



Universitat
de les Illes Balears

TREBALL FI DE GRAU

ESTUDI DE L'ESTRUCTURA TRIDIMENSIONAL DE LES ONADES DE CALOR MARINES AL MEDITERRANI

Joan Moragues Roca

Grau de Física

Facultat de Ciències

Any Acadèmic 2019-20

ESTUDI DE L'ESTRUCTURA TRIDIMENSIONAL DE LES ONADES DE CALOR MARINES AL MEDITERRANI

Joan Moragues Roca

Treball de Fi de Grau

Facultat de Ciències

Universitat de les Illes Balears

Any Acadèmic 2019-20

Paraules clau del treball:

Onades, calor, Mediterrani, GOTM, Temperatura, SST

Tutor: *Gabriel Jordá Sánchez*

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 Onades de calor marines
- 1.2 Onades en fondària
- 1.3 Mètode d'anàlisi
- 1.4 El Mediterrani
- 1.5 Motivació i objectius de l'estudi

2 Dades

- 2.1 Extracció
- 2.2 Control de qualitat

3 Mètode

- 3.1 Detecció d'onades
- 3.2 Paràmetres per a caracteritzar les onades de calor
- 3.3 Índex de comparació
- 3.4 Simulació GOTM

4 Resultats

- 4.1 Caracterització de les onades de calor marines
- 4.2 Cas d'estudi: Sa Foradada
- 4.3 Simulació GOTM

5 Discussió

- 5.1 Transmissió de les onades de calor
- 5.2 Simulació GOTM

6 Conclusions

1 Introducció

1.1 Onades de calor marines

Les onades de calor són un fenomen més o menys familiar: temperatures atmosfèriques anormalment altes durant un període de temps prolongat. Però aquests augments de la temperatura per sobre del que s'espera no només ocorren a l'atmosfera sinó també als mars i oceans, i es coneixen com a onades de calor marines. Com les atmosfèriques, poden definir-se com un període de temps en el qual les temperatures de certa extensió d'aigua se situen per sobre del que caldria esperar; llavors, les onades poden tenir lloc durant qualsevol època de l'any -també durant l'hivern-. En general, l'estudi de les onades de calor marines és de vital importància perquè tenen una implicació directa i molt important en els ecosistemes marins, com es comentarà detalladament més endavant.

És important tenir present que, ja des de fa molts anys, la temperatura global de mars i oceans es troba en continu augment. Aquest creixement notori de la temperatura s'estima en 0'6°C cada 100 anys des del 1880, però podria augmentar fins a un ritme de 2°C per segle en el futur (*IPCC AR5, 2014*). Això no fa més que afavorir l'aparició d'onades de calor, més intenses, més freqüents i, en general, amb un augment important de tot el que impliquen.

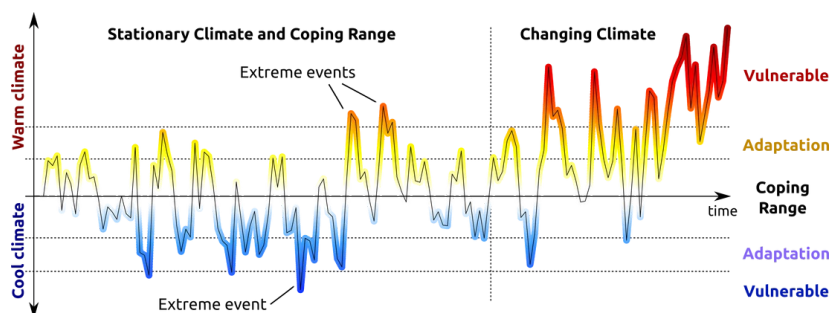


Figura 1: La tendència ascendent de les temperatures afavoreix l'aparició cada cop més freqüent d'onades de calor i augmenta la vulnerabilitat de les espècies marines

Les causes explícites de les onades de calor marines són molt variades, tot i que destaquen els corrents marins, que poden transportar aigua calenta cap a una zona, i el flux de calor entre la superfície marina i l'aire, que pot variar a causa de diferents fenòmens meteorològics. En cada cas concret, però, hi ha algunes causes principals i d'altres que no hi han jugat un paper tan important. Per a entendre-les és convenient citar alguns exemples d'esdeveniments recents.

Un episodi força famós és el conegut com “La taca del Pacífic”. Durant més de 2 anys (2013 – 2015/2016), les temperatures de la regió nord-est de l'oceà Pacífic, prop de les costes oest del Canadà i els Estats Units, sofriren temperatures anormalment altes. L'estudi d'aquest esdeveniment conclogué que les principals causes foren vents molt poc intensos combinats amb un flux molt baix de calor de l'aigua a l'atmosfera i un flux molt alt en sentit contrari, degut a un augment de la radiació d'ona curta. És a dir, l'augment de la radiació propicià una pujada de la temperatura de l'aigua superficial, la qual no es mesclà tant amb les aigües més fredes del fons marí per culpa, en bona part, dels vents dèbils (*Bond et al., 2015; Myers et al., 2018*).

Per altra banda, durant 30 dies de l'estiu del 2003, al Mediterrani, es detectaren temperatures prop de 4°C per sobre de la mitjana. En aquest cas s'atribueix la causa del fenomen a una onada de calor atmosfèrica, que repercutí en l'onada de calor marítima transmetent més calor de l'habitual. Paral·lelament, vents de menys intensitat que l'habitual també hi contribuïren (Olita et al., 2007).

Finalment, podem parlar d'algunes onades prop d' Austràlia, com la dels anys 2015/2016, amb temperatures més de 2°C per sobre de les habituals, causada pel corrent d'aigua calenta "El Niño" i una menor cobertura nuvolosa (Benthuisen et al., 2018); o la del mar de Tasmània entre el Novembre de 2017 i el Juny de 2018, no causada per corrents oceànics sinó per un flux aire-mar anormalment alt i vents dèbils (Oliver et al., 2017), com en el cas de "La taca del Pacífic". Aquests últims casos són una mostra de que, inclús a la mateixa zona geogràfica, poden tenir lloc onades per causes diverses.

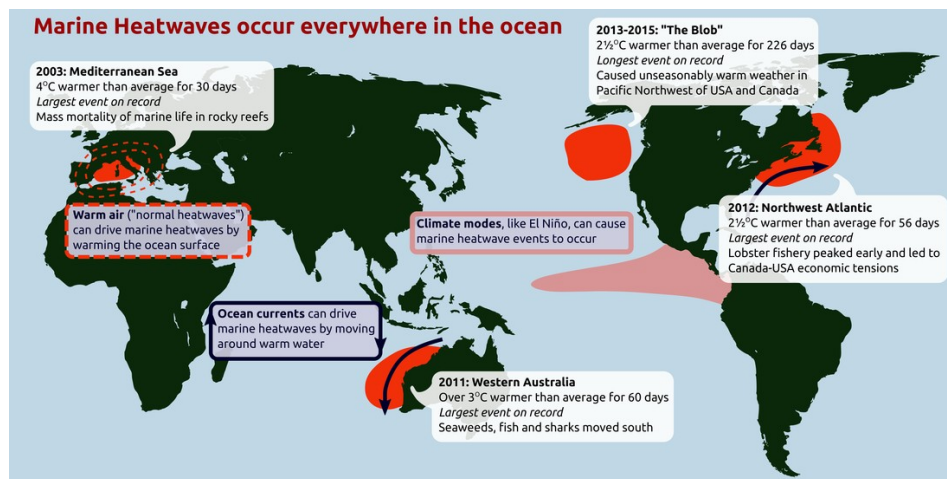


Figura 2: Les onades de calor marines ocorren a tot el món i per motius molt diversos. A més, tenen fortes conseqüències en molts àmbits diferents.

Però el més rellevant a l'hora d'estudiar aquests fenòmens és saber fins quin punt són transcendents per a la fauna i la flora marines, com es veuen afectats els ecosistemes que els sofreixen i, fins i tot, com ens pot perjudicar a nosaltres.

Les onades propicien uns canvis molt dràstics en certs ecosistemes. Per exemple, durant una onada de calor a Austràlia el 2011, la biodiversitat de les espècies evolucionà fins a adquirir característiques tropicals: molts boscs d'algues esdevingueren gespa d'algues (Wernberg et al., 2013), tal com s'observa a la imatge.

Això incideix en alguns animals: en aquest cas l'erició de mar, que s'alimenta de les algues que es troben als esmentats boscos i els obliga a emigrar. I si no és degut a la recerca d'aliment, l'emigració d'animals marins a causa de les onades pot ser perquè, simplement, segueixen els corrents càlids i acaben en zones molt distants del seu hàbitat natural. A més, i encara dins la zona d'Austràlia, un altre bon exemple de les grans repercussions que poden tenir les onades és el que s'observà el 2016, quan ocorregué un emblanquiment de la Gran Barrera de Coral, que hagués pogut conduir a l'extinció dels manglars del Golf de Carpentària.

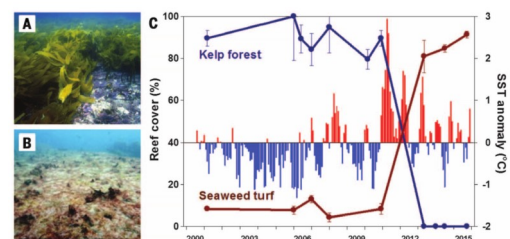


Figura 3: Podem observar el canvi de l'ecosistema en un sol any (A i B) i les anomalies tèrmiques que propiciaren el fet (C)

Per altra banda, i per a demostrar que l'impacte d'aquest fenomen no només afecta la biodiversitat marina, podem parar atenció al que succeí al nord-oest atlàntic el 2012 -tal com veim a la [Figura 2](#)- quan una onada de calor repercutí fortament en la indústria de llagosta i propicià daltabaixos econòmics entre el Canadà i els EUA.

