de profunditat (capa superficial), la segona abastarà des de els 150m fins els 600m (capa intermèdia) i per últim la tercera caixa anirà dels 600m fins els 1500m (capa fonda). Es podria fer una anàlisi més exhaustiva augmentant el número de caixes com a *Llasses et al. (2016)*, que enlloc de dividir la Mediterrània en 3 capes verticals ho fan amb 4; la única diferència respecte al nostre model, però, és que la capa fonda la divideixen en dues caixes: una des dels 600m fins als 1000 m i l'altre des dels 1000 m fins al fons.

La idea de la divisió plantejada és que la caixa 1 està composta principalment d'aigua atlàntica modificada, la caixa 2 d'aigües intermèdies Llevantines i aigües intermèdies d'hivern, i la caixa 3 (caixes 3 i 4 en el cas de *Llasses et al. 2016*) d'aigües fondes on els seus canvis son deguts a formació d'aigua densa. Les dues conques només es comuniquen mitjançant les dues primeres caixes a través de l'estret de Sicília, entre les capes fondes no hi ha intercanvis directes.

Per tal de simular l'evolució de la temperatura i salinitat, el model de caixes considera com a forçaments els fluxos de calor i d'aigua amb l'atmosfera i amb l'Oceà Atlàntic a través de l'estret de Gibraltar. A part, hi ha els intercanvis entre caixes: els verticals i el fluxos entre les dues conques a través de l'estret de Sicília. Per aconseguir que el nostre model s'adapti al màxim a la realitat, s'agafaran els valors reals dels forçaments; just amb aquests valors ja es podrà mostrar una de les característiques principals del Mediterrani, que és el fet de ser una conca de concentració. Tots els intercanvis s'expliquen millor a continuació.

3.2. Esquema amb els intercanvis de calor i sal que es consideren en el model

La Fig.3 mostra un esquema de tots els intercanvis considerats. Per entendre millor aquest esquema cal entrar una mica en detall en les variables que hi figuren:

- En primer lloc, els intercanvis d'aigua i de calor que tenen lloc entre la capa superficial del mar i l'atmosfera (EPR i SHF de cada conca, respectivament). La pèrdua neta d'aigua a la conca est (EPR_e) justifica els intercanvis d'aigua a través de l'estret de Sicília (FS₁ i FS₂, amb FS₁ > FS₂), mentre que la pèrdua d'aigua total (EPR_o + EPR_e) justifica els intercanvis d'aigua per Gibraltar (FG₁ i FG₂, amb FG₁ > FG₂).
- La formació d'aigües intermèdies a la conca est es un procés degut sobretot a la forta evaporació i un cert refredament de la capa superficial, que cedeix així aigua a la intermèdia. Considerarem que la temperatura de l'aigua que baixa (T_{12,e}) és més baixa que la mitjana de la capa superficial, mentre que la salinitat és més elevada. A la conca oest el procés és al contrari: hi ha un flux de la capa intermèdia a la superficial per tal de conservar el volum d'aquesta capa.

- La formació d'aigua fonda (de les dues conques) es modelitza com un flux que va de les capes superficials a les fondes. La temperatura de l'aigua que baixa és inferior a la mitjana de la capa superficial, mentre que la salinitat és més elevada que la mitjana de la capa superficial. Si les capes fondes guanyen aigua, hi ha d'haver un flux de les capes de fons cap a les intermèdies, ja que si no fos així no es podria conservar el volum de les capes de fons.

- Sobre els intercanvis turbulents entre capes, cal destacar que es tracta d'una mescla turbulenta i no de viscositat molecular: és per això que les constants seran les mateixes per a temperatura i salinitat. En una aproximació simple, s'ha suposat que els intercanvis de calor i sal per mescla turbulenta són proporcionals a la diferència de temperatura i salinitat entre les capes. En principi la turbulència no és la mateixa a 150m que als 600m, ni té perquè ser la mateixa a les dues conques; dels valors de les constants de mescla (i de tota la resta de constants que apareixen a l'esquema) se'n parlarà a la secció 3.4.

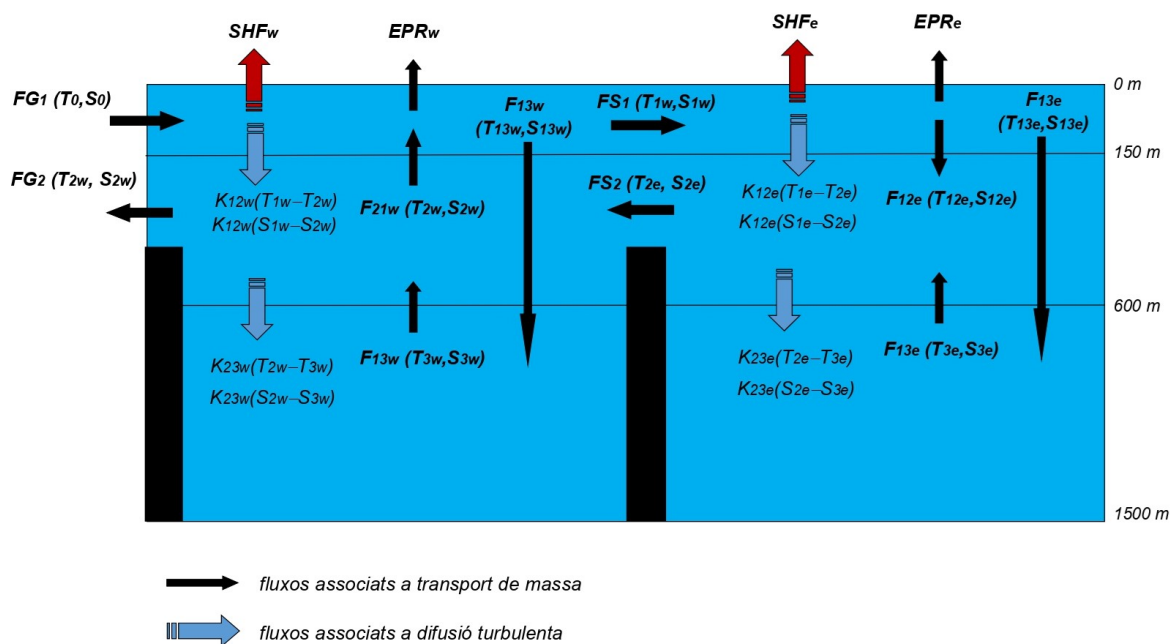


Figura 3. Esquema del model de 6 caixes. Les variables que hi figuren són: FG_1 i FG_2 : fluxos d'aigua entre l'Oceà Atlàntic i la Mediterrània per l'estret de Gibraltar; FS_1 i FS_2 : fluxos d'aigua entre les dues conques per l'estret de Sicília; F_{21} , F_{13} , F_{12} , F_{13} : fluxos verticals d'aigua entre capes; K_{12} , K_{23} : fluxos de difusió turbulenta; EPR : evaporació-precipitació-aportacions de rius; SHF : fluxos de calor oceà-atmosfera; T_0 , S_0 : temperatura i salinitat de l'Oceà Atlàntic; T_1 , S_1 , T_2 , S_2 ,...: temperatura i salinitat de cada capa; T_{13} , S_{13} , T_{12} , S_{12} : temperatura i salinitat de la formació d'aigües fondes i intermèdies.

3.3. Equacions que resulten de l'esquema i la seva integració

L'esquema del model descrit a la secció anterior permet estudiar l'evolució de la temperatura i la salinitat a partir de les equacions de balanç plantejades per a cadascuna de les caixes de l'esquema. Resulten així un total de 12 equacions (6 per a la temperatura i 6 per a la salinitat). Les equacions de temperatura són realment equacions del balanç de calor dividides per ρC_v (on ρ es la densitat de l'aigua i c la capacitat calorífica).

Les equacions de la temperatura i de la salinitat per a la conca oest són:

$$V_{1,o} \frac{dT_{1,o}}{dt} = FG_1 T_o - K_{12,o}(T_{1,o} - T_{2,o}) + F_{12} T_{2,o} - F_{13} T_{13,o} - (SHF)_o - FS_1 T_{1,o} \quad [3]$$

$$V_{2,o} \frac{dT_{2,o}}{dt} = K_{12,o}(T_{1,o} - T_{2,o}) - F_{12} T_{2,o} + F_{13} T_{3,o} - K_{23,o}(T_{2,o} - T_{3,o}) - FG_2 T_{2,o} + FS_2 T_{2,e} \quad [4]$$

$$V_{3,o} \frac{dT_{3,o}}{dt} = K_{23,o}(T_{2,o} - T_{3,o}) + F_{13} T_{13,o} - F_{13} T_{3,o} \quad [5]$$

$$V_{1,o} \frac{dS_{1,o}}{dt} = FG_1 S_o + K_{12,o}(S_{2,o} - S_{1,o}) + F_{12} S_{2,o} - FS_1 S_{1,o} - F_{13} S_{13,o} \quad [6]$$

$$V_{2,o} \frac{dS_{2,o}}{dt} = F_{13} S_{3,o} + K_{23,o}(S_{3,o} - S_{2,o}) - F_{12} S_{2,o} - FG_2 \cdot S_{2,o} - K_{12,o} \cdot (S_{2,o} - S_{1,o}) + FS_2 \cdot S_{2,e} \quad [7]$$

$$V_{3,o} \frac{dS_{3,o}}{dt} = F_{13} \cdot S_{13,o} - K_{23}(S_{3,o} - S_{2,o}) - F_{13} \cdot S_{3,o} \quad [8]$$

Pel que fa a la conca est:

$$V_{1,e} \frac{dT_{1,e}}{dt} = FS_1 T_{1,o} - K_{12,e}(T_{1,e} - T_{2,e}) - F_{12} T_{12,e} - F_{13,e} - (SHF)_e \quad [9]$$

$$V_{2,e} \frac{dT_{2,e}}{dt} = K_{12,e}(T_{1,e} - T_{2,e}) + F_{12} T_{12,e} + F_{13} T_{3,e} - K_{23,e}(T_{2,e} - T_{3,e}) - FS_2 T_{2,e} \quad [10]$$

$$V_{3,e} \frac{dT_{3,e}}{dt} = K_{23,e}(T_{2,e} - T_{3,e}) + F_{13} T_{13,e} - F_{13} T_{3,o} \quad [11]$$

$$V_{1,e} \frac{dS_{1,e}}{dt} = FS_1 S_{1,o} + K_{12,e}(S_{2,e} - S_{1,e}) - F_{12} S_{12,e} - F_{13} S_{13,e} \quad [12]$$

$$V_{2,e} \frac{dS_{2,e}}{dt} = F_{12} S_{12,e} + K_{23,e}(S_{3,e} - S_{2,e}) + F_{13} S_{3,e} - K_{12,e}(S_{2,e} - S_{1,e}) - FS_2 S_{2,e} \quad [13]$$

$$V_{3,e} \frac{dS_{3,e}}{dt} = F_{13} S_{13,e} - K_{23}(S_{3,e} - S_{2,e}) - F_{13} S_{3,e} \quad [14]$$

Per poder obtenir l'evolució de la temperatura i la salinitat a partir de les equacions anteriors, s'ha desenvolupat un codi Python. Les equacions són molt fàcils d'integrar i amb l'únic que s'ha de tenir cura és amb la consistència de les unitats. Pel que fa al pas de temps, s'ha triat fer-lo en mesos; per tant quan, es mostri una evolució de 100 anys, per exemple, serà el resultat de 1200 iteracions, mentre que per a evolucions de 1000 anys seran 12000 iteracions.

Pel que fa als forçaments, quan aquests siguin variables en el temps es considerarà una evolució lineal entre els valors inicials i finals (veure Taules 2 i 3). Per tant, l'increment que s'ha d'afegir als forçaments a cada pas de temps s'obté simplement restant el valor inicial del final i dividint pel nombre d'interaccions.

3.4. Determinació dels valors de les constants

Apart de les temperatures i salinitats de cada capa, que són les variables que es volen obtenir, a les equacions plantejades a la secció anterior hi ha una sèrie de paràmetres que s'han de determinar prèviament. Aquests paràmetres es poden classificar de la manera següent. En primer lloc, els forçaments externs:

- Els intercanvis d'aigua amb l'atmosfera i l'Atlàntic, que han de ser idèntics. Les pèrdues d'aigua amb l'atmosfera (el balanç de l'evaporació menys les aportacions de pluja, rius i mar Negre) que ja s'han exposat anteriorment a la *Taula 2*: 0.01sv a la conca occidental i 0.04Sv a l'oriental. Aquests valors determinen que el flux net d'aigua ha de fer de 0.05Sv a l'estret de Gibraltar i de 0.04 Sv a l'estret de Sicília. En el primer cas ja s'ha dit que el que hi ha és un flux d'entrada d'uns 0.85 Sv (FG₁ a l'esquema de la *Fig.3*) i un de sortida de 0.80 Sv (FG₂ a la mateixa figura). Per a l'estret de Sicília, els valors que donen *Adloff et al. (2015)* són de 0.95 Sv(FS₁) i 0.91 Sv(FS₂). Aquests valors es consideraran constants mentre no canviï el balanç EPR.
- Els intercanvis de calor amb l'atmosfera i l'Atlàntic, que també han de ser idèntics en situació d'equilibri. Les pèrdues de calor amb l'atmosfera també s'han exposat ja a la *Taula 3*: 0.30Sv°C a la conca occidental i 2.45Sv°C a l'oriental. Aquests valors determinen que el flux net de calor ha de ser de 2.75Sv°C a l'estret de Gibraltar i de 2.45Sv°C a l'estret de Sicília.

Els forçaments externs determinen una sèrie de relacions que s'han de complir en una situació d'equilibri:

$$FG_1S_o - FG_2S_{2,o} = 0 \quad [15]$$

$$FS_1S_{1,o} - FS_2T_{2,e} = 0 \quad [16]$$

$$FG_1T_o - FG_2T_{2,o} = 2.75Sv^\circ C \quad [17]$$

$$FS_1T_{1,o} - FS_2T_{2,e} = 2.45Sv^\circ C \quad [18]$$

Per tant, coneixent les T,S d'equilibri de cada capa, queden determinades T_o, S_o, que també suposarem constants de moment. Les T,S d'equilibri (els valors actuals) les podem treure de la bibliografia. Per exemple de *Llasses et al. (2016)*, que les van determinar a partir de tot un conjunt de models numèrics per a un període comú a tots ells (1980-2000). Les dades que *Llasses et al. (2016)* exposen a la seva Taula 2 es mostren aquí a la *Taula 4*. Emprant aquests valors a les equacions anterior, s'obté que la temperatura i salinitat de les aigües Atlàntiques entrants han de ser aproximadament T_o=16.13°C i S_o=36.24.

Conca:	Occidental			Oriental		
Capa (m):	0-150	150-600	600-1500	0-150	150-600	600-1500
Temperatura (°C)	15.4 ± 0.9	13.7 ± 0.7	13.2 ± 0.6	17.0 ± 1.3	14.6 ± 0.8	13.8 ± 0.6
Salinitat	37.8 ± 0.4	38.5 ± 0.2	38.6 ± 0.1	38.7 ± 0.5	38.9 ± 0.3	38.8 ± 0.1

Taula 4. Valors mitjans de T,S i la seva dispersió (la del conjunt de models numèrics emprats) a cadascuna de les caixes, extrets de *Llasses et al. (2016)*. Els valors de la caixa 600-1500m s'han obtingut ponderant (pel seu volum) els valors de les caixes 3 (600-1000m) i 4 (1000-1500m) de *Llasses et al. (2016)*.

Encara queden per determinar les constants que intervenen en els fluxos entre caixes. Per fer-ho es podria recórrer als càlculs de *Llasses et al. (2016)*, que van determinar també els fluxos de calor i sal entre els distints compartiments i que es reproduïxen aquí a la *Fig.4*. Hi ha dos inconvenients, però, en fer-ho d'aquesta manera. Per una banda, la gran dispersió que mostren els resultats; la dispersió ja és gran en els forçaments externs, però ho és molt més entre caixes, la qual cosa els fa poc fiables. Per altra banda, els valors de *Llasses et al. (2016)* són intercanvis nets de calor i sal, i per tant no distingeixen entre els causats pels fluxos d'aigua ($F_{21,o}$, $F_{12,e}$, $F_{13,o}$, $F_{13,e}$ a l'esquema de la *Fig.3*) i els causats per mescla turbulenta ($K_{ij}[T_i - T_j]$, $K_{ij}[S_i - S_j]$ a la mateixa figura).

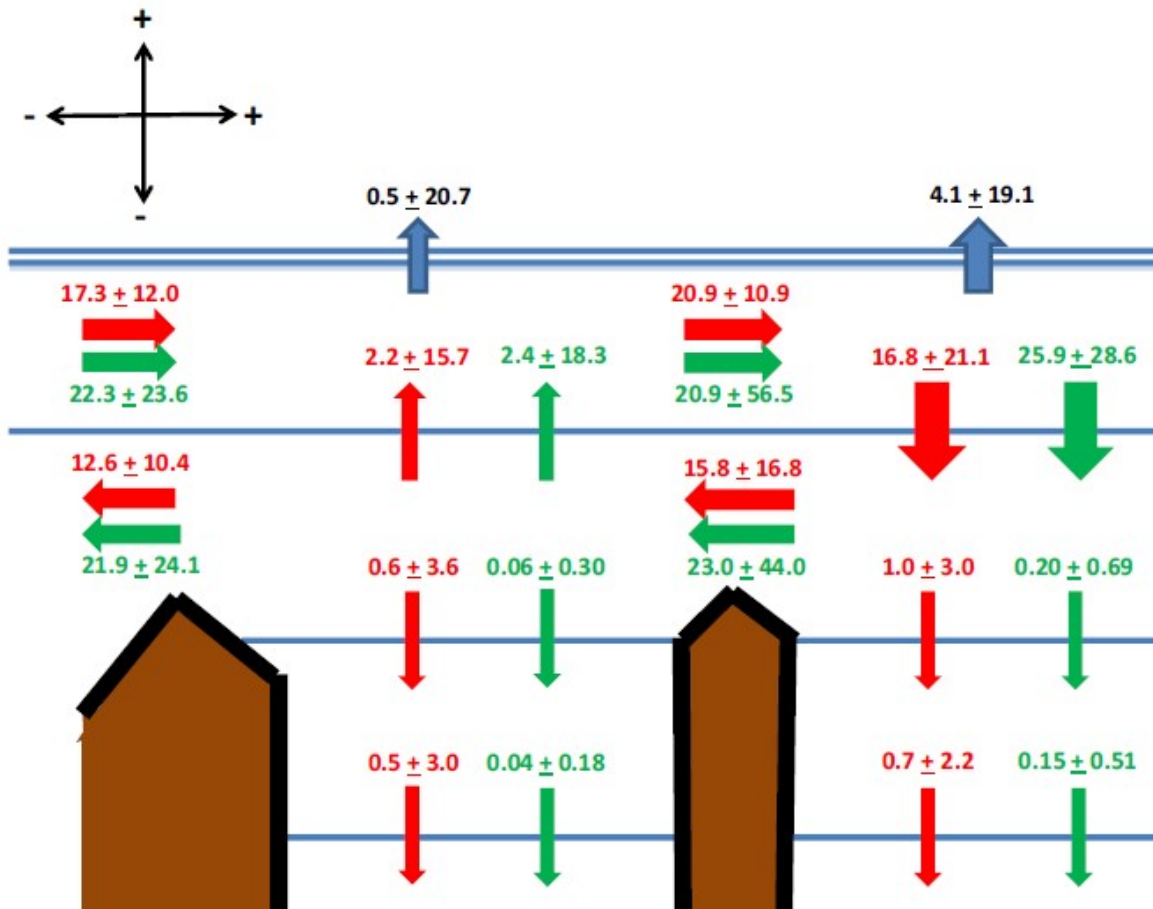


Figura 4. Còpia de la *Fig.3* de *Llasses et al. (2016)*, a la qual es representen els fluxos de calor (en W/m^2 , fletxes vermelles entre capes i blaves amb l'atmosfera) i de sal (en 10^6 kg sal/s, fletxes verdes) calculats a partir de tot un conjunt de models numèrics per a un període comú a tots ells (1980-2000). [Com s'ha mostrat abans, el factor de conversió entre W/m^2 i $Sv^{\circ}C$ és: $1 W/m^2=0.55Sv^{\circ}C$].

Conèixer les T,S d'equilibri de cada capa tampoc basta, perquè el número d'incògnites que es hi ha ($F_{21,o}$, $F_{12,e}$, $F_{13,o}$, $F_{13,e}$, $T_{13,o}$, $S_{13,o}$, $T_{13,e}$, $S_{13,e}$, $S_{12,e}$, $K_{12,o}$, $K_{23,o}$, $K_{12,e}$, $K_{23,e}$) és superior al número d'equacions que resulten d'imposar un estat estacionari ($\frac{dT_i}{dt} = 0$;

$\frac{dS_i}{dt} = 0$). Per tant, s'ha optat per una altra estratègia.

La manera en que s'han determinat les constants que resten és la següent:

- Els paràmetres relatius a la formació d'aigua fonda s'han tret de la bibliografia. Un aclariment important és que la formació d'aigua fonda només té lloc els mesos d'hivern, mentre que aquí no s'intenta resoldre el cicle estacional i per tant els valors assignats a $F_{13,o}$ i $F_{13,e}$ són mitjanes anuals dels fluxos de formació d'aigua fonda. Els valors que apareixen a *Adloff et al. (2015)* també són anuals i corresponen a treballs anteriors: *Somot et al. (2006)* per exemple, assigna una mitjana anual de 1.5 Sv a la conca occidental i de 0.5 Sv a l'oriental; *Mayers i Haines (2002)* també assignen 1.5 Sv a la conca occidental i 0.7 Sv a l'oriental; tots aquests valors deduïts de models numèrics. Les observacions mostren resultats un poc inferiors: aproximadament 1 Sv a la conca occidental i més o menys 0.3-0.4 Sv a l'oriental, però possiblement no siguin capaces d'estimar tot el volum per la dificultat que té la captura observacional del procés. Altres autors parlen de 2 Sv a la conca occidental i 1 Sv a l'oriental. Aquí s'ha optat per assignar valors intermedis: $F_{13,o}=1.5$ Sv i $F_{13,e}=0.5$ Sv de mitjana anual (que correspondrien a uns fluxos de 6 Sv i 2 Sv, respectivament, si es concentrassin en els tres mesos d'hivern).

- Una vegada determinats $F_{13,o}$, $F_{13,e}$, els fluxos $F_{12,e}$ i $F_{21,o}$ queden determinats per la conservació de volum de les capes. Així per exemple, la conservació de volum a les dues capes superiors de la conca oriental implica:

$$FS_1 - EPR_e - F_{13,e} - F_{12,e} = 0 \Rightarrow F_{12,e} = FS_1 - EPR_e - F_{13,e} \quad [19a]$$

$$F_{13,e} + F_{12,e} - FS_2 = 0 \Rightarrow F_{12,e} = FS_2 - F_{13,e} \quad [19b]$$

Les dues expressions són equivalents i redundants, atès que si les restem queda simplement el balanç hídric de la conca oriental ($FS_1 - FS_2 = EPR_e$).

Per a la conca occidental queda:

$$FG_1 - FS_1 - EPR_o - f_{13,o} + F_{21,o} = 0 \Rightarrow F_{21,o} = FS_1 + EPR_o + F_{13,o} - FG_1 \quad [20a]$$

$$FS_2 - FG_2 + F_{13,o} - F_{21,o} = 0 \Rightarrow F_{21,o} = FS_2 - FG_2 + F_{13,o} \quad [20b]$$

Altra vegada les dues expressions són equivalents i redundants, atès que si les restem queda simplement el balanç hídric de la conca occidental ($FG_1 - FS_2 - FS_1 + FS_2 = EPR_o$)

- Les constants de mescla turbulenta K_{ij} s'han determinat en una visió simple, en base a la seva relació amb el coeficient de difusió cinemàtica K_c . Per a una variable ζ en estat estacionari (on ζ pot ser T ó S), el flux vertical (per unitat d'àrea) d'aquesta propietat associat a la difusió turbulenta és: $F_\zeta = -K_c(\partial\zeta / \partial z)$. A l'esquema de la *Fig.3*, els fluxos turbulents entre les caixes i,j [$-K_{ij}(\zeta_i - \zeta_j)$] no són per unitat d'àrea, sinó absoluts. Per tant podem igualar:

$$K_{ij}(\zeta_i - \zeta_j) = AF_\zeta = -AK_c(\partial\zeta / \partial z) = -AK_c(\zeta_i - \zeta_j) / (z_i - z_j) \quad [21]$$

i veure que l'equivalència entre les dues formulacions és simple:

$$K_{ij} \equiv AK_c / (z_i - z_j) \quad [22]$$

Agafant un valor típic per al coeficient de difusió cinemàtica K_c de 10^{-5} m²/s. Essent els valors de les àrees $0.9 \cdot 10^{12}$ m² (conca occidental) i $1.6 \cdot 10^{12}$ m² (conca oriental), i agafant per a l'altura de cada capa els seus valors intermedis ($z_1=75$ m, $z_2=375$ m, $z_3=1050$ m), s'obtenen els

valors: $K_{12,o}=0.030$ Sv; $K_{23,o}=0.013$ Sv; $K_{12,e}=0.053$ Sv i $K_{23,e}=0.024$ Sv. Aquests valors es consideraran constants en tot moment.