Altres exemples serien l'augment de mortalitat en algunes espècies quan sofreixen pujades dràstiques de la temperatura (orelles de mar, ostres...), cosa que no només afecta la diversitat d'espècies marines sinó també el comerç i l'aqüicultura.

1.2 Onades en fondària

Malgrat que sovint no es tengui en compte, les onades de calor marines són un fenomen tridimensional que ocorre en alguna extensió d'aigua que pot trobar-se a qualsevol fondària. És lògic pensar que quan es detecta una onada de calor en superfície, tota la columna d'aigua -almenys fins un punt- es veu afectada, en menor o major mesura depenent d'uns quants factors. Bàsicament, la mescla d'aigua de la columna serà el factor clau a l'hora de propagar una onada en superfície cap al fons marí. Una forta estratificació de la columna d'aigua, així com un període de poc vent, provocaran una mescla de la columna d'aigua molt menys eficient, que podria conduir a observar un fort increment de la temperatura superficial però unes temperatures habituals a certs nivells de fondària.

L'estudi d'aquests possibles comportaments és essencial perquè, només observant les conseqüències de les onades de calor marines esmentades a l'anterior subapartat, hom pot deduir la importància no tant de les onades superficials, sinó de les que ocorren a certa fondària. És allà on viuen la majoria d'espècies marines i per tant és on els efectes mediambientals es faran notar més. De fet, organismes com el coral seran fortament afectats pel fenomen, pel fet de ser menys mòbils, ja que els és impossible desplaçar-se cap a aigües més fredes ([Galli, Solidoro, & Lovato, 2017](#)).

Tot i l'òbvia rellevància de les onades de calor a certa fondària, fins ara no han estat investigades en gaires ocasions, i no gaire exhaustivament. Se n'han deduït, això sí, algunes poques conclusions; entre elles, sabem que la duració de les onades en fondària pot ser més llarga que en superfície ([Jackson et al., 2018](#)).

A banda, podem mencionar tres estudis importants d'onades en fondària. En primer lloc, un estudi de l'evolució de les temperatures de la columna d'aigua al sud-est d'Austràlia, que revelà un augment continuat d'aquestes des del 1953 i una intensitat màxima de les onades de calor just per sota de la termoclina ([Schaeffer & Roughan, 2017](#)). En segon lloc, es feu un estudi per a detectar onades en superfície i en fondària al mar de Tasmània (1993-2015) del qual es conclougué una mitjana de 90 – 185 metres de fondària per a les onades de regions fondes i de 20 – 50 metres per a zones properes a la costa ([Oliver et al., 2018](#)). Finalment, i en relació a la zona d'interès del present treball, [Darmaraki \(2019\)](#) basant-se en models numèrics, conclougué que, majoritàriament, les intensitats mitjanes i màximes en fondària són relativament majors que en superfície, probablement a causa que són esdeveniments més llargs.

1.3 Mètodes d'anàlisi

Els estudis de les onades de calor marines es basen en mètodes variats. Donat que la majoria dels estudis realitzats en aquest camp es basen en l'anàlisi d'onades de calor superficials, l'ús de satèl·lits és el més abundant per a obtenir dades reals superficials, *SST (Sea Surface Temperature)*: un mètode força còmode i precís, tot i que té alguns inconvenients, com que

tenen molt més error que les dades *in situ* extretes amb termòmetres, i, a banda, no poden llegir temperatures en dies ennuvolats, de manera que un refinament de les dades sempre és indispensable.

Paral·lelament, l'ús de models numèrics està cada cop més estès, però sempre compta amb la desavantatge de, precisament, ser un model, i no un conjunt de dades preses directament del que s'observa a la realitat, a més de que és necessari validar-lo com a model útil. Un bon exemple és l'*ETAS*, un model de la temperatura en diverses fondàries del mar de Tasmània, usat per [Oliver et al. \(2018\)](#).

Per la seva banda, l'anàlisi de sèries de dades *in situ* és el menys emprat. Suposa la necessitat de tenir una estació a la zona d'interès, de manera que hi ha moltes menys sèries de dades en espai, però també en temps. Tal com fan [Schaeffer & Roughan \(2017\)](#) al seu estudi també del sud-est australià, s'usen dades *in situ* col·locades a certa fondària amb una freqüència de mostreig prou elevada i dades de satèl·lit superficials. En el present estudi, a diferència de la majoria d'estudis del Mediterrani, combinarem els tres mètodes.

1.4 El Mediterrani

El mar Mediterrani és un mar interior situat al sud del continent europeu, al nord d'Àfrica i a l'oest d'Àsia, que abraça longituds entre -6° i 36° , i latituds entre 30° i 46° . Connecta amb l'oceà Atlàntic a través de l'estret de Gibraltar, a l'oest, al mar d'Alborán; també amb el mar Negre a l'est, a través dels estrets del Bòsfor i dels Dardanels, i artificialment amb el mar Roig pel canal de Suez.

Una característica important d'aquesta regió és la poca aigua que rep, tant de rius com de precipitacions, comparada amb l'aigua que s'evapora. En primer lloc, els 10 rius més llargs que descarreguen en les aigües del Mediterrani, com el Nil, l'Ebre o el Roine, tan sols representen la meitat de la mitjana d'entrada d'aigua al Mediterrani ([Ludwig et al., 2009](#)). Quant al clima, aquest mar es troba per sobre de les zones subtropicals del nord d'Àfrica i per sota de les temperades d'Europa, i es caracteritza per estius secs i càlids i hiverns moderats. Les precipitacions, concentrades majoritàriament en uns quants mesos d'hivern i primavera, no són freqüents ni acostumen a ser intenses, de manera que tampoc suposen una important font d'aigua per a la regió. Llavors, atès que el Mediterrani no es va buidant, quelcom ha de compensar aquesta diferència entre evaporació i entrada d'aigua per rius i precipitacions: l'entrada d'aigua de l'Atlàntic. A través de Gibraltar (un estret de menys de 13 km de longitud i uns 900 metres de fondària) hi circula un gran cabal d'aigua.

Aquestes característiques fan d'aquest mar un dels més salins del món. De fet, la geometria del fons marí divideix l'extensió en dues grans zones: occidental i oriental. Separades per les aigües poc profundes del voltant de Sicília, la zona oriental és encara més salina que l'occidental, ja que l'evaporació és especialment alta en aquesta zona. Tot això produeix un gradient de pressió entre les dues meitats del mar, i ajuda al fet que tinguem lloc la característica circulació termoclina de la zona. L'aigua freda de l'Atlàntic, en poca fondària, penetra a través de l'estret de Gibraltar, avança cap a l'est a mesura que s'encalenteix i adquireix salinitat. Esdevé llavors aigua més calenta i profunda, i retorna des de la zona est del Mediterrani cap a l'oest fins a sortir de nou pel mar d'Alborán.

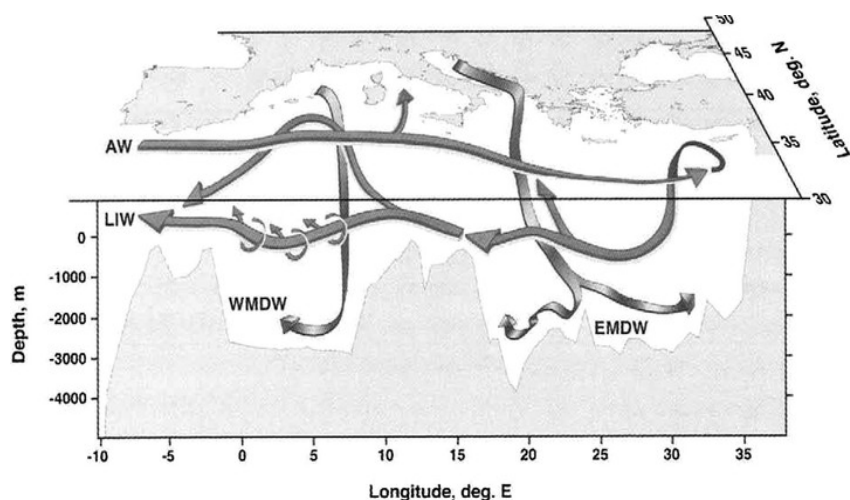


Figura 4: Representació de la circulació termoclina al Mediterrani.

A més, el mar Mediterrani és un lloc d'estudi particularment interessant perquè té un camp de mesoescala molt actiu, s'hi produeix generació d'aigua fonda i de masses d'aigua, i els camps de vents que s'hi observen són, a causa del relleu, força complexos.

Pel que fa a les onades de calor al Mediterrani, existeixen molt pocs estudis que hi facin incidència, tot i que esdeveniments passats han tingut importants repercussions. Els aspectes climàtics mencionats poden ser prou rellevants; la circulació termoclina, per exemple, pot afavorir el transport d'aigua calenta cap a una zona determinada i propiciar l'aparició d'una onada de calor en aquesta zona. Les poques precipitacions i la poca cobertura nuvolosa, per la seva part, ajuden que hi hagi una radiació constant i intensa durant els mesos més calorosos, cosa que també hi té un paper important.

Com s'ha esmentat anteriorment, una important onada de calor tengué lloc al Mediterrani l'estiu del 2003. Aquest esdeveniment, així com altres onades detectades l'any 1994 (Marbà et al., 2015), el 2006 (Bensoussan et al., 2010; Marbà & Duarte, 2010), i el 2009 (Di Camillo et al., 2013; Rivetti et al., 2014), varen conduir a un augment bruscat de la mortalitat d'organismes invertebrats: gorgònies, corals i posidònia. Això demostra la rellevància d'aquest fenomen també a la zona del Mediterrani.