El fet d'agafar un valor constant per a K_c no deixa de ser una aproximació grollera, perquè en principi K_c depèn de si el règim és més o manco turbulent. Si els valors de K_{ij} surten majors a la conca oriental no és perquè es faci cap distinció entre la cinemàtica de les dues conques; és degut simplement a que K_{ij} representa el flux vertical sumat sobre tota la conca, i l'oriental té més extensió que l'occidental. I el fet que $K_{12} > K_{23}$ tampoc és degut a que es consideri més turbulència a les capes superiors que a les inferiors (que seria del tot lògic), sinó simplement degut al gruix de les capes que s'han triat. La realitat, per tant, és que no deixa de ser una visió molt simplificada dels intercanvis turbulents.

- Finalment, manca determinar els valors de $T_{13,o}$, $S_{13,o}$, $T_{13,e}$, $S_{13,e}$, $T_{12,e}$, $S_{12,e}$. Les restriccions en aquest cas són que $T_{13} < T_1$ i que $S_{13} > S_1$ a les dues conques, per òbvies i pel fet que la formació d'aigua fonda implica que la densitat de l'aigua que baixa ha de ser major que la de les capes superficials i intermèdia. En el cas de la formació d'aigua intermèdia a la conca oriental, la densitat de l'aigua que baixa ha de ser major que la superficial, però menor que la de la capa fonda.

Atès que només queden ja aquestes 6 variables per determinar, es poden ajustar de tal manera que siguin consistents amb les condicions d'equilibri de les conques. És a dir, ara sí que, coneixent les T,S d'equilibri de cada capa es pot determinar $T_{13,o}$, $S_{13,o}$, $T_{13,e}$, $S_{13,e}$, $T_{12,e}$ i $S_{12,e}$ exigint que $dT/dt = dS_i/dt = 0$ per a cada capa. En previsió de situacions que es voldran modelitzar i en les quals les conques no estaran en equilibri, més que uns valors absoluts per a $T_{13,o}$, $S_{13,o}$, $T_{13,e}$, $S_{13,e}$, $T_{12,e}$ i $S_{12,e}$, convé expressar aquests paràmetres com una diferència respecte de la T,S de les capes d'origen. És a dir:

$$T_{13,o} = T_{1,o} - \delta T_{13,o}; S_{13,o} = S_{1,o} + \delta S_{13,o} \quad [23]$$

$$T_{13,e} = T_{1,e} - \delta T_{13,e}; S_{13,e} = S_{1,e} + \delta S_{13,e} \quad [24]$$

$$T_{12,e} = T_{1,e} - \delta T_{12,e}; S_{12,e} = S_{1,e} + \delta S_{12,e} \quad [25]$$

Fent els càlculs pertinents, s'obtenen els valors: $\delta T_{13,o} = 3.40^\circ\text{C}$, $\delta T_{12,e} = 2.46^\circ\text{C}$, $\delta T_{13,e} = 3.40^\circ\text{C}$, $\delta S_{13,o} = 1.10$, $\delta S_{12,e} = 0.20$ i $\delta S_{13,e} = 0.10$. També aquests valors es consideraran en principi constants.

- Apart de les constants nomenades hi ha per suposat els volums de cada capa, els quals depenen de l'àrea (segons la conca on es trobin) i gruix de la capa. Els seus valors són els següents.

$\cdot 10^6 \text{ m}^3$	$V_{1,o}$	$V_{2,o}$	$V_{3,o}$	$V_{1,e}$	$V_{2,3}$	$V_{3,e}$
Volum	135	405	810	240	720	1440

Taula 5. Valors dels volums de cada capa en que s'ha dividit la Mediterrània.

3.5. Descripció dels experiments que es duran a terme

3.5.1. Comprovació de que partint d'una Mediterrània plena d'aigua Atlàntica, cada caixa evoluciona cap a valors d'equilibri correctes

A l'experiment següent es comprovarà si, partint d'una Mediterrània plena d'aigua Atlàntica, cada caixa descrita anteriorment tendeix als valors d'equilibri esperats (*Taula 4*) sota els forçaments actuals. Aquesta és una condició necessària (tot i que no suficient) per poder confiar en que la configuració del model (pel que fa als fluxos considerats i als seus valors) és realista. Per tant, inicialment es partirà dels següents valors:

$$T_{1,o} = T_{2,o} = T_{3,o} = T_{1,e} = T_{2,e} = T_{3,e} = T_o = 16.13^{\circ}\text{C}$$

$$S_{1,o} = S_{2,o} = S_{3,o} = S_{1,e} = S_{2,e} = S_{3,e} = S_o = 36.24$$

En aquest experiment, la majoria dels paràmetres no variaran en el temps, ja que el que volem saber són els valors d'equilibri de cada caixa sota els forçaments actuals. Un recopilatori d'aquests valors es mostra a la *Taula 6*.

Temperatura Atlàntica: T_o	16.13°C
Salinitat Atlàntica: S_o	36.24
Flux d'evaporació total: EPR_{tot}	0.05 Sv
Flux d'entrada per Gibraltar: FG_1	0.85 Sv
Flux de sortida per Gibraltar: FG_2	0.80 Sv
Flux d'evaporació conca est: EPR_e	0.040 Sv
Flux d'entrada per Sicília: FS_1	0.95 Sv
Flux de sortida per Sicília: FS_2	0.91 Sv
Flux de calor conca oest: $(SHF)_o$	0.30 Sv°C
Flux de calor conca est: $(SHF)_e$	2.45 Sv°C
Flux d'intercanvi: $F_{13,o}$	1.50 Sv
Flux d'intercanvi: $F_{21,o}$ ($= FS_2 - FG_2 + F_{13,o}$) [19b]	1.61 Sv
Flux d'intercanvi: $F_{12,e}$ ($= FS_2 - F_{13,e}$) [20b]	0.41 Sv
Flux d'intercanvi: $F_{13,e}$	0.50 Sv
$\delta T_{13,o}$	3.40 °C
$\delta S_{13,o}$	1.10
$\delta T_{12,e}$	2.46 °C
$\delta S_{12,e}$	0.20
$\delta T_{13,e}$	3.40 °C
$\delta S_{13,e}$	0.10
Constant flux turbulent: $K_{12,o}$	0.030 Sv
Constant flux turbulent: $K_{12,e}$	0.053 Sv
Constant flux turbulent: $K_{23,o}$	0.013 Sv
Constant flux turbulent: $K_{23,e}$	0.024 Sv

Taula 6. Valors dels paràmetres que apareixen a les equacions d'evolució i que no varien temporalment en aquest experiment.

3.5.2. Comprovació de que partint dels valors d'equilibri, aquest es manté constant

En aquest cas, es partirà dels valors d'equilibri correctes de temperatura i salinitat, i es pretén veure si aquests valors es mantenen constants al llarg del temps; és a dir, si el sistema roman a l'equilibri. Es tracta en certa manera d'una comprovació redundant amb l'anterior. Ara les temperatures i salinitats inicials de cada caixa seran les d'equilibri:

$T_{1,o}= 16.527^{\circ}\text{C}$	$S_{1,o}= 37.214$
$T_{2,o}= 13.706^{\circ}\text{C}$	$S_{2,o}= 38.498$
$T_{3,o}= 13.133^{\circ}\text{C}$	$S_{3,o}= 38.315$
$T_{1,e}= 17.375^{\circ}\text{C}$	$S_{1,e}= 38.712$
$T_{2,e}= 14.565^{\circ}\text{C}$	$S_{2,e}= 38.846$
$T_{3,e}= 14.006^{\circ}\text{C}$	$S_{3,e}= 38.809$

Es vol veure si amb els diversos forçaments presents, la resposta de la Mediterrània a aquests valors d'equilibri no canvia gaire.

3.5.3. Variació dels forçaments principals per estudiar l'evolució a 100 anys

En aquest experiment, es modificaran analíticament els forçaments principals durant un període de temps de 100 anys, per tal de veure com respondrà en el futur la Mediterrània al canvi d'algun o tots ells. Els forçaments es canviaran linealment dels seus valors inicials (el mateix que s'ha emprat en els experiments anteriors) fins als finals; ambdós valors es mostren a la *Taula 7*.

Forçaments principals	SHFo	SHFe	EPRtot	EPRe	To	So
Valor inicial	0.30 Sv°C	2.45 Sv°C	0.050 Sv	0.040 Sv	16.13°C	36.24
Valor final (+100 anys)	0.00 Sv°C	0.00 Sv°C	0.075 Sv	0.060 Sv	19.13°C	35.24

Taula 7. Variació dels forçaments principals en un període de temps de 100 anys entre els valors inicials i finals.

Si canvia el balanç hídric de la conca (EPR), els fluxos per Gibraltar i Sicília, ja no poden ser els mateixos valors constants de la *Taula 6*, sinó que també aniran canviant amb el temps. En un marc teòric simplificat, les expressions d'aquests fluxos tenen una dependència directa amb l'evaporació i la densitat. Concretament, es poden expressar com la suma d'una contribució barotropa igual al dèficit d'aigua de la conca o subconca i una contribució baroclina de signe contrari a les dues capes i que és proporcional a la diferència de densitats entre capes. És a dir;

$$FG_1 = 0.5 \cdot EPR_{tot} + \beta_G (\rho_{2,o} - \rho_{Atl})^{1/2} \quad [26]$$

$$FG_2 = -0.5 \cdot EPR_{tot} + \beta_G (\rho_{2,o} - \rho_{Atl})^{1/2} \quad [27]$$

$$FS_1 = 0.5 \cdot EPR_e + \beta_S (\rho_{2,e} - \rho_{1,o})^{1/2} \quad [28]$$

$$FS_2 = -0.5 \cdot EPR_e + \beta_S (\rho_{2,e} - \rho_{1,o})^{1/2} \quad [29]$$

Es pot comprovar de manera immediata que $FG_1 - FG_2 = EPR_{tot}$ i que $FS_1 - FS_2 = EPR_e$. Les constants β_G i β_S s'han determinat correlacionant els fluxos i la densitat de cada capa a partir

de les dades d'un model numèric (NEMOMED8, Somot et al., 2006). Els valors obtinguts per a β_G i β_S són 0.545 i 0.711, respectivament.

Els fluxos de formació d'aigua fonda $F_{13,o}$ i $F_{13,e}$ es mantindran constants (i iguals als valors de la *Taula 6*). No és el cas dels fluxos entre capes $F_{21,o}$ i $F_{12,e}$ definits a l'apartat 3.4, que també aniran canviant, ja que tenen dependència amb els fluxos dels estrets ([19b] i [20b]).

Com s'ha dit, es duran a terme una sèrie de proves variant els forçaments principals, les quals es poden agrupar en dos blocs d'experiments:

- En primer lloc, es considerarà que la salinitat de les aigües Atlàntiques no varia amb el temps. Aquesta és una de les grans incerteses que es tenen encara, atès que no està clar si les aigües menys salines provinents del desgel de l'Àrtic arribaran fins a l'entrada del Mediterrani o no (hi ha models que indiquen una cosa i d'altres una altra). Sota aquesta hipòtesi, es modificaran cadascun dels tipus de forçaments de la *Taula 7* per separat, mentre es mantenen constants els restants; amés, també es modificaran tots a la vegada (excepte la salinitat). Concretament, es farà de la següent manera:
 - i) Canvien amb el temps $(SHF)_o$ i $(SHF)_e$, mantenint la resta constant i igual als valors inicials.
 - ii) Canvien amb el temps EPR_{tot} i EPR_e , mantenint la resta constant i igual als valors inicials.
 - iii) Canvia amb el temps T_o , mantenint la resta constant i igual als valors inicials.
 - iv) Tots els paràmetres anteriors canvien amb el temps.
- En segon lloc, es faran els mateixos 4 casos, però en el cas iii) es considerarà que també la salinitat de les aigües Atlàntiques varia, concretament que disminueix una unitat en 100 anys. Evidentment els experiments i), ii) seran idèntics als d'abans.