1.5 Motivació i objectius de l'estudi

Considerant les implicacions de les onades de calor marines, és indiscutible la necessitat d'entendre millor aquests esdeveniments. No només realitzant un estudi tridimensional que avaluï i compari les onades produïdes en superfície i en fondària, sinó combinant diferents mètodes d'anàlisi, amb dades de satèl·lit, dades *in situ* i amb un model numèric. Així, s'intentarà respondre la pregunta principal del present estudi: com es transmeten les onades de calor superficials cap a certa fondària?

Dit d'una altra manera, i per tal d'ampliar la pregunta que ens marcam com a objectiu, ens demanem: les onades en superfície també repercuteixen a certa fondària? Sempre que es detecta una onada en superfície, fet que resulta més còmode gràcies als satèl·lits, podem concloure que també es donen temperatures anormalment altes a sota? Si no és així, pot ser que es donen fins a una certa profunditat, llavors de quin rang de fondàries crítiques estam

parlant? A més, l'evolució de les temperatures superficials i a fondària és anàleg? No només és important saber si en les dues situacions coincideixen anys amb temperatures per sobre de l'habitual, també és necessari veure si no es produeixen onades en fondària quan no se n'han produït en superfície. És a dir, a una certa fondària, hi ha diferències entre anys en què, a superfície, s'ha detectat una onada i anys en què no? I si és així, són diferències apreciables a qualsevol profunditat?

Paral·lelament, també cercam determinar si s'observa el mateix comportament en totes les zones estudiades. Tot i que la regió d'estudi és el mar Mediterrani, és possible que puguem veure diferències notòries en funció de cada zona, diferències provocades per climes diferents, per certs corrents d'aigua, etc. També volem discutir la fiabilitat del model de simulació GOTM, que s'introduirà més endavant, fins quin fonament és fiable i quins paràmetres meteorològics poden marcar diferències transcendentals en profunditat. A més, i de manera col·lateral a l'objectiu principal, intentarem concloure si l'ús de dades *SST* està justificat quan es tracta de comprendre els fenòmens tèrmics de les profunditats de mars i oceans.

2 Dades

2.1 Extracció

Les dades amb les quals es treballarà són de dos tipus diferents: arxius que contenen sèries temporals de diversos llocs de la Mediterrània preses a partir de lectures directes de la temperatura, i un arxiu de dades preses per satèl·lit dels últims 37 anys de la temperatura superficial diària de la regió d'estudi.

Les primers dades consten de 66 sèries de dades temporals d'estacions marítimes obtingudes a <http://marine.copernicus.eu>, amb l'identificador "INSITU_MED_TS_REP_OBSERVATIONS_013_041". Són 66 sèries temporals en format *netCDF* amb valors de temps i temperatura per una o varies fondàries. A més, també inclouen un valor de latitud, longitud i fondària d'on s'han pres aquests valors, així com un control de qualitat de totes les variables (temps, temperatura, posició i fondària). Totes contenen valors obtinguts amb diferents freqüències, com es mostrarà més endavant.

A més, comptam amb unes altres sèries de dades obtingudes de l'IMEDEA (Institut Mediterrani d'Estudis Avançats) i de l'IEO (Institut Espanyol d'Oceanografia), que s'han extret directament d'arxius en format *.csv*. Les primeres són dades del programa de seguiment de les praderies de Posidònia, liderat per Núria Marbà, i les segones són dades del programa de monitoratge climàtic del Centre Oceanogràfic de Balears, cedides per Juancho Movilla i Olga Reñones. Contenen una sèrie temporal i de temperatura a una fondària determinada.

Per altra banda, les dades de satèl·lit són sèries de dades de *SST* (*sea surface temperature*) en format *netCDF* també del web *Copernicus* (<http://marine.copernicus.eu>), amb l'identificador "SST_MED_SST_L4_REP_OBSERVATIONS_010_021". Aquest arxiu conté una sèrie de temperatures obtingudes per satèl·lit de tota la superfície del Mediterrani (lon=[-18.12°, 36.25°] i lat=[30.25°, 46°]). S'inclou un valor per cada dia a les 00:00 des de l'1 de gener de 1981 fins al 31 de desembre de 2018 amb una malla de resolució espacial prou bona: 0.04° x 0.04°, o el que és el mateix, 4453 x 4453 metres. És un paquet de dades que ja ha estat tractat a un nivell L4, i és el resultat d'un processat de les dades de *AVHRR Pathfinder V5.3 (PFV53)* combinades amb una versió corregida de biaix de les dades *CMEMS NRT L4*.

Per a les dades *in situ*, passam totes les sèries obtingudes a un format comú en arxius **.mat*. A cada un d'ells hi trobam la posició d'on s'han pres (en format [lon,lat]), la fondària o fondàries, amb el nom *zout* i la sèrie o sèries de temps i temperatures (en llistes *time* i *T*, respectivament). Si s'inclou un control de qualitat -en el cas de les dades d'estacions obtingudes a *Copernicus*- també s'incorpora a l'arxiu **.mat* amb el nom *variable_QC*. Així, el control de qualitat de temperatura, per exemple, té el nom *T_QC*. El grup de dades de l'IMEDEA i l'IEO no tenen cap control de qualitat, llavors només s'han inclòs les variables posició, fondària, temps i temperatura.

Així doncs, obtenim el que s'observa a la següent figura: 75 punts d'on tenim sèries temporals *in situ* repartides per tota la Mediterrània. Són els llocs concrets que podrem estudiar.

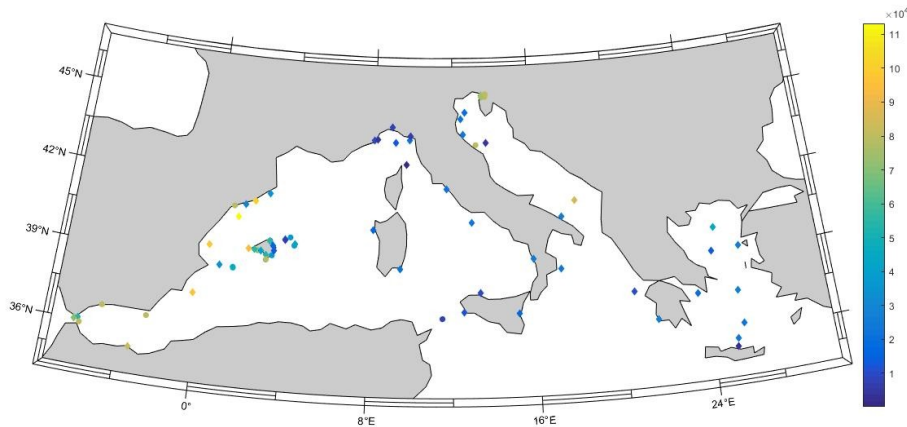


Figura 5: Les dades estan repartides per tota la Mediterrània, majoritàriament prop de la costa. Els colors indiquen el nombre de dades de la sèrie (que quasi sempre és major a 10000) i en rombes podem observar els llocs on hi ha dades a 3 metres o menys de fondària: la majoria dels casos.

De les dades *SST* agafam les sèries temporals que corresponen a les posicions més properes possibles a cada sèrie de dades *in situ*, i les guardam com arxius amb el mateix nom que els de les dades de les estacions, però acabats en “*_sst.mat”. Per això, usam el fet que les dades de satèl·lit conformen una matriu de tres dimensions, dues espacials -una malla de 1359 x 394 de tota la regió d’estudi- i una temporal. El que feim és enllaçar una de les posicions de la malla espacial (latitud i longitud) amb cada sèrie *in situ*, i extreure els valors de temps, temperatura i posició per aquest punt de la malla. Cal tenir en compte que en alguns casos les dades estan preses molt a prop de la costa, llavors el punt de la malla de dades *SST* més proper a aquestes correspon a un punt de terra, sense dades de satèl·lit. En aquests casos s’ha de cercar un altre punt al voltant per a tenir dades superficials. Aquest procediment es realitzarà una vegada s’hagi dut a terme un control de qualitat amb els arxius disponibles.

2.2 Control de qualitat

Tal com s’ha esmentat anteriorment, tant les dades *SST* com les dades *in situ* provinents d’IMEDEA i IEO no són sotmeses a un control de qualitat sistemàtic. Les primeres ja han passat per un control de nivell L4, processat AVHRR Pathfinder V5.3 i combinades amb una versió corregida de biaix de les dades CMEMS NRT L4, i les segones ja han estat revisades a cada una de les institucions que les emprava (són sèries usades en altres programes, com s’ha comentat al subapartat anterior).

Pel que fa a les dades extretes d’estacions, atès que observam irregularitats importants en les sèries, sí que és indispensable un control de qualitat més exhaustiu, basant-se primer en el propi control que duen incorporades aquestes sèries de dades (un valor entre 0 i 10 per a cada dada, representant la fiabilitat del nombre) i després en diverses passes més per a assegurar que les sèries que tractam són suficientment fiables. A cada una de les passes inspeccionam com han canviat les nostres sèries, i anam descartant les que veim que no contenen un mínim de dades en un cert temps; és a dir, eliminam les que no són aptes per a l’estudi. Per a mostrar el procés seguit, agafam l’arxiu *mo_ts_mo_ancona*, i observam com evoluciona a mesura que l’anam sotmetent a les diferents passes de les quals consta el control.

En primer lloc, i de manera prèvia, graficam les variables temperatura enfront de temps per a tots els arxius.

Començam a continuació amb un control automàtic. Llegim la variable T_{QC} i eliminam les dades de temperatura (de la llista T) a les quals els correspon un valor de T_{QC} diferent d'1. L'escala de qualitat d'aquests arxius és tal que un valor proper a 1 indica una bona dada, mentre que un valor molt alt indica una mala dada. Després d'aquests control ens quedam amb 56 arxius dels 66 inicials.