3.5.4. Mantenim constant els paràmetres a partir dels 100 anys per veure el temps de resposta de la Mediterrània de l'experiment 3.5.3

Com s'ha dit a la introducció, l'oceà respon lentament als canvis, de tal manera que en un moment donat, l'estat en que es troba no correspon a l'estat d'equilibri dels forçaments en aquell mateix moment, sinó que va endarrerit. Per visualitzar millor aquest fet, es suposarà que al cap de 100 anys els forçaments principals s'han estabilitzat, i es deixarà evolucionar el model uns centenars d'anys més. D'aquesta manera es veurà com la conca arriba a l'estat d'equilibri que realment correspon als valors que assoleixen els forçaments i que pot ser ben diferent de l'estat en que es trobi en aquest any 100).

D'alguna manera, el que s'intenta visualitzar és que tot i suposant que en cent anys s'aconseguís estabilitzar les emissions de gasos d'efecte hivernacle i per tant l'evolució de l'atmosfera, els oceans seguirien evolucionant durant centenars d'anys.

3. Resultats

4.1. Resultats obtinguts dels experiments descrits a 3.5.1 i 3.5.2

Ateses les restriccions d'espai, els gràfics dels experiments 3.5.1 i 3.5.2, que són en certa manera experiments de validació del model, s'han mogut a l'Apèndix. A les *Fig. A1* i *A2* es mostra l'evolució de la temperatura i la salinitat de cada capa fins arribar a l'equilibri.

Les temperatures superficials de cada conca augmenten respecte al valor de partida ($T_0=16.13^\circ\text{C}$), mentre que a les capes intermèdies i fondes disminueixen. Pel que fa a la salinitat, augmenta a totes les capes, la qual cosa és consistent amb el fet que la salinitat d'equilibri de la Mediterrània és més elevada que la de l'Atlàntic (s'havia partit d'un valor de 36.24) degut al dèficit hídric. Aquest experiment serveix per constatar, primer, que el model està prou ben calibrat, atès que les temperatures i salinitats finals són prou semblants a les actuals (veure secció 3.5.2).

L'experiment també serveix per tenir una idea del temps que tarda la conca en assolir l'equilibri, i que és de l'ordre d'uns quants de centenars d'anys. Aquest temps és més gran per a la salinitat que per a la temperatura. D'altra banda, per a una mateixa variable, el temps és similar per a totes les capes, la qual cosa evidencia la interdependència entre elles.

L'experiment descrit a 3.5.2 és en certa manera un corol·lari de l'anterior, i només pretén confirmar l'estabilitat de la situació d'equilibri sota els forçaments actuals. La lleugera evolució de la salinitat a la conca est és del mateix ordre que la precisió de la salinitat de partida (0.01) i per tant no és significativa.

4.2. Resultats obtinguts de l'experiment descrit a 3.5.3 per a les dues variants

Per a aquest experiment es mostren els resultats de les dues variants descrites anteriorment. En primer lloc es mostraran els resultats de considerar que la salinitat Atlàntica es manté sempre constant, desglossats per a cadascun dels canvis en els forçaments.

i) Quan es canvien els fluxos de calor superficials SHF_o i SHF_e (disminuint la calor cedida a l'atmosfera) mantenint la resta de forçaments constants, es pot observar un augment de la temperatura a les dues conques, però més gran a la conca est, sobretot a la capa superficial (*Fig. 5*). Pel que fa a la salinitat, a la conca oest és manté pràcticament constant, mentre que a la conca est hi ha una petita pujada, un poc més marcada a la capa fonda (*Fig. 6*). Cal recordar que l'acoblament entre les dues variables prové dels fluxos en els estrets: si varien les temperatures varia la densitat i per tant el fluxos en els estrets (veure [26]-[29]), lo qual pot fer variar la salinitat.

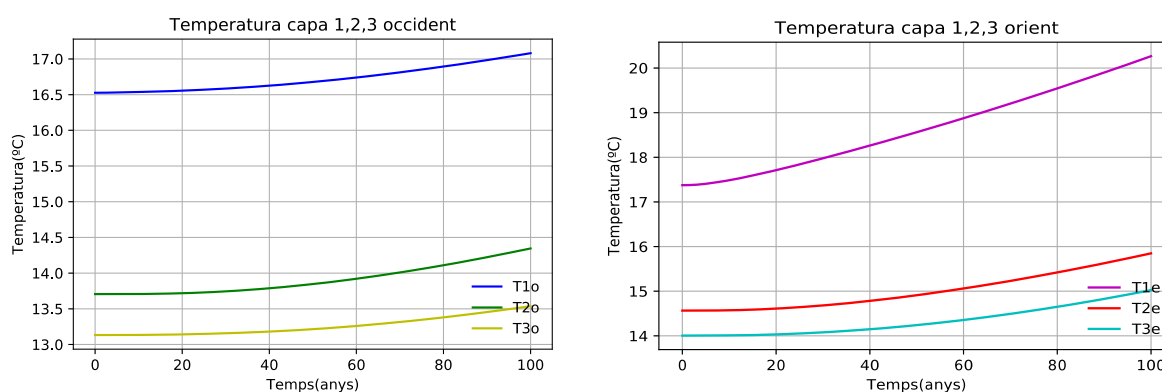


Figura 5. Evolució de la temperatura de cada capa quan es disminueixen els fluxos de calor superficials des dels valors actuals fins als previstos per a 2100.

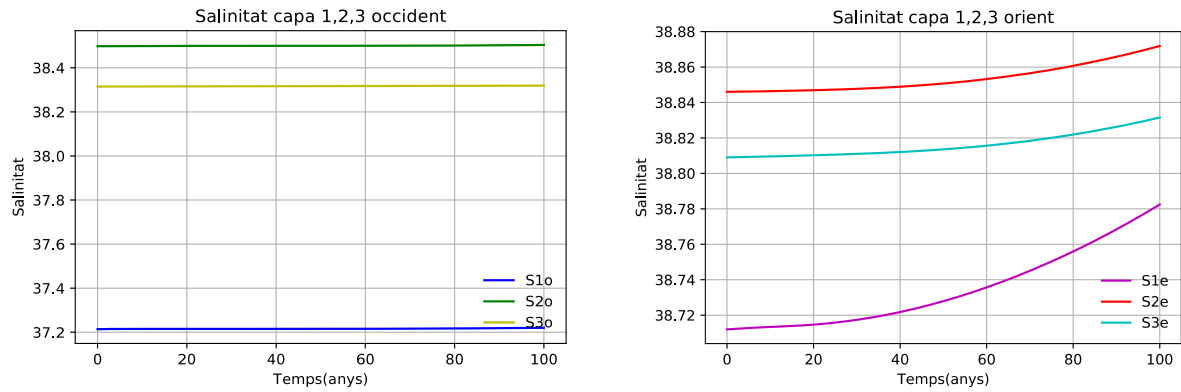


Figura 6. Evolució de la salinitat de cada capa quan es disminueixen els fluxos de calor superficials des dels valors actuals fins als previstos per a 2100.

ii) Quan es canvien EPR_{tot} i EPR_e (augmenta el dèficit hídric) mantenint la resta de forçaments constants, l'efecte sobre les temperatures és petit (Fig. 7). La salinitat sí que mostra canvis, concretament un augment en les dues conques, sobretot a la conca oriental i molt especialment a la capa superficial d'aquesta conca (Fig. 8).

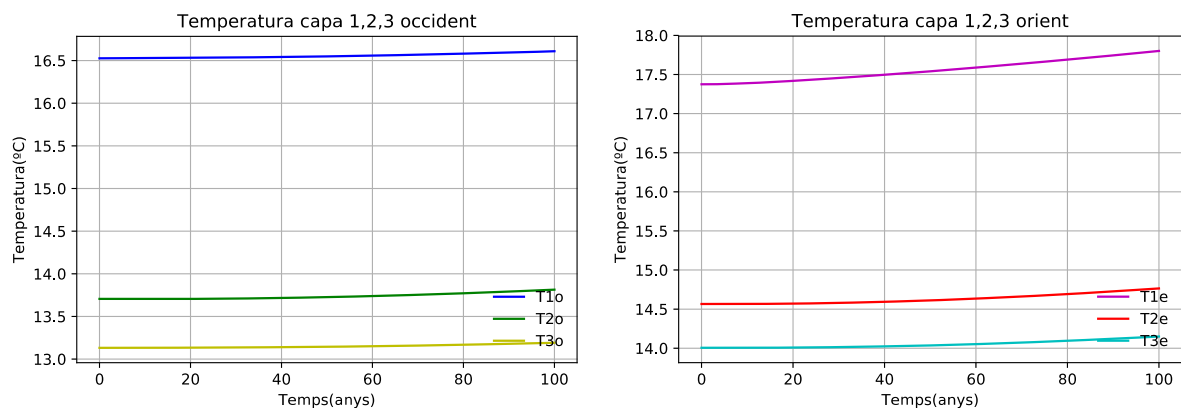


Figura 7. Evolució de la temperatura de cada capa quan s'augmenta el dèficit hídric de la conca des dels valors actuals fins als previstos per a 2100.

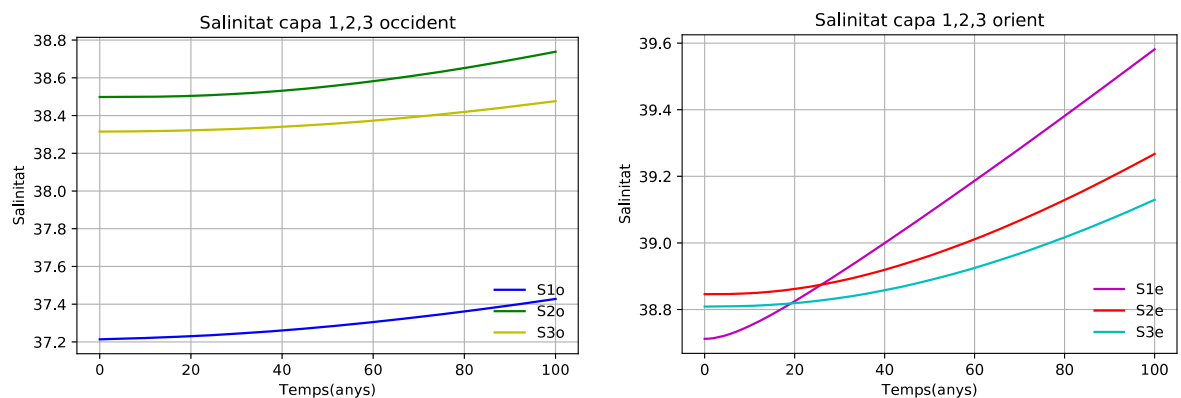


Figura 8. Evolució de la salinitat de cada capa quan s'augmenta el dèficit hídric de la conca des dels valors actuals fins als previstos per a 2100.

iii) Quan s'augmenta la temperatura de les aigües Atlàntiques entrants T_o , mantenint la resta de forçaments constant, les temperatures de totes les capes augmenten de manera considerable, especialment les superficials (Fig. 9). Pel que fa a les salinitats, disminueixen a les dues conques, encara que més a l'oriental (Fig. 10).

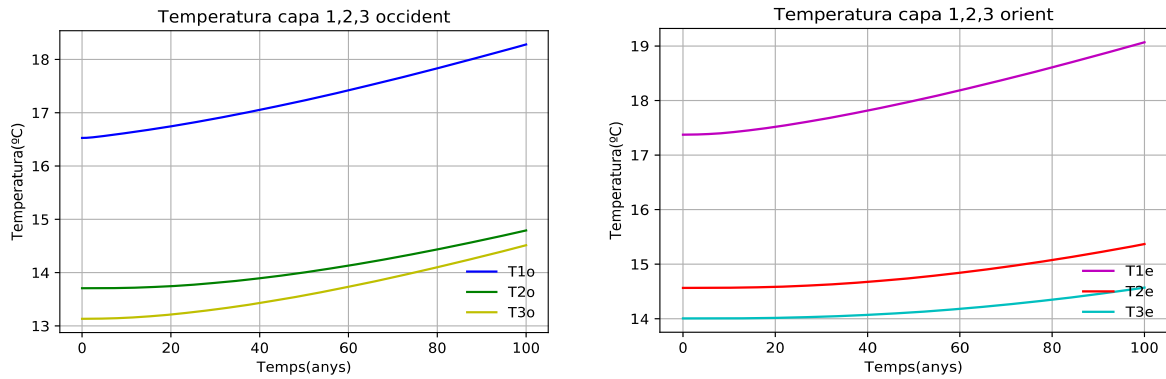


Figura 9. Evolució de la temperatura de cada capa quan s'augmenta la temperatura de les aigües Atlàntiques entrants, des dels valors actuals fins als previstos per a 2100.