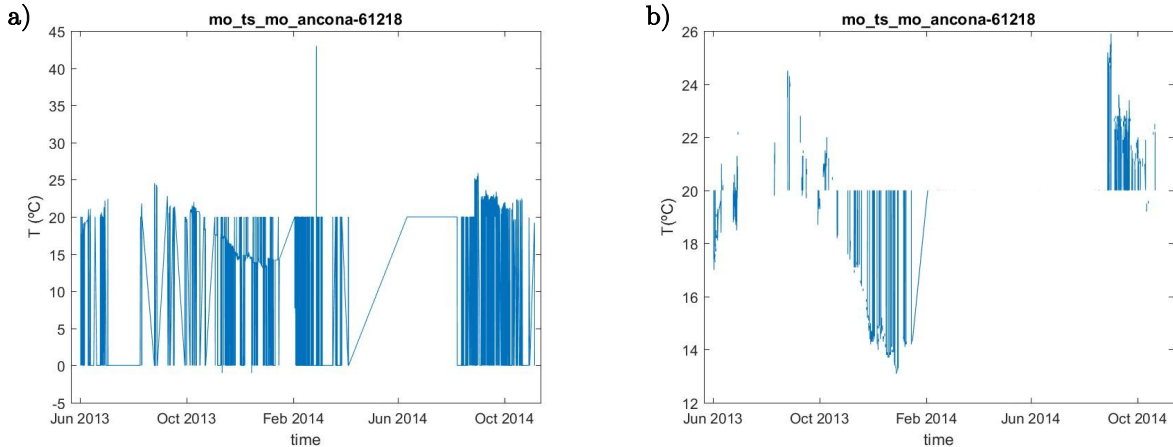


Figura 6: a) Primera inspecció visual d'una sèrie de dades de l'estació d'Ancona, a Itàlia. Observam que tenim moltes dades constants i alguna que surt del rang lògic de temperatures esperades. b) Primer control. Podem veure com han desaparegut les dades de 0°C així com altres dades il·lògiques, però encara tenim un gran nombre de valors constants que caldrà suprimir.

Seguidament, i atès que en alguns arxius, sobretot per a dades preses prop d'Itàlia -com a l'exemple, Ancona-, trobam un gran nombre de valors constants (normalment 20°C) que no s'adeqüen als valors reals, passam a suprimir aquests valors que no tenen sentit. Per a fer-ho realitzam un histograma del nombre de dades repartides dins tot el rang de temperatures. Si un cert valor constant es repeteix més del compte notarem un pic a l'histograma, i eliminarem les dades en qüestió. Després d'aquest control, ens quedam amb 46 arxius dels 56 que teníem.

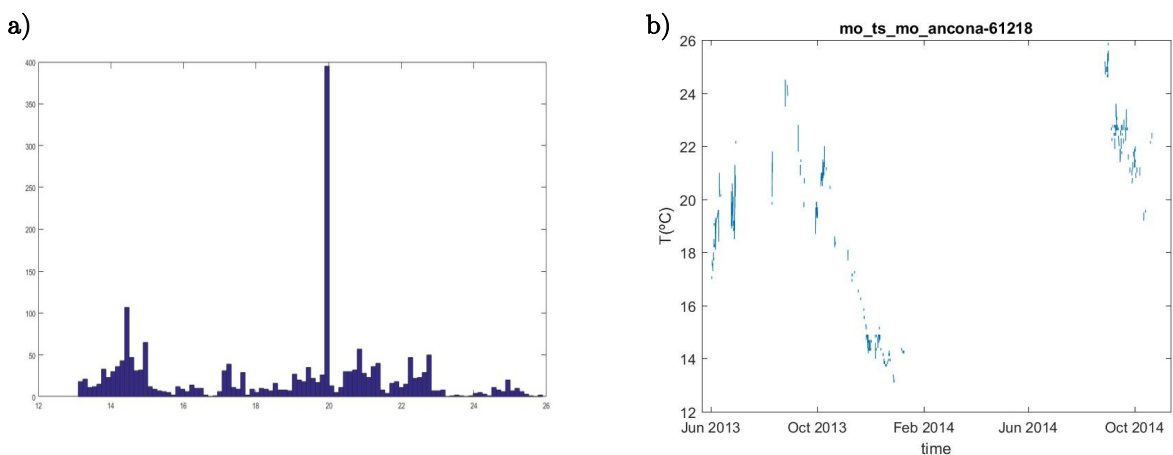


Figura 7: Segon control. a) L'histograma indica una abundància anormal de dades de 20°C. b) Resultat d'eliminar aquestes dades. En aquest cas, tenim molt poques dades en només dos anys, de manera que deixarem de tractar aquest arxiu.

Seguidament, suprimim també bots pronunciats i dades inversemblants. Si després del segon control acceptam l'arxiu, encara és possible que contengui dades a temperatures extremes i no realistes, aquelles que desentonen enormement de la tendència de les dades, i que són molt diferents a la dada anterior i posterior, les quals s'han d'eliminar. Per a tal propòsit, cerquem el gradient de temperatura de cada punt (quocient entre la diferència de valors de temperatura consecutius i els seus respectius temps). Si el resultat és major 10 °C/dia, consideram que es tracta d'un bot irreal i se suprimeix la dada. Per exemple:

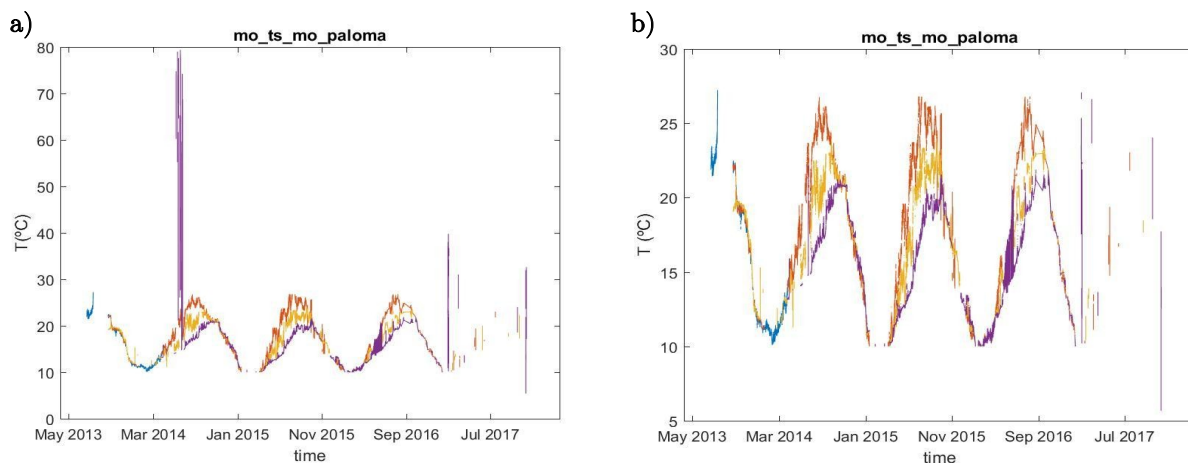


Figura 8: Tercer i últim control. a) Abans de passar el control. b) Després de passar-lo. Les dades inversemblants (com en aquest cas, les de 70 i 80 °C al 2014) s'eliminen perquè suposen bots massa grans com per a ser reals.

Així doncs, després de tot el procediment esmentat, ens quedam amb 54 sèries de dades que contenen temps, temperatura, posició i fondària:

Taula 1

	Nom de l'arxiu	Longitud	Latitud	Fondària/es	Durada (dies)	Freqüència mostreig (hores)
1	CALA D'OR	3,2389	39,368	7	4647	172
2	CALA TORRETA	1,428	38,792	7	4517	140
3	ILLETES	1,4394	38,761	7	4872	148
4	MAGALUF	2,5404	39,504	7	5361	114
5	POLLENÇA	3,098	39,901	7	2033	154
6	STA MARIA	2,9696	39,193	7	2554	110
7	T_Menorca_Aire	4,2886	39,8	5 10 15 20 25	1602	60
8	T_Menorca_Porros	4,0739	40,092	5 10 15 20 25 30 40	1603	60
9	ir_ts_mo_61198	-2,32	36,569	3	6135	78
10	ir_ts_mo_61280	1,467	40,683	3	4881	66
11	ir_ts_mo_61281	2,05	39,516	3	4462	69
12	ir_ts_mo_61417	-3,27	37,651	3	4185	65
13	ir_ts_mo_61430	2,102	39,555	3	3062	73
14	ir_ts_mo_barcelona-coast-buoy	2,2	41,32	0,5	5031	75
15	ir_ts_mo_ceuta-coast-buoy	-5,33	35,903	0,5	1411	64
16	ir_ts_mo_malaga-coast-buoy	-4,415	36,692	0,5	2797	65
17	ir_ts_mo_melilla-coast-buoy	-2,944	35,327	0,5	2833	63
18	ir_ts_mo_tarifa-coast-buoy	-5,59	36	0,5	3176	76
19	ir_ts_mo_tarragona-coast-buoy	1,19	41,07	0,5	1815	63
20	mo_ts_mo_6101022	11,5	37,284	400	8752	1440
21	mo_ts_mo_6101628	13,672	45,603	0,5	1391	61
22	mo_ts_mo_6101629	13,535	45,602	0,5	1391	61
23	mo_ts_mo_61141	0,78367	38,825	0 1	1558	70
24	mo_ts_mo_61277	25,131	35,726	-3 0 1 5 10 15 20 25 30 35 40 50 75 100 250 400 600 1000	3870	237
25	mo_ts_mo_61499	2,7004	39,493	1 1.5 1.6 1.7 1.8 1.9 2	2066	72
26	mo_ts_mo_68422	21,607	36,829	-3 0 1 20 50 75 100 250 400 500 600 1000	3705	198
27	mo_ts_mo_alghero-61213	8,1069	40,549	0	421	37
28	mo_ts_mo_andratx	2,383	39,546	0	2405	63
29	mo_ts_mo_athos	24,729	39,975	1 3 5 10 15 20 30 40 45 50 60 75 100	6429	208