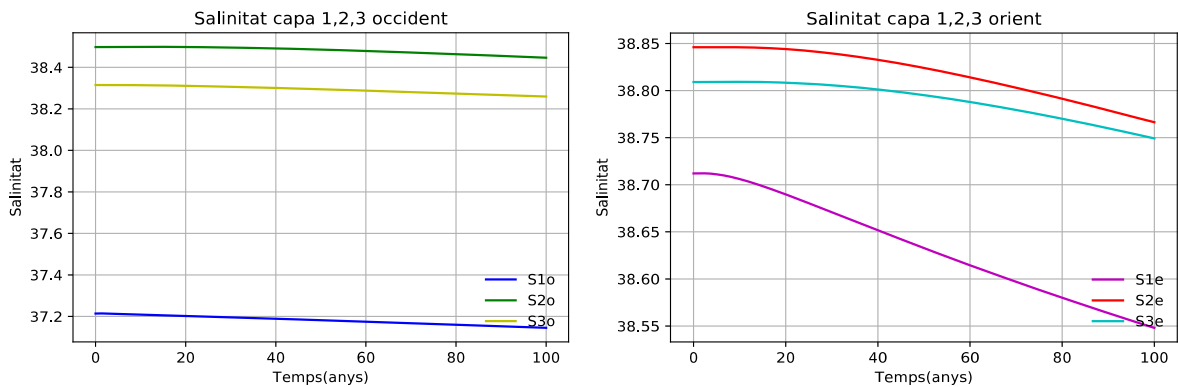


Figura 10. Evolució de la salinitat de cada capa quan s'augmenta la temperatura de les aigües Atlàntiques entrants, des dels valors actuals fins als previstos per a 2100.

iv) Quan s'apliquen tots els canvis descrits en els punts i)-iii), els resultats són els següents:

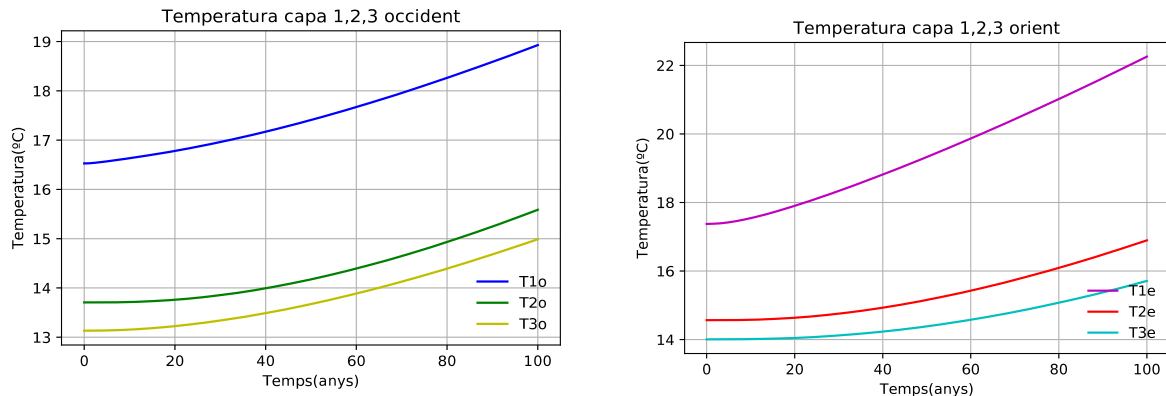


Figura 11. Evolució de la temperatura de cada capa quan s'apliquen alhora tots els canvis descrits a les Figs. 5, 7 i 9.

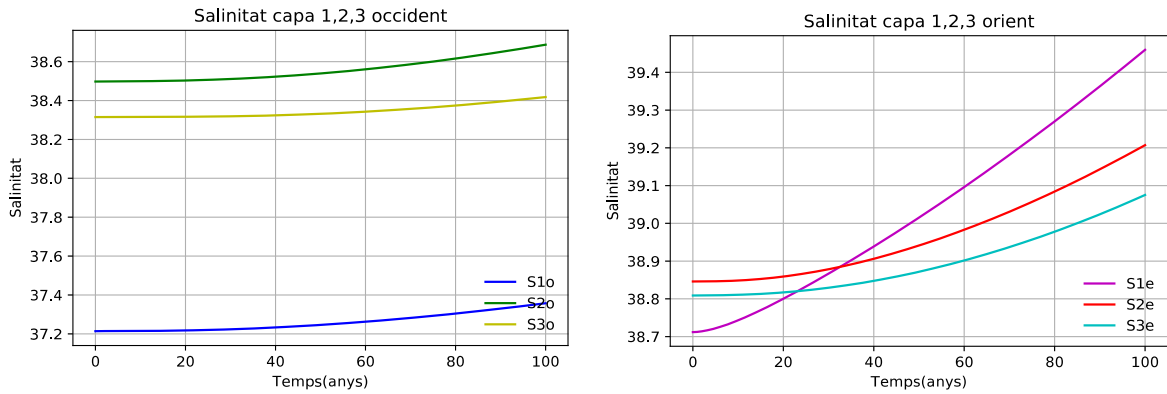


Figura 12. Evolució de la salinitat de cada capa quan s'apliquen alhora tots els canvis descrits a les Figs. 6, 8 i 10.

Els canvis de temperatura obtinguts són considerables a totes les capes, essent més grans a la conca oriental (Fig. 11). Pel que fa a la salinitat, a la conca occidental experimenta un petit augment, mentre que a l'oriental té un creixement més gran, sobretot a la capa superficial (Fig. 12). Per resumir tots aquests resultats s'ha construït la Taula 8, on es quantifiquen els canvis obtinguts.

$S_o = \text{const.}$		Canvien els SHF			Canvien els EPR			Canvia T_o			Canvia TOT		
		Capa1	Capa2	Capa3	Capa1	Capa2	Capa3	Capa1	Capa2	Capa3	Capa1	Capa2	Capa3
Oest	T ini	16.52	13.70	13.13	16.52	13.70	13.13	16.52	13.70	13.13	16.52	13.70	13.13
	T fin	17.08	14.34	13.54	16.61	13.81	13.19	18.28	14.79	14.51	18.93	15.58	14.99
	ΔT	0.56	0.64	0.41	0.09	0.11	0.06	1.76	1.09	1.38	2.41	1.88	1.86
	S ini	37.21	38.50	38.32	37.21	38.50	38.32	37.22	38.50	38.32	37.22	38.50	38.32
	S fin	37.22	38.50	38.32	37.43	38.74	38.48	37.14	38.45	38.26	37.36	38.69	38.42
	ΔS	0.01	0.00	0.00	0.22	0.24	0.16	-0.08	-0.05	-0.06	0.14	0.19	0.10
Est	T ini	17.37	14.56	14.00	17.37	14.56	14.00	17.37	14.56	14.00	17.37	14.56	14.00
	T fin	20.26	15.85	15.02	17.80	14.76	14.15	19.07	15.37	14.57	22.26	16.89	15.71
	ΔT	2.89	1.29	1.02	0.43	0.20	0.15	1.70	0.81	0.57	4.89	2.33	1.71
	S ini	38.72	38.85	38.81	38.72	38.85	38.81	38.72	38.85	38.82	38.72	38.85	38.81
	S fin	38.78	38.87	38.83	39.58	39.27	39.13	38.55	38.77	38.75	39.46	39.21	39.07
	ΔS	0.06	0.02	0.02	0.86	0.42	0.32	-0.17	-0.08	-0.07	0.74	0.36	0.26

Taula 8. Canvis en la temperatura i salinitat de cada capa quan es canvien els forçaments de manera individual i tots alhora, però sempre mantenint constant la salinitat Atlàntica.

Quan es repeteix l'experiment anterior, però ara variant també la salinitat Atlàntica, els casos i) ii), en que es mantenen constants els paràmetres Atlàntics, seran òbviament idèntics als anteriors (Figs. 5-8). Per tant només es mostraran els dos darrers, que eren aquells en que únicament varien els paràmetres Atlàntics (iii) i quan varien tots alhora (iv).

iii) Quan es canvien T_o i S_o , mantenint la resta de forçaments constant, les temperatures de les dues conques (Fig. 13) experimenten canvis similars als de la Fig. 9. Les salinitats mostren ara un decreixement marcat en totes les capes (Fig. 14), essent més rellevant a les capes superficials i a la conca oriental.

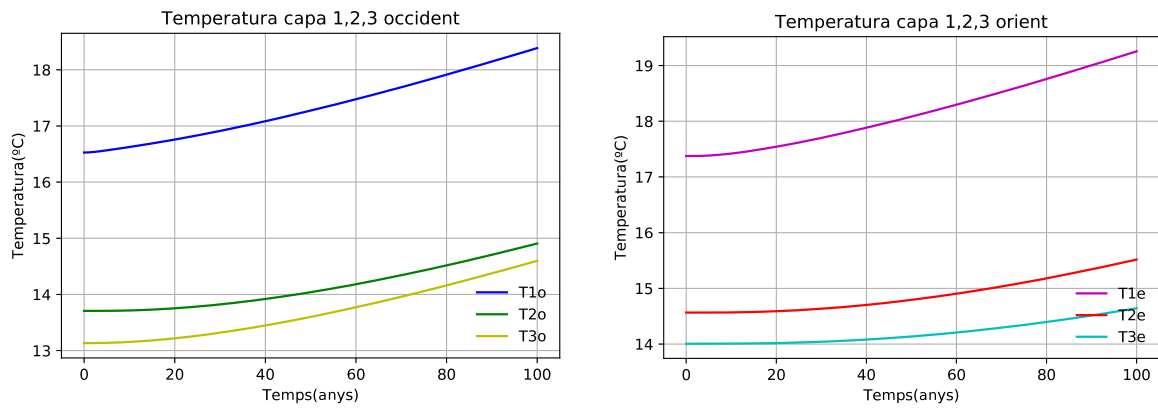


Figura 13. Evolució de la temperatura de cada capa quan s'augmenta la temperatura i es disminueix la salinitat de les aigües Atlàntiques entrants, des dels valors actuals fins als previstos per a 2100.

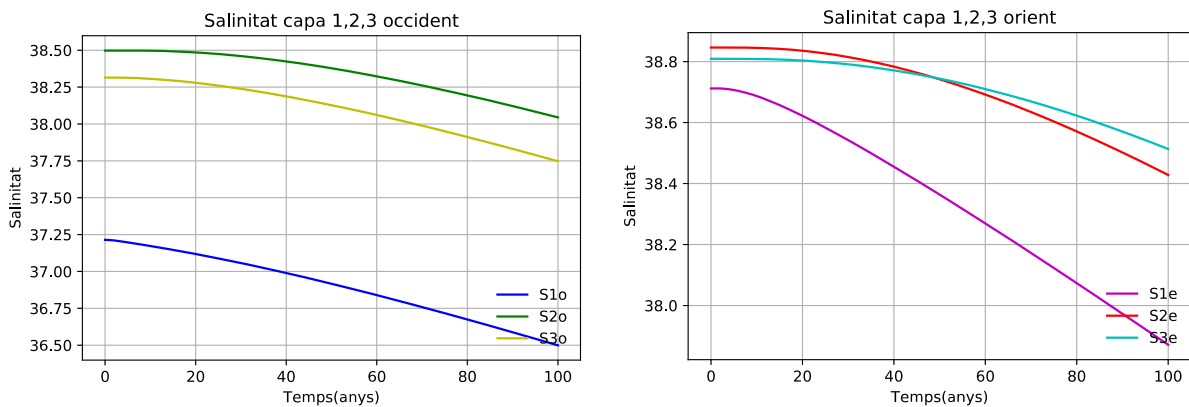


Figura 14. Evolució de la salinitat de cada capa quan s'augmenta la temperatura i es disminueix la salinitat de les aigües Atlàntiques entrants, des dels valors actuals fins als previstos per a 2100.

iv) Quan es canvien tots els paràmetres alhora, els resultats són els següents:

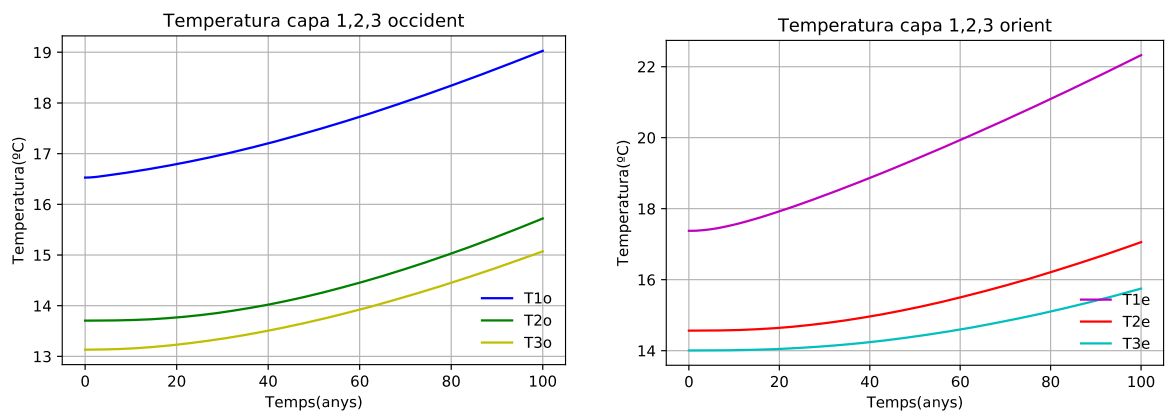


Figura 15. Evolució de la temperatura de cada capa quan s'apliquen alhora tots els canvis descrits a les Figs. 5, 7 i 13.