30	mo_ts_mo_catania-61207	15,147	37,434							0								579		48
31	mo_ts_mo_cetraro-61211	15,917	39,451							0								579		32
32	mo_ts_mo_ciudadella	3,8312	40							0	5	6						1200		64
33	mo_ts_mo_colonia-sant-pere	3,2734	39,737							0								791		71
34	mo_ts_mo_koper	13,724	45,548							1								4748		13
35	mo_ts_mo_laspezia-61219	9,8278	43,929							0								576		37
36	mo_ts_mo_lesvo	25,807	39,156							3	10	20	30	35	40	45		4198		236
37	mo_ts_mo_molo-bandiera	13,752	45,649							0.4		2			6			1641		11
38	mo_ts_mo_mykon	25,46	37,519							3	10	20	30	35	40	45		6145		333
39	mo_ts_mo_nadr-e1	12,57	44,143							1.6		8.5						485		30
40	mo_ts_mo_nadr-sl	12,456	44,741							1.5		19.5						455		30
41	mo_ts_mo_nadr-sng	13,209	43,755							1.5								834		10
42	mo_ts_mo_obsea	1,7523	41,182							-3		21						1439		73
43	mo_ts_mo_paloma	13,565	45,618							0	3	15	24					1638		13
44	mo_ts_mo_pollensa	3,0885	39,905							0								2406		61
45	mo_ts_mo_porto-cristo	3,3351	39,539							-1.271		0						670		69
46	mo_ts_mo_sa-rapita	2,9533	39,36							0								2432		64
47	mo_ts_mo_santo	25,501	36,262							3	10	20	30	35	40	45		3649		236
48	mo_ts_mo_saron	23,562	37,598							0		3						3779		269
49	mo_ts_mo_skyro	24,464	39,113							3								1786		188
50	mo_ts_mo_venezia-61220	12,663	44,973							0								579		41
51	mo_ts_mo_vida	13,551	45,549							2.5								1659		31
52	mo_ts_mo_wlm3a	9,1047	43,82							1	6	12	20	29	36			4944		547
53	mo_ts_mo_zakyn	20,604	37,956							3								1537		237
54	tmn_foradada	2,9787	39,205							10	20	25	30	40				3650		66

Taula 1: Les 54 sèries de dades a estudiar, així com la seva posició (longitud i latitud), fondàries, durada total i freqüència de mostreig. Ressaltades en verd observem les sèries de dades proporcionades per IMEDEA, en vermell les de l'IEO i en blau, les extretes del web de Copernicus (<http://marine.copernicus.eu>).

En aquest mapa podem apreciar com estan repartides al llarg de la Mediterrània les 54 sèries de temperatures que s'estudiaran, sobre el mapa de temperatures proporcionat pel satèl·lit:

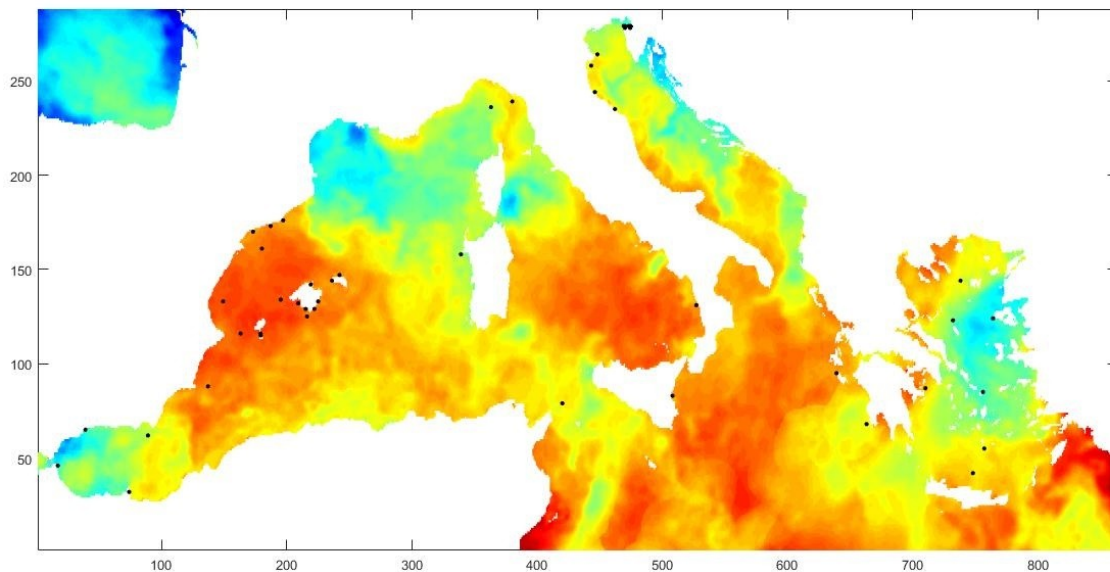


Figura 9: Els punts negres marquen les posicions on tenim arxius *in situ* al llarg del Mediterrani, enllaçats a sèries de dades de satèl·lit.

Per a major comoditat, una vegada s'han determinat les estacions definitives amb les quals es treballarà, s'ha realitzat la mitjana diària de les sèries de temperatures *in situ*, tot i que les dades *SST* són dades nocturnes, no una mitjana diària. D'aquesta manera, malgrat introduïm un petit error addicional, feim coincidir la freqüència de mostreig *in situ* amb la de les dades *SST*, la qual cosa suposa un avantatge a l'hora de treballar amb les dues sèries combinades.

3 Mètode

3.1 Detecció d'onades

Entenem una onada de calor com un període prolongat en el qual la temperatura d'una certa extensió d'aigua és anormalment alta. Això, primerament, ens alerta d'una característica necessària per a considerar un esdeveniment com una onada de calor: ha de ser prolongat en el temps. Llavors, cal no incloure en la definició d'onada de calor alguns pics discrets de temperatura que es puguin donar de manera aïllada, encara que aquests pics siguin, en efecte, temperatures anormalment altes.

Per a diferenciar, doncs, el que considerarem una onada de calor d'un simple augment transitori de la temperatura, que no dura suficientment com per a causar un impacte important, fixam la durada mínima de les onades en 5 dies (Hobday et al., 2016). Considerarem temperatures característiques de les onades de calor aquelles que se situïn per sobre del percentil 99 dels valors de temperatura de la sèrie en qüestió. És a dir, si ordenàssim les temperatures registrades de menor a major, els dies candidats a ser reconeguts com a pertanyents a una onada serien aquells en què s'haguessin registrat temperatures pertanyents a l'1% dels valors més alts. Aquest ús del percentil 99 com a referència és molt viable perquè permet tenir en compte les temperatures locals del lloc d'estudi, en contraposició a una temperatura absoluta com a referència.

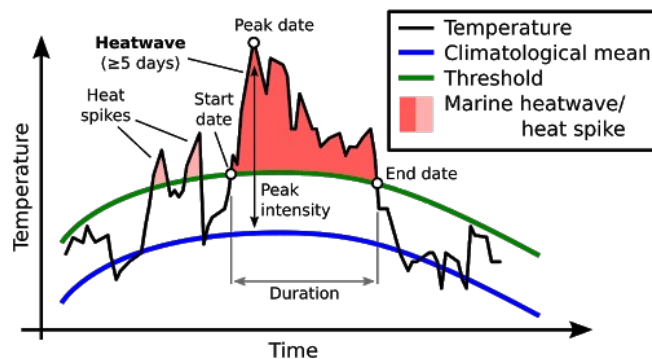


Figura 10: Exemple de detecció d'onada de calor (<http://www.marineheatwaves.org/all-about-mhws.html>).

A més, també es tindrà en compte la possibilitat que, mentre dura un esdeveniment, hi hagi uns pocs dies amb temperatures inferiors al percentil (*gaps*). Si detectam dos períodes de 4 dies cada un amb temperatures majors al percentil 99, separats només per un sol dia de *gap*, llavors tot l'esdeveniment en conjunt pot considerar-se una onada de calor, i això és el que cercam amb aquesta puntualització. Per a considerar un esdeveniment amb *gaps* com a onada de calor, es requerirà un màxim de 2 dies seguits de *gap* i un mínim de 5 dies amb temperatures superiors al percentil; no un mínim de 5 dies totals de l'esdeveniment.

Donada una sèrie de temps-temperatures, es començarà per detectar aquelles temperatures superiors al percentil 99, els respectius temps i s'inclouran en una primera llista.

D'entre aquesta llista se cercaran aquells elements tals que els 3 valors anteriors de temps del conjunt original no estan dins la nova llista. D'aquesta manera detectam punts en el temps que determinen l'inici d'un esdeveniment (descartant aquells valors que, tot i correspondre a una T superior al percentil, no poden ser l'inici de cap esdeveniment, perquè la dada

immediatament anterior també forma part d'un esdeveniment, tenint en compte que 2 dies de *gap* són permesos) i els incloem a una segona llista. Paral·lelament, es fa el mateix amb aquells elements tals que els 3 valors posteriors del conjunt original no estan dins la nova llista, i creem així una llista de finals d'esdeveniment.

Finalment, només manca comprovar per a cada esdeveniment si el nombre de dies amb temperatura superior al percentil 99 és major a 5.