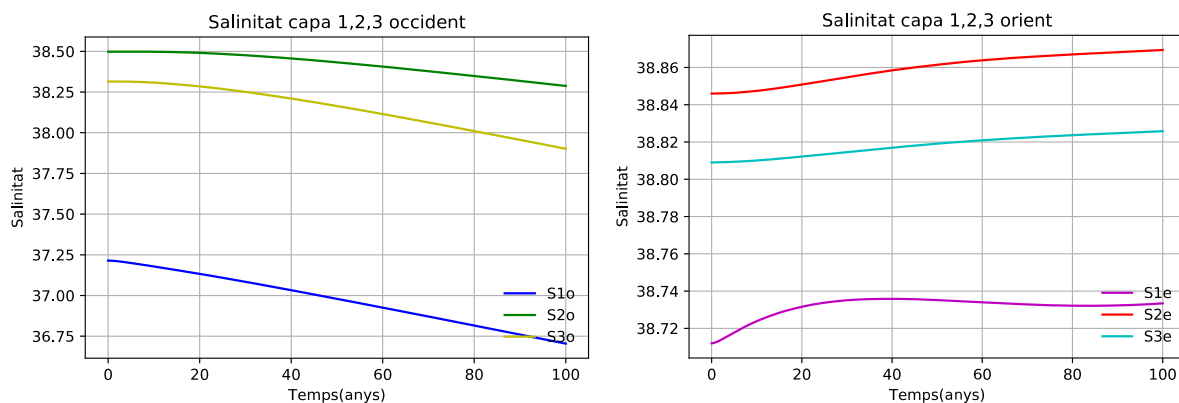


Figura 16. Evolució de la salinitat de cada capa quan s'apliquen alhora tots els canvis descrits a les Figs. 6, 8 i 14.

Variant tots els paràmetres, les temperatures augmenten més o manco com en el bloc anterior, arribant a tenir quasi 5°C més a la capa superficial de la conca oriental (Fig. 15). Pel que fa a les salinitats, a la conca occidental disminueixen una mica mentre que a l'oriental experimenten un lleuger augment (Fig. 16). Com s'ha fet en el primer bloc, també ara es resumeixen els resultats en una Taula (9). Per completitud es mostren tots els canvis, tot i que les columnes corresponents als canvis dels SHF i dels EPR són idèntiques a les de la Taula 8.

$S_0 \neq \text{const.}$		Canvien els SHF			Canvien els EPR			Canvien T_0, S_0			Canvia TOT		
		Capa1	Capa2	Capa3	Capa1	Capa2	Capa3	Capa1	Capa2	Capa3	Capa1	Capa2	Capa3
Oest	T ini	16.52	13.70	13.13	16.52	13.70	13.13	16.52	13.70	13.13	16.52	13.70	13.13
	T fin	17.08	14.34	13.54	16.61	13.81	13.19	18.38	14.91	14.60	19.03	15.72	15.07
	ΔT	0.56	0.64	0.41	0.09	0.11	0.06	1.86	1.21	1.47	2.51	2.02	1.94
	S ini	37.21	38.50	38.32	37.21	38.50	38.32	37.22	38.50	38.32	37.22	38.50	38.32
	S fin	37.22	38.50	38.32	37.43	38.74	38.48	36.50	38.04	37.75	36.70	38.29	37.90
	ΔS	0.01	0.00	0.00	0.22	0.24	0.16	-0.72	-0.46	-0.57	-0.52	-0.21	-0.42
Est	T ini	17.37	14.56	14.00	17.37	14.56	14.00	17.37	14.56	14.00	17.37	14.56	14.00
	T fin	20.26	15.85	15.02	17.80	14.76	14.15	19.25	15.52	14.64	22.32	17.06	15.75
	ΔT	2.89	1.29	1.02	0.43	0.20	0.15	1.88	0.96	0.64	4.95	2.52	1.75
	S ini	38.72	38.85	38.81	38.72	38.85	38.81	38.72	38.85	38.81	38.72	38.85	38.81
	S fin	38.78	38.87	38.83	39.58	39.27	39.13	37.87	38.43	38.51	38.73	38.87	38.82
	ΔS	0.06	0.02	0.02	0.86	0.42	0.32	-0.85	-0.42	-0.30	0.01	0.02	0.01

Taula 9. Canvis en la temperatura i salinitat de cada capa quan es canvien els forçaments de manera individual i tots alhora, variant també la salinitat Atlàntica.

4.3. Resultats obtinguts de l'experiment descrit a 3.5.4

Per últim, es mostren els resultats de continuar l'experiment anterior en el temps, però deixant constants els valors dels forçaments a partir dels 100 anys. El temps d'integració s'allargarà fins els 1000 anys i només es considerarà el cas en que durant els primers 100 anys tots els forçaments varien alhora. Això sí, es segueixen considerant les dues opcions per a la salinitat Atlàntica.

En primer lloc i com era d'esperar, cal notar que a partir de fer constants els forçaments (als 100 anys) els pendents comencen a disminuir. En el cas en que la salinitat Atlàntica no varia, es pot observar que la reducció del creixement del pendent i per tant l'estabilització de les temperatures (*Fig. 17*) és més ràpida que per a les salinitats (*Fig. 18*). Sobretot a la conca oriental, la salinitat tarda centenars d'anys en arribar a l'equilibri.

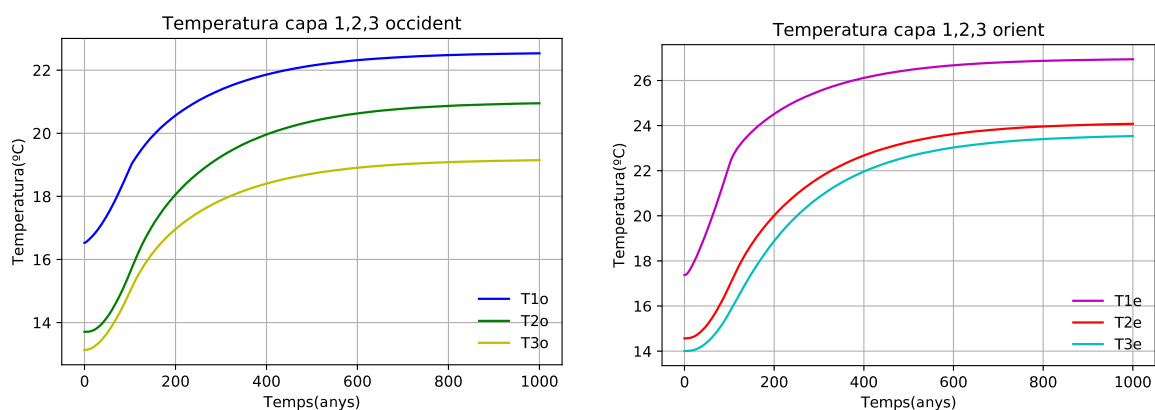


Figura 17. Evolució de la temperatura de cada capa quan els forçaments varien tots alhora durant els primers 100 anys (però mantenint la salinitat Atlàntica constant, com a la *Fig. 11*) i a partir d'aquell moment es mantenen tots els forçaments constants.

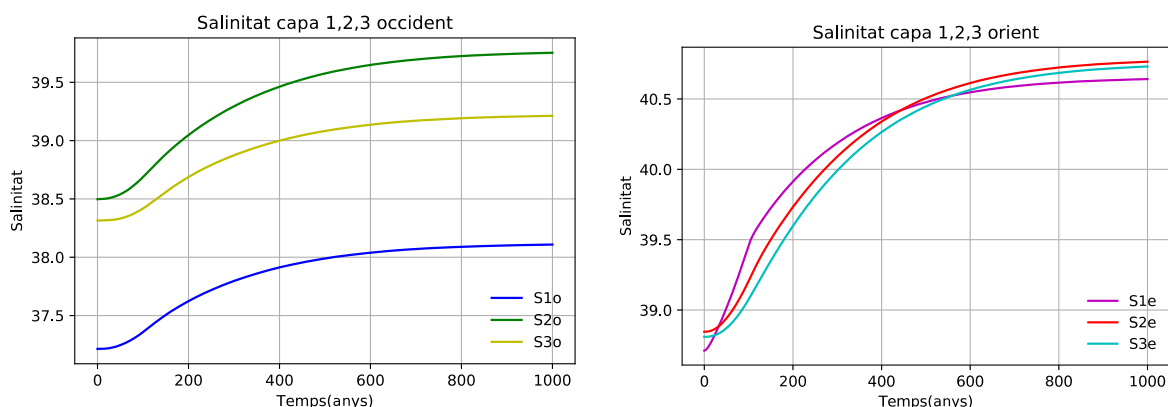


Figura 18. Evolució de la salinitat de cada capa quan els forçaments varien tots alhora durant els primers 100 anys (però mantenint la salinitat Atlàntica constant, com a la *Fig. 12*) i a partir d'aquell moment es mantenen tots els forçaments constants.

El cas en que la salinitat Atlàntica disminueix durant els primers 100 anys no mostra canvis rellevants respecte a l'anterior pel que fa a la temperatura (*Fig. 19*), però és especialment interessant pel que fa a l'evolució de la salinitat (*Fig. 20*). A la *Fig. 16* es mostrava com durant els primers 100 anys a la conca occidental la salinitat disminuïa una mica, mentre que a l'oriental experimentava un lleuger augment. Una vegada establitzats els forçaments, però, la salinitat de la conca occidental es recupera fins a gairebé els valors de partida, en el cas de les capes superficial i fonda, i per damunt del valor de partida en el cas de la capa intermèdia. A la conca oriental els lleugers augments dels primers 100 anys es tornen augments molt marcats, de l'ordre de 0.8 a totes les capes. Igual que passava en el cas anterior, la salinitat tarda més temps en establitzar-se que la temperatura.

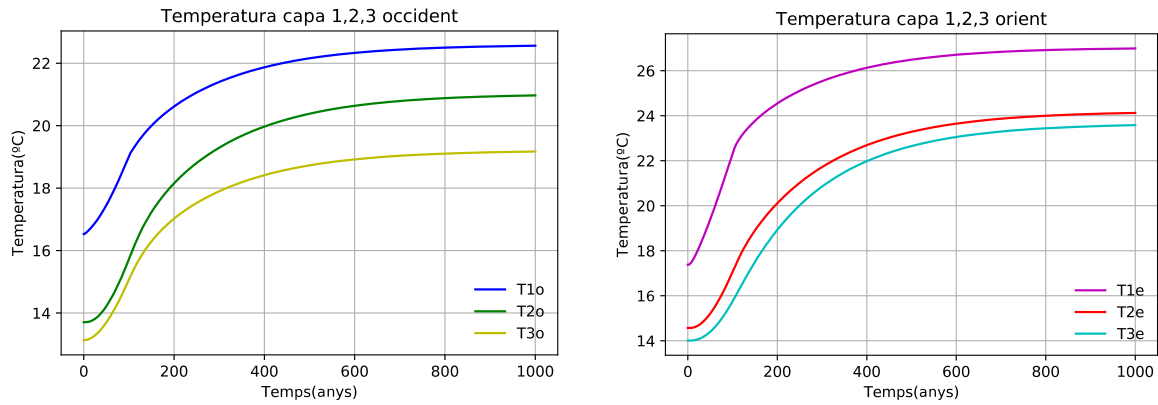


Figura 19. Evolució de la temperatura de cada capa quan els forçaments varien tots alhora durant els primers 100 anys (també la salinitat Atlàntica, com a la Fig. 15) i a partir d'aquell moment es mantenen tots els forçaments constants.