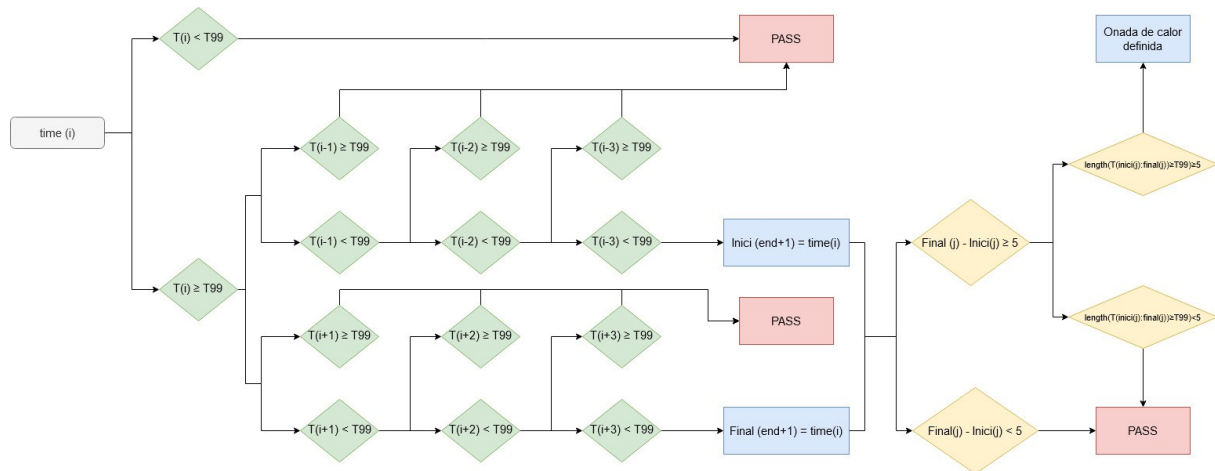


Figura 11: Esquema del procés seguit per a detectar onades. Els rombes són condicions que poden o no complir les temperatures estudiades, i els rectangles són conclusions a partir d'aquestes condicions. En verd s'ha marcat el procés de selecció d'inicis i finals d'esdeveniment, i en groc el procés per a determinar si cada esdeveniment conforma una onada o no.

3.2 Paràmetres per a caracteritzar les onades de calor

Per a cada onada de calor detectada amb l'algorisme anterior, cercam el màxim valor de temperatura, la durada de l'onada, la intensitat (integral de la temperatura per sobre del percentil 99; és a dir, la temperatura excedida del percentil 99 multiplicat pel temps) i el tant per cent de dies que s'ha superat la temperatura llindar durant l'onada. Donada la gran quantitat de dades de què disposem, en aquest apartat només es farà referència a les estacions de la Mediterrània occidental (longitud= $[-8^{\circ}, 12^{\circ}]$).

Primerament, emprarem un codi per a estudiar si hi ha hagut onades de calor als arxius *in situ* durant els anys en que n'hem detectat amb les dades de satèl·lit, aplicant el procediment descrit al subapartat anterior. Evidentment, el percentil 99 que marcarà el llindar de temperatures crítiques serà diferent en cada sèrie *in situ* i en les *SST*, per tal de determinar augments tèrmics relatius a les temperatures de cada sèrie. Els resultats es guarden en matrius que contenen 6 llistes, una per cada paràmetre que caracteritza les onades, a més de les dates d'inici i final de cada esdeveniment.

A banda, cercam onades de calor *in situ* sense tenir en compte quan hi ha hagut esdeveniments en superfície, per tal de trobar-ne en anys on no n'hi hagi segons les dades de satèl·lit: trobar-ne moltes ens portaria a observar de manera fonamentada que no només existeixen onades a certa fondària quan n'hi ha en superfície. Amb la totalitat de les onades detectades a cada zona podrem estudiar-les individualment (valent-nos, sobretot, d'aquells arxius amb diverses fondàries) per a determinar com repercuteixen en el fons marí les onades detectades prop de la superfície.

3.3 Índex de comparació

Per tal de realitzar un estudi concret de com es transmet una onada de calor a fondària en cada cas particular, es defineix un índex que quantificarà en quina mesura es donen temperatures altes (propícies a onades) en fondària, en dies d'onada de calor en superfície.

La idea es basa en un histograma de les temperatures registrades per una certa estació a una fondària determinada; així dividim el rang de temperatures en -per exemple- 50 intervals i observem quants de valors de temperatura s'han registrat dins cada interval. Llavors cream un altre histograma només amb les dades corresponents a dies amb onades registrades pel satèl·lit (en superfície). Si aquests valors cauen als intervals superiors del primer histograma significarà que quan el satèl·lit identifica una onada de calor, les temperatures en fondària també són extremes, i per tant hi ha una bona transmissió de l'onada en fondària. Per contra, si els dies que segons les *SST* ha existit una onada, les temperatures en fondària no són especialment altes, les trobarem repartides en distints percentils de l'histograma.

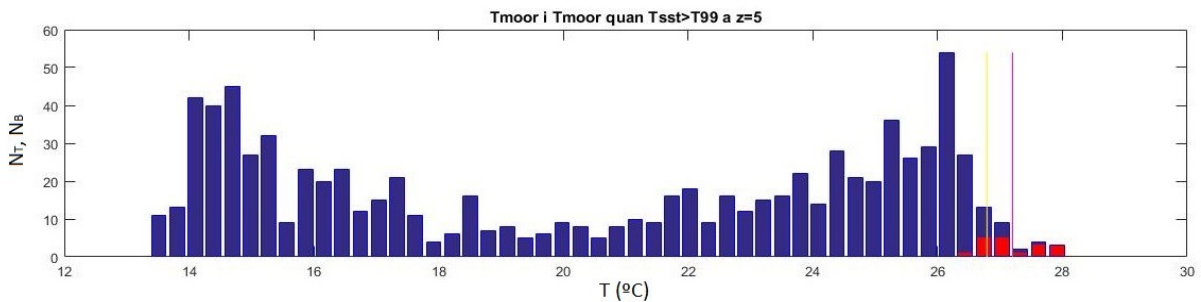


Figura 12: Histograma de les temperatures de l'estació Sa Foradada a 5 metres de profunditat. En taronja s'observen les temperatures de dies en què hi ha hagut pics en superfície. És una bona transmissió de calor.

L'índex que ens indicarà numèricament aquest fet, amb un valor entre 0 i 1, on 0 indica una molt bona transmissió i 1 una molt dolenta, és:

$$ind = \sqrt{\frac{\sum (N_T - N_B)^2}{\sum N_T^2}}$$

N_T és una llista amb la quantitat de dades registrades en cada interval (altura de les barres blaves a la Figura 12) i N_B és la quantitat de dades de cada interval corresponents als dies amb onades de calor en superfície (altura de les barres taronges a la Figura 12). Per realitzar el càlcul, només s'han de tenir en compte els *bins* rellevants: des d'aquell on hi cau la primera dada en una dia d'onada fins al darrer. A l'exemple anterior, només prendríem els 6 darrers *bins*. Si hi hagués una dada, per exemple, al bin 40 (de 50), llavors hauríem de prendre els 11 darrers *bins*. De no fer-ho així, tendríem en compte tota la distribució i això faria augmentar l'índex de manera no desitjada.

3.4 Simulació GOTM

Paral·lelament a l'estudi de les dades proporcionades per les estacions es realitzarà un conjunt de proves amb el model de simulacions GOTM (*General oceanic turbulence method*), que consisteix en el modelatge en una dimensió d'una columna d'aigua (Burchard, Bolding, & Ruiz-Villarreal, 1999). Aquest model numèric es basa en una biblioteca de models de

turbulència per a estudiar i quantificar fenòmens hidrodinàmics, usant fluxos aire-mar i condicions meteorològiques donades. Dins les opcions que ofereix un model com GOTM, figuren la possibilitat de canviar una gran quantitat de paràmetres: equacions d'estat, de turbulència, condicions de contorn, mètodes per a calcular els fluxos de calor entre aire i mar o la radiació de fons i un llarg etcètera, a banda de la possibilitat de simular en qualsevol lloc del món, triar les dates d'inici i final, la fondària, l'estratificació i el nombre de nivells d'aigua. En definitiva, una llarga llista de paràmetres que poden variar (en major o menor mesura) el resultat de la simulació.

Per al present estudi es requereix un fitxer per a cada una de les estacions a estudiar on s'hi inclouen les dades climàtiques necessàries pel simulador (punt de rosada i temperatura a 2 metres, pressió al nivell del mar, velocitat de vent en direcció x i y a 10 metres i cobertura de núvols). Aquests valors s'han extret del re-anàlisi atmosfèric ERA5, de resolució espacial i temporal de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ i 1 hora respectivament, i que es troba a la pàgina de *Copernicus* <https://cds.climate.copernicus.eu/#!/home>.

Per altra banda, també és necessari facilitar al GOTM uns perfils inicials de temperatura i salinitat, per a proporcionar al programa els valors de temperatura i estratificació amb els quals ha de començar, i a partir d'aquests, anar variant segons el flux de calor i les condicions atmosfèriques ja esmentades, així com la fondària i un seguit de paràmetres que podrem controlar. Per això, prenem alguna de les sèries d'estudi i reproduïm les temperatures i la salinitat a diferents fondàries amb el format que requereix GOTM.

Amb aquests arxius, als que recorrerà el model, feim algunes proves amb diferents combinacions de paràmetres; llavors determinam la millor combinació d'aquests comparant els resultats. Les proves s'han realitzat per a un perfil tèrmic de Pollença a una fondària de 2.5 metres comparant amb el corresponent *mooring*.