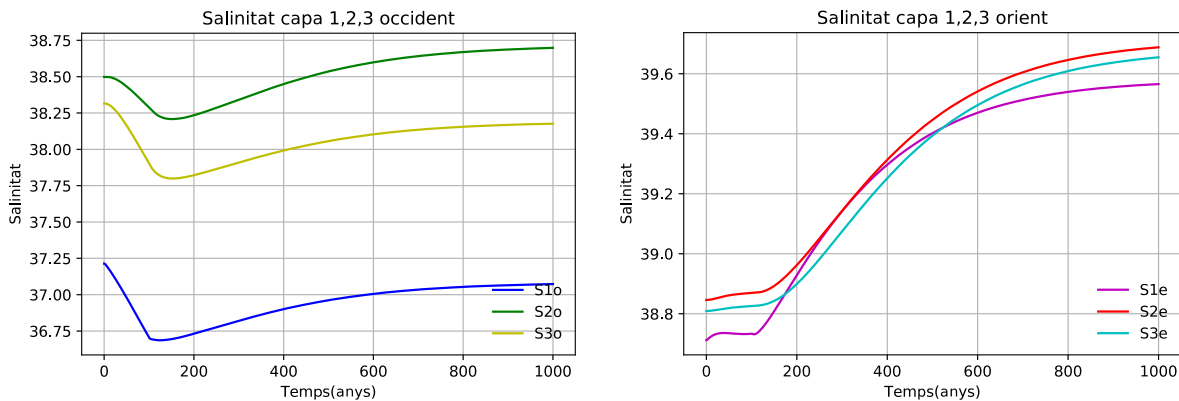


Figura 20. Evolució de la temperatura de cada capa quan els forçaments varien tots alhora durant els primers 100 anys (també la salinitat Atlàntica, com a la Fig. 16) i a partir d'aquell moment es mantenen tots els forçaments constants.

4. Discussió

5.1. Discussió dels resultats dels experiments descrits a 3.5.1 i 3.5.2

A les Figs. A1-A2, que mostren l'evolució de la conca inicialment plena d'aigua Atlàntica, és pot apreciar que la capa de fons tarda un poc més en establitzar-se, pel fet de ser la que té menys intercanvis. En canvi, les capes superficials són les que reaccionen més ràpidament (trigant en qualsevol cas centenars d'anys en arribar a l'equilibri). També es veu que la conca est tarda un poc més en establitzar-se que la oest, fet que és més evident en el cas de la salinitat (Fig. A2); en aquesta conca l'evaporació és més elevada, i per tant les salinitats d'equilibri també ho seran, raó per la qual tardarà més a arribar-hi quan es parteix d'una situació inicial d'aigua Atlàntica poc salina. També hi ha el fet d'estar un poc més aïllada de l'exterior, ja que la circulació des de l'estret de Gibraltar experimenta un camí més llarg.

El més important d'aquest experiment 3.5.1 i del 3.5.2 (Figs. A3-A4) és que les capes tendeixen a uns valors similars als d'equilibri i allà s'estabilitzen. Evidentment això no és una garantia absoluta de la fiabilitat del model. Primer perquè es tracta en certa manera d'un

resultat esperat, des del moment en que els paràmetres s'han ajustat (sempre dins uns marges realistes) perquè sigui així. I segon perquè possiblement es podrien trobar altres combinacions de paràmetres i constants, més enllà dels valors assumits aquí, que conduirien al mateix estat d'equilibri, sense que fossin necessàriament realistes. Els resultats d'aquests experiments són, per tant, una condició necessària, tot i que no suficient, sobre la fiabilitat del model.

5.2. Discussió dels resultats de l'experiment descrit a 3.5.3 per a les dues variants

Aquest és sens dubte l'experiment principal del treball. El fet de mirar l'efecte de cada forçament per separat té com a objectiu saber quin d'ells és més decisiu pel que fa a l'evolució de la conca. S'analitzarà en primer lloc el conjunt de simulacions per a les quals la salinitat Atlàntica es mantenia constant, i després s'afegirà l'efecte d'una possible variació de la salinitat de les aigües entrants per Gibraltar.

Del bloc d'experiments en els quals es manté constant la salinitat Atlàntica, els punts principals que mereixen un comentari (basats essencialment en els valors de la *Taula 8*) són:

- Els canvis en els fluxos superficials de calor tenen òbviament una influència directe sobre la temperatura, mentre que la salinitat no es veu pràcticament afectada. Es pot observar que aquesta augmenta bastant més a la conca oriental (fins a $+2.89^{\circ}\text{C}$ a la capa superficial) que no a l'occidental ($+0.64^{\circ}\text{C}$ d'augment màxim, a la capa intermèdia). Això es així perquè en aquesta conca es passa de cedir $2.45\text{ Sv}^{\circ}\text{C}$ a l'atmosfera a no cedir gens de calor, mentre que a l'occidental es passa de $0.30\text{ Sv}^{\circ}\text{C}$ a zero.

Com s'ha dit a la secció 1.3, aquesta és pot ser una reducció massa dràstica dels fluxos de calor. S'han fet alguns experiments de sensibilitat disminuint els fluxos de calor de cada conca a la meitat (enlloc de a zero) en 100 anys, tal i com suggereix *Adloff et al. (2015)*. En aquest cas els resultats són possiblement més realistes: la temperatura segueix augmentant més a la conca oriental ($+1.25^{\circ}\text{C}$ a la capa superficial) que no a l'occidental ($+0.30^{\circ}\text{C}$ d'augment màxim, a la capa intermèdia), però les diferències entre conques son menors.

- Pel que fa a l'evaporació, òbviament té una influència directa en la salinitat i poca en la temperatura. Les temperatures puguen com a màxim al voltant de 0.43°C a la capa superficial de la conca est, mentre que la salinitat augmenta en gairebé una unitat ($+0.86$) a la capa superficial oriental, que és on hi ha més evaporació.

- El fet de pujar la temperatura Atlàntica 3°C en 100 anys provoca un augment generalitzat de la temperatura a totes les capes del Mediterrani, essent un poc més important a la conca occidental. De tota manera, en superfície les diferències entre conques són molt petites ($+1.76^{\circ}\text{C}$ a la conca oest, $+1.70^{\circ}\text{C}$ a la conca est); és a les capes fondes on es veu que la de la conca oriental tarda més en notar els canvis ($+1.38^{\circ}\text{C}$ a la conca oest, $+0.57^{\circ}\text{C}$ a la conca est). Pel que fa a la salinitat, es produeix un petit descens a totes les capes (de com a màxim -0.17 a la capa superficial de la conca est); això és degut a que l'augment de 3°C de la temperatura Atlàntica té una repercussió sobre els fluxos per Gibraltar i Sicília; concretament, si les aigües superficials que entren són més càlides (i per tant menys denses), en base a [26]-[29] els fluxos en els estrets augmenten (mantenint constant la diferència entre entrada i sortida), i aquest augment d'aigua entrant, poc salina, fa disminuir la salinitat de les conques.

- Quan canvien tots els forçaments alhora es pot apreciar el gran augment de la temperatura, destacant l'increment de la capa superficial de la conca est (+4.89°C), resultat de l'efecte conjunt de la disminució dels fluxos de calor i de l'increment de la temperatura de les aigües Atlàntiques entrants. A la conca oest els increments són menors (+2.51°C a la capa superficial). Els increments obtinguts són bastant més grans que no el de *Adloff et.al (2015)*, que són aproximadament de 2.06°C a la capa superficial total, mentre que a la intermèdia i a la fonda són de 1.20°C i 0.76°C, respectivament.

Si enlloc de suposar les variacions dels SHF del nostre experiment (SHF a zero en 100 anys) es suposa una reducció a la meitat (com suggereix *Adloff et. al 2015*), els increments de temperatura que s'obtenen són significativament menors: de l'ordre de +2.5°C a la capa superficial de la conca oest i de +3.5°C a la capa superficial de la conca est, valors ja més comparables als obtinguts per *Adloff et. al (2015)*.

Pel que fa a les salinitats, afectades només per l'evaporació, augmenten més a la conca oriental (màxim de +0.74 a la capa superficial) que no a l'occidental (màxim de 0.19 a la capa intermèdia). Si les comparem amb els valors de *Adloff et. al (2015)*, que empren uns increments en el EPR molt propers al nostres (+0.023 per a l'escenari A1B i +0.027 per a l'escenari A2, mentre que nosaltres empren +0.025), veiem que per a la capa superficial total dóna un increment de +0.73 a l'escenari A1B i de +0.74 a l'escenari A2. Pel que fa a la capa intermèdia dóna increments de +0.47 i +0.44 als escenaris A1B i A2, respectivament; i a la capa fonda de +0.51 i +0.41. Per tant, els nostres resultats són similars d'*Adloff et a. (2015)* a la capa superficial i si agafam els valors de la conca oriental. A les capes intermèdia i fonda els nostres resultats donen augments de salinitat sensiblement inferiors (+0.36 i +0.26 a la conca oriental, +0.19 i +0.10 a la conca occidental) als d'*Adloff et a. (2015)*.

Si analitzam l'efecte additiu dels forçaments, sumant els increments de T, S que resulten de canviar cada forçament individual i comprant la suma amb els increments que resulten de variar tots els paràmetres alhora, els resultats són més o manco similars (veure *Taula 8*). El que això indica és que, al manco en el nostre model, les interaccions entre els efectes dels distints forçaments són petites.

El segon bloc d'experiments consistia en afegir la possibilitat que la salinitat Atlàntica disminuís una unitat en 100 anys. En aquest bloc els dos primers punts tractats anteriorment (quan només es variien els fluxos de calor i quan només varia el balanç hídric) son exactament iguals. El que sí canvia és l'impacte dels canvis en l'aigua Atlàntica entrant i els totals:

- Si augmenta la temperatura i disminueix en una unitat la salinitat de les aigües Atlàntiques al llarg de 100 anys, l'evolució de les temperatures en el Mediterrani és similar al cas de mantenir constant la salinitat. Per suposat, les salinitats sí que mostren diferències importants, disminuint fins un màxim de -0.72 a la capa superficial occidental i -0.85 a l'oriental.

- Pel que fa al cas en que tots els forçaments varien, salinitat d'aigua Atlàntica inclosa, les salinitats disminueixen a la conca occidental (fins a -0.52 a la capa superficial), mentre que a la part oriental quasi no presenten canvis. El motiu es que el canvi de la salinitat Atlàntica compensa l'augment de salinitat derivat de l'augment del dèficit hídric, sobretot a la part occidental per proximitat a l'estret de Gibraltar.

Si es comparen amb els valors obtinguts per *Adloff et. al (2015)*, veiem que les salinitats aquí ja no són semblants, a causa de que aquests autors no consideren la possibilitat de que la

salinitat Atlàntica disminueixi. Pel que fa a les temperatures, les nostres són encara un poc més elevades que en el cas on la salinitat Atlàntica és mantenia constant, i per tant significativament superiors a les d'*Adloff et al. (2015)*.

Pel que fa a l'efecte additiu dels forçaments, es pot comprovar de la mateixa manera que s'ha fet abans, que la suma dels increments de T, S obtinguts per a cada forçament individual són també similars als valors obtinguts quan tots els forçaments varien alhora (veure *Taula 9*).

5.3. Discussió dels resultats de l'experiment descrit a 3.5.4

Aquest experiment es una ampliació temporal (fins a 1000 anys) dels dos experiments en que tots els forçaments van variant en el temps, considerant altra vegada les dues opcions per a la salinitat Atlàntica (primer es manté constant i després es disminueix una unitat en 100 anys).

- Mantinent constant la salinitat Atlàntica els resultats mostren el temps de resposta que tarda la Mediterrània en assolir el nou estat d'equilibri, és a dir, després de que els forçaments es mantinguin constants a partir dels 100 anys. Com es pot veure la reacció del Mediterrani als forçaments és bastant lenta, sobretot a la conca oriental, a causa de la distància que té amb l'estret de Gibraltar, i on s'aprecia més és amb la salinitat (*Fig. 18*). La reducció dels pendents dels increments no s'experimenten fins aproximadament al cap de 400 anys a les capes intermèdia i fonda.