En primer lloc, variam la fondària de la columna d'aigua simulada, i comprovam si això canvia el resultat d'una fondària específica. Seguidament, provam 4 combinacions per a calcular el flux d'aire-mar. Els dos paràmetres que combinam modifiquen el mètode de càlcul de flux i de radiació de fons: el primer nombre indica el càlcul de flux; val 1 si el flux es calcula segons [Kondo \(1975\)](#) i 2 si es calcula segons [Fairall et al. \(1996\)](#); el segon nombre val 2 si la radiació de fons es calcula segons [Hastenrath & Lamb \(1978\)](#) i 3 si es calcula segons [Bignami et al. \(1995\)](#). En tercer lloc, combinam els paràmetres per a calcular la turbulència, els quals es resumeixen en la següent taula:

Taula 2

Índex	Modifica el càlcul de...	Valor	Mètode
1r	Turbulència	2	Defineix una turbulència a partir de la <i>TKE</i> i la longitud d'escala (índex 2 i 3)
2n	Energia cinètica de les turbulències (<i>TKE</i>)	2	Equació dinàmica (estil k- ϵ)
		3	Equació dinàmica (Mellor-Yamada)
3r	Longitud de l'escala	9	Equació dinàmica de Mellor-Yamada q^{21}
		10	Escala de longitud genèrica (GLS)
4t	Estabilitat	3	Segons Schumann & Gerz (1995)
		4	Segons Eifler & Schimpf (1992)

Finalment, cercam diferències si donam al model dos perfils inicials diferents.

Les esmentades proves, per a determinar els paràmetres que volem establir per al model, es resumeixen en la següent figura:

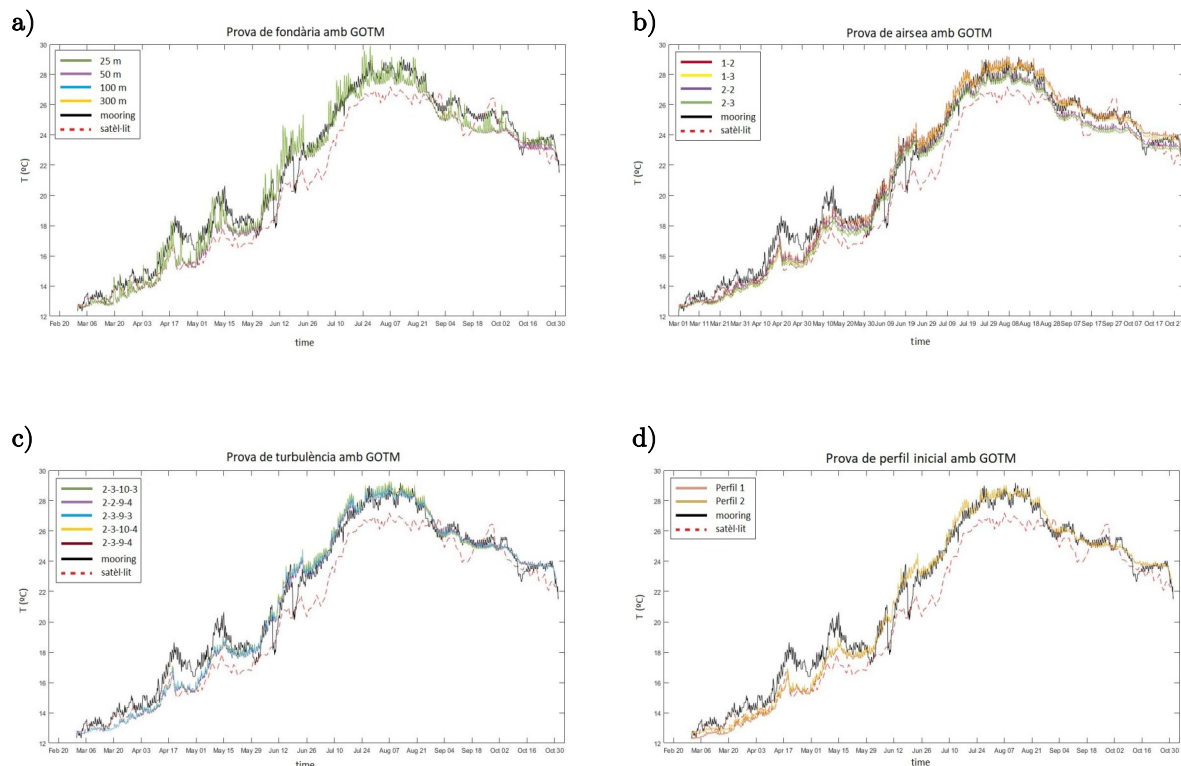


Figura 13: Simulacions de GOTM a 2.5 metres de fondària a Pollença ($lon=3.098^\circ$, $lat=39.900^\circ$): a) Diverses fondàries, b) càlculs diferents del flux aire-mar, c) esquemes de turbulència i d) dos perfils inicials. En totes les gràfiques s'inclouen les dades reals *in situ* (línia negra) i les dades superficials de satèl·lit (línia vermella puntejada) i diverses combinacions de paràmetres.

Al primer gràfic, observam que amb 25 metres de fondària total hi ha alguns punts en que T es manté quan realment hi ha una baixada significativa. Les altres fondàries són quasi idèntiques, de manera que, per a estalviar temps de computació, prendrem 50 metres.

A la gràfica de flux aire-mar, determinam la combinació 1-3 com la millor. És a dir, calcularem el flux segons [Kondo \(1975\)](#) i la radiació de fons segons [Bignami et al. \(1995\)](#).

Quant a la turbulència, concloem que podem usar la combinació 2-3-9-4 (en vermell al gràfic), que és molt semblant a la verda però ambdues s'acosten més a la realitat que les altres.

Finalment, la prova amb diferents perfils determina que no hi ha diferència significativa entre dos perfils distints més enllà de les discrepàncies inicials.

4 Resultats

4.1 Caracterització de les onades de calor marines

Primerament, s'han cercat onades de calor segons les *SST* i onades detectades a certa fondària, amb les dades *in situ*. Per tal de realitzar les gràfiques, es dibuixen les dades per sobre del percentil 99 en vermell i s'inclouen barres verticals verdes i blaves per a il·lustrar els dies d'inici i final de les onades, respectivament. Per exemple, podem observar què obtenim pel cas de l'illa Foradada de Cabrera:

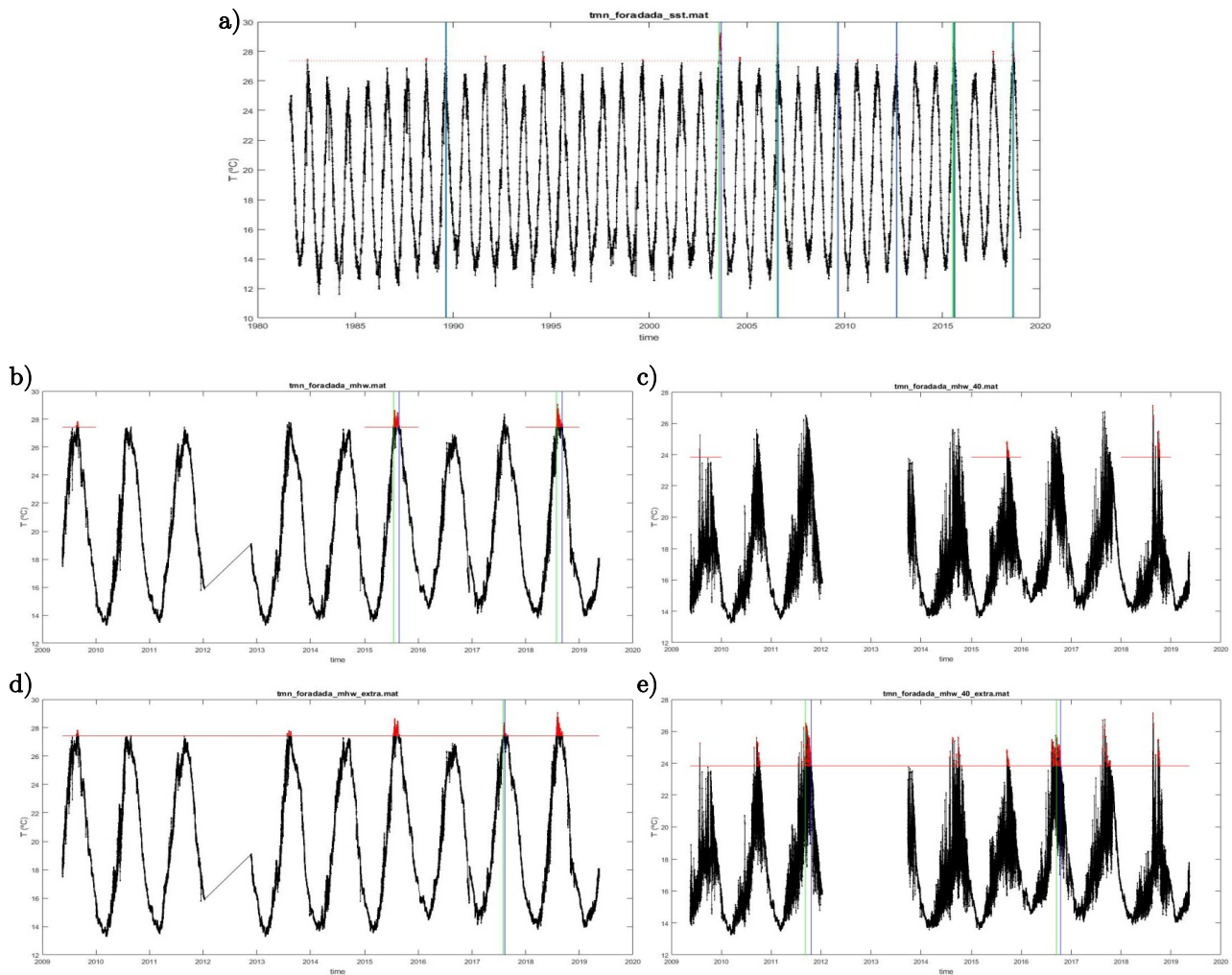


Figura 14: Gràfiques de temperatura de l'estació *tmn_foradada*, a Sa Foradada, Cabrera. a) Onades de calor detectades per satèl·lit. b) i c) Onades detectades *in situ* els mateixos anys que el satèl·lit a 10 m i a 40 m, respectivament. d) i e) Onades *in situ* en anys sense onades detectades per satèl·lit a 10 m i 40 m.