Els increments de temperatura i salinitat una vegada s'arriba a l'estat d'equilibri són molt més marcats que els assolits al cap de 100 anys. Pel que fa a les temperatures (*Fig. 17*) cal destacar la capa intermèdia occidental on s'assoleix un increment de +7.25°C, mentre que a la oriental s'arriba a +9.57°C a la capa superficial. En quant a les salinitats (*Fig. 18*) també s'aprecia un augment en totes les capes arribant al màxim de +1.25 a la capa intermèdia occidental i de +1.93 a la capa superficial oriental.

- En el cas en que la salinitat Atlàntica disminueix en una unitat, els increments en les salinitats canvien notablement (*Fig. 20*): a la conca occidental, les capes superficial i fonda disminueixen la seva salinitat al voltant de -0.14, i en canvi a la intermèdia augmenta un +0.2. A la conca oriental totes les capes augmenten la seva salinitat, arribant al màxim de 0.85 a la capa superficial. Les temperatures no experimenten gairebé canvis respecte al cas anterior. És a dir, a llarg termini i en el conjunt de la conca, la salinitat augmentaria, posant de manifest que l'efecte de l'increment del dèficit hídric considerat aquí és superior al de la disminució d'una unitat en l'aigua Atlàntica. Recordem que al cap de 100 anys el que es veia era una lleugera disminució de la salinitat, la qual posa de manifest, una vegada més, que el sistema no havia arribat a l'equilibri.

5. Conclusions

Tot i que el Mediterrani només experimenta una entrada important d'aigua a través de l'estret de Gibraltar, presenta una sèrie de processos que fan que sigui un sistema bastant complex; tot i així, el model senzill que s'ha utilitzat ens ha donat molta informació sobre com pot canviar el seu estat si canvien els fluxos de volum, sal i calor.

El model utilitzat de sis caixes ens ha ajudat, en primer lloc, a reproduir valors molt pròxims als mesurats de temperatura i salinitat, a partir de valors realistes dels forçaments. També les evolucions a 100 anys descrites semblen prou realistes, atesa la simplicitat del model, quan es comparen amb els resultats de models numèrics com els d'*Adloff et al. (2015)*. A més, el nostre model considera la divisió de la Mediterrània en dues conques, la qual cosa és una millora respecte de treballs previs on es considerava el Mediterrani com una sola conca.

Per suposat hi ha limitacions, i així ho plasmen les gràfiques. Per exemple, a l'experiment 3.5.1 la resposta inicial de la temperatura de les capes superficials és un poc estranya (veure Annex), tot i que després es va estabilitzant cap els valors d'equilibri. La raó pot ser que a l'experiment que s'inicia amb aigua Atlàntica, si fos realista, just quan es comença a evaporar aigua superficial, aquesta seria més salina i per tant més densa que la que té per davall, i per tant s'hauria d'enfonsar en la seva totalitat. Nosaltres, en canvi, suposam en tot moment uns fluxos de formació d'aigües intermèdies i fondes invariants, que pot ser una bona aproximació si no estam molt llum de l'equilibri actual, però no per a una situació tan distinta com la considerada en aquest experiment.

Una feina addicional que es podria fer seria un estudi complet de sensibilitat per a cadascun dels paràmetres i veure quina repercussió tenen en els resultats. Més enllà dels paràmetres que es mantenen constants, els fluxos pels estrets de Gibraltar i Sicília s'han formulat com a variables en funció de la diferència de densitat entre les dues capes, però aquesta formulació no es la única possible, per exemple.

6. Referències bibliogràfiques

- Adloff, F., Somot, S., Sevault, F., Jordà, G., Aznar, R., Déqué, M., Herrmann, M., Marcos, M., Dubois, C., Padorno, E., Alvarez-Fanjul, E., Gomis, D. (2015). Mediterranean Sea response to climate change in an ensemble of 21st century scenarios. doi:[10.1007/s00382-015-2507-3](https://doi.org/10.1007/s00382-015-2507-3)
- Ballabrera, J. (2009) *Circulación Oceánica y Clima*. Barcelona: Institut de Ciències del Mar (CSIC), Capítol 14, pp. 2-14.
- Llases, J., Jordà, G., Gomis, D., Adloff, F., Macías, D., Harzallah, A., Arsouze, T., Akthar, N., Li, L., Elizalde, A., Sannino, G. (2016). Heat and salt redistribution within the Mediterranean Sea in the Med-CORDEX model ensemble. doi: [10.1007/s00382-016-3242-0](https://doi.org/10.1007/s00382-016-3242-0)
- Myers, P.G., Haines, K., (2002). Stability of the Mediterranean's thermohaline circulation under modified surface evaporative fluxes. *J. Geophys.* doi: [10.1029/2000JC000550](https://doi.org/10.1029/2000JC000550)
- Somot, S., Sevault, F., Déqué, M. (2006). Transient climate change scenario simulation of the Mediterranean Sea for the 21st century using a high-resolution ocean circulation model. doi: [10.1007/s00382-006-0167-z](https://doi.org/10.1007/s00382-006-0167-z)
- Vargas Yáñez, M., García Martínez, M^a. C., Moya Ruiz, F., Tel, E., Parrilla, G., Plaza, F., Lavín, A. and others (2007). *Cambio climático en el Mediterráneo español*. Madrid: Instituto Español de Oceanografía, pp. 37-46.
- Zúñiga López, I., Crespo del Arco, E. (2010). *Meteorología y Climatología*. Madrid, Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED), pp. 220-221.

Annex

A.1. Resultats obtinguts de l'experiment descrit a 3.5.1.

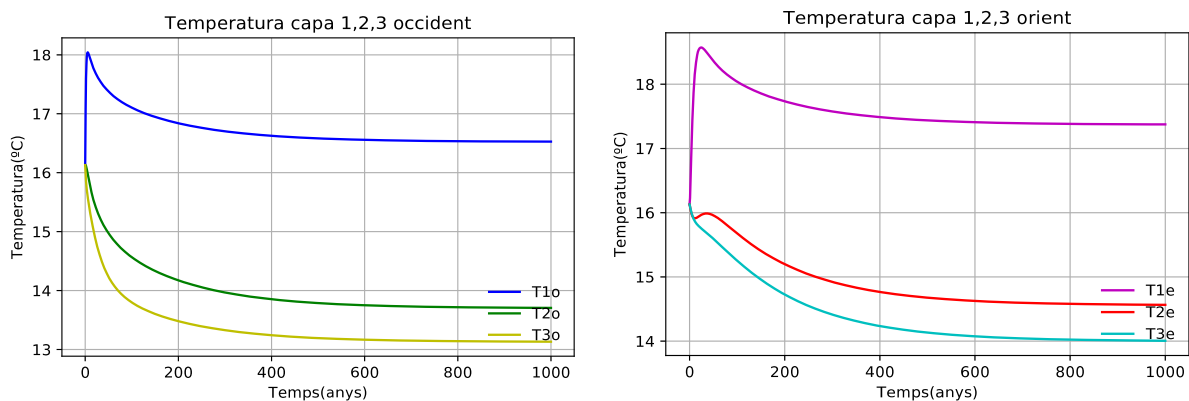


Figura A.1. Evolució de la temperatura de les tres capes de cada conca quan es parteix d'una situació d'Aigua Atlàntica omplint tota la Mediterrània i els forçaments de calor i EPR tenen els valors actuals.

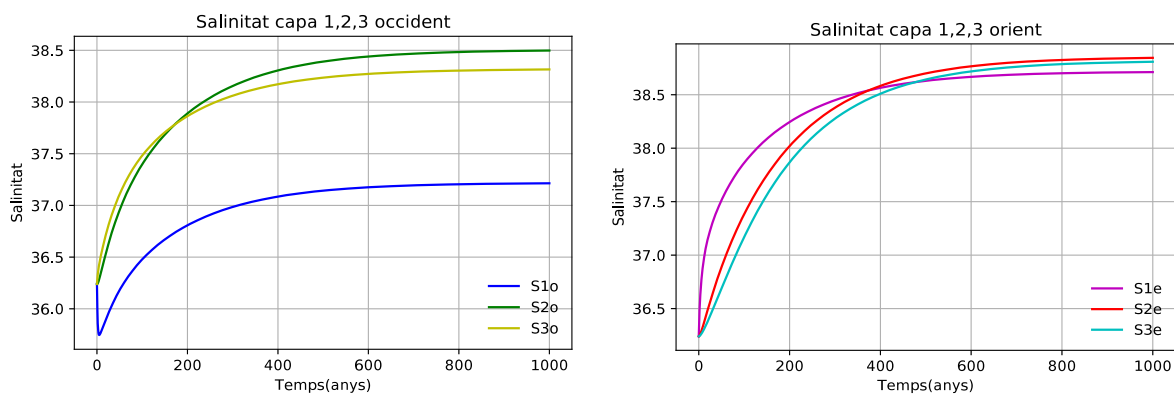


Figura A.2. Evolució de la temperatura de les tres capes de cada conca quan es parteix d'una situació d'Aigua Atlàntica omplint tota la Mediterrània i els forçaments de calor i EPR tenen els valors actuals.

A.2 Resultats obtinguts de l'experiment descrit a 3.5.2.

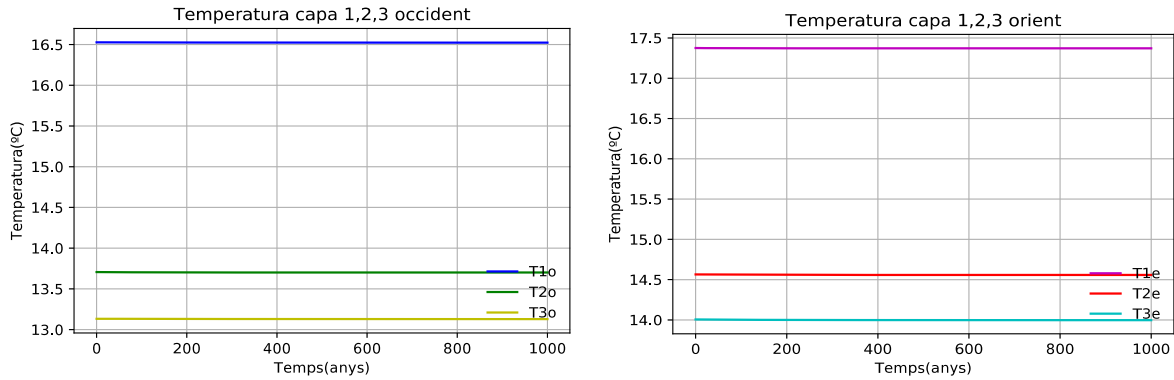


Figura A.3. Evolució de la temperatura de les tres capes de cada conca quan es parteix d'uns valors de T , S i forçaments de calor i EPR similars als valors actuals.

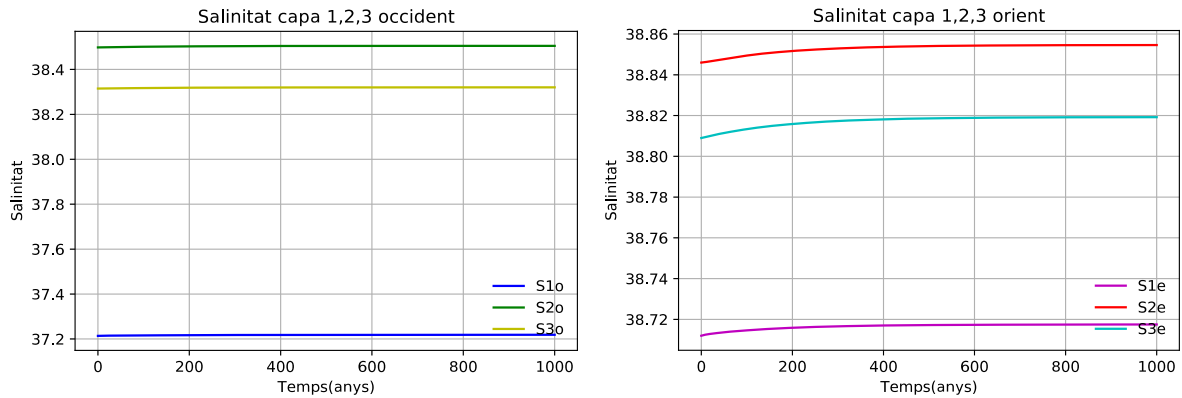


Figura A.4. Evolució de la salinitat de les tres capes de cada conca quan es parteix d'uns valors de T , S i forçaments de calor i EPR similars als valors actuals.