El satèl·lit detecta una onada l'any 1989 i un patró de repetició cada 3 anys des del 2003. Amb les dades *in situ* a 10 metres, observam onades de calor en 2 dels 3 anys en què hi ha onades segons les *SST* (dels anys en què tenim dades per a estudiar) i una onada extra el 2017. De totes maneres, aquesta onada és de durada menor a les altres dues, per tant tot indica una bona transmissió de calor a aquesta fondària. En canvi, a 40 metres el

comportament és notòriament diferent: no detectam cap onada en els tres anys a estudiar i, en canvi, en detectam dues extremes -en anys en què no se n'han donat en superfície-. Llavors, no detectam una correspondència estricta entre temperatures superficials i a 40 metres.

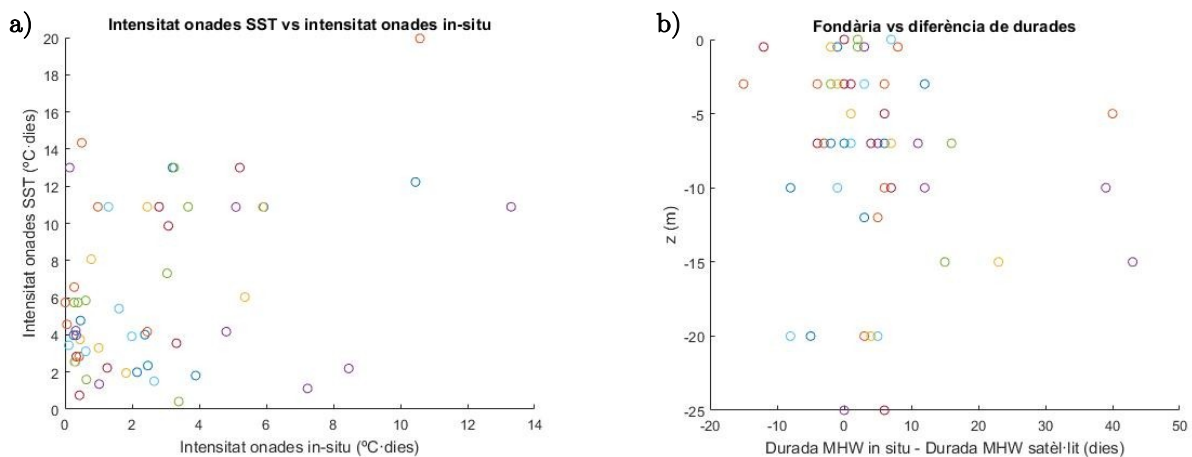
En aquesta taula podem veure el que passa en algunes estacions amb diverses fondàries. S'han inclòs les 5 estacions que combinen millor la durada de la sèrie i el nombre de fondàries que contenen. El que es mostra a la taula és la fracció dels anys amb onades detectades per satèl·lit en què també s'han detectat onades *in situ* (1/3 significaria que dels 3 anys en què hi ha onades en superfície, només en 1 n'hi ha a la fondària en qüestió), així com la quantitat d'onades detectades *in situ* a cada fondària en anys sense onades segons les *SST* :

Taula 3: Relació anys amb onades <i>in situ</i> respecte anys amb onades <i>SST</i> {onades extremes}								
Estació	Fondària (m)							
	(0, 5]	(5, 10]	(10, 15]	(15, 20]	(20, 25]	(25, 30]	(30, 40]	>40
tmn_foradada	X	2/3 {0}	X	2/3 {0}	1/3 {1}	0/3 {2}	0/3 {1}	X
T_Menorca_Aire	0/2* {0}	1/2 {0}	1/2 {0}	1/2 {1}	0/2 {1}	X	X	X
T_Menorca_Porros	1/1 {0}	1/1 {0}	1/2 {0}	1/1 {0}	0/2 {1}	0/2 {1}	0/2 {1}	X
mo_ts_mo_61277	1/1 {0}	X	X	0/1 {1}	X	X	X	1/2 {1}
mo_ts_mo_68422	1/3* {0}	X	X	1/3 {0}	X	X	X	1/2 {1}

Taula 3: Fracció d'anys amb onades a certa estació i fondària respecte anys amb onades superficials a la mateixa posició. Entre claus, onades detectades *in situ* en anys sense onades superficials. Estan marcats amb un asterisc aquells casos que, tot i tenir valors baixos, tenen pics de temperatura *in situ* els mateixos anys que en *SST*, però no arriben a considerar-se onades per qüestió de durada.

Com podem veure, mentre que als primers 15 metres no s'ha detectat ni una sola onada de calor en fondària durant algun estiu en què no s'hagi detectat en superfície, a partir de 20, i sobretot 25 metres, la cosa canvia. Apareixen onades en anys on no s'esperen i, a més, deixen d'aparèixer-ne en aquells períodes on s'espera veure'n (vegi's els resultats de les estacions de Sa Foradada, i les illes d'Aire i Porros de Menorca entre 20 i 40 metres).

Per altra banda, realitzam gràfiques comparatives entre satèl·lit i *in situ* dels paràmetres que caracteritzen les onades. Obtenim el següent resultat:



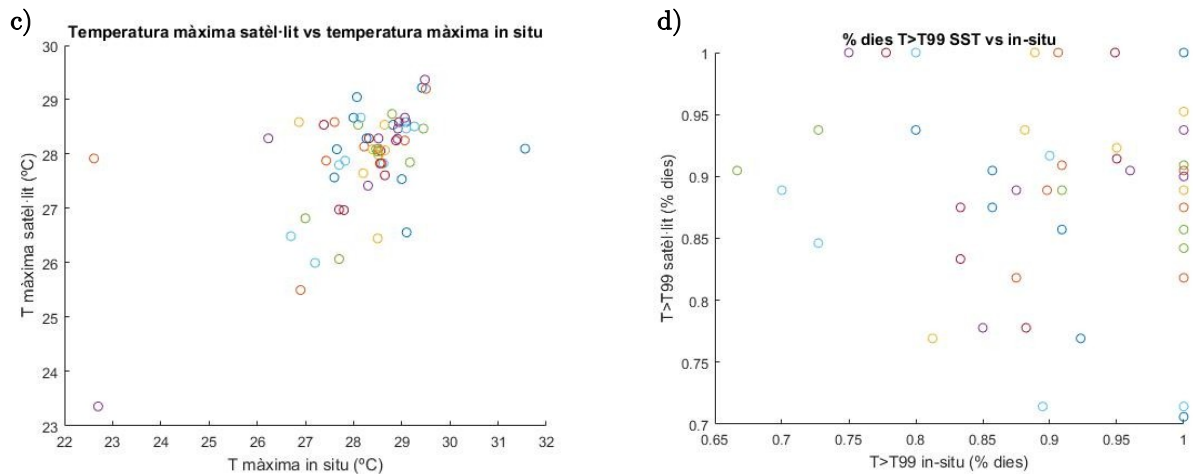


Figura 15: Comparació de diferents paràmetres característics de les onades detectades amb *SST* i *in situ* (totes les fondàries de tots els arxius). a) Comparació de les intensitats de les onades detectades amb els dos mètodes els mateixos anys. b) Diferència entre durades segons la fondària de l'estació *in situ*. c) Comparació dels pics de temperatura de cada onada. d) Percentatge de dies de cada esdeveniment per sobre del percentil 99

El gràfic comparatiu de temperatures màximes és el que ens proporciona una major linealitat entre els dos grups de dades, la qual cosa indica que els pics de temperatures en superfície solen anar lligats a pics de temperatura en fondària.

Ara bé, les durades, per la seva banda, semblen completament aleatòries: els esdeveniments en superfície ocorren en períodes de dies que poden ser majors o menors que els que s'observen en fondària. En general, hi ha més esdeveniments que duren més en fondària que en superfície (diferència de durades positiva). La gràfica no ens permet atribuir les diferències a la profunditat, ja que, tot i que les estacions a menys de 5 metres no difereixen en més de 15 dies de durada, a 5 metres ja trobam una diferència de quasi 40 dies, així com a 10 i 15 metres. I a més, les estacions més fondes amb coincidència d'onades el mateix any que el satèl·lit, a 20 i 25 metres, mostren diferències de durades inferiors als 10 dies. De la mateixa manera, el percentatge de dies en cada esdeveniment amb temperatures per sobre del percentil és molt arbitrari, i indica de nou que la transmissió de calor no ocorre sempre.

Les intensitats, per la seva part, semblen revelar una certa relació entre esdeveniments poc intensos en superfície i poc intensos en fondària. Tot i així, tenim un grapat de casos poc intensos segons unes dades i molt més intensos segons les altres; no podem identificar una correlació gaire rellevant.

4.2 Cas d'estudi: Sa Foradada

Els resultats observats en diferents estacions són molt semblants, de manera que ens centram en una estació concreta per a fer un anàlisi exhaustiu i detallat: Sa Foradada.

Primerament, realitzam una observació de les sèries de temperatures en diferents anys, en alguns dels quals s'han detectades onades en superfície i en d'altres no. Per a cada fondària podem veure un gràfic de les temperatures, i remarcades en vermell aquelles corresponents als dies en els quals la temperatura superficial s'ha detectat per sobre del percentil 99. A banda, realitzam l'histograma de temperatures talment com s'ha indicat a *Mètode*, que va estretament lligat a l'índex que calculam.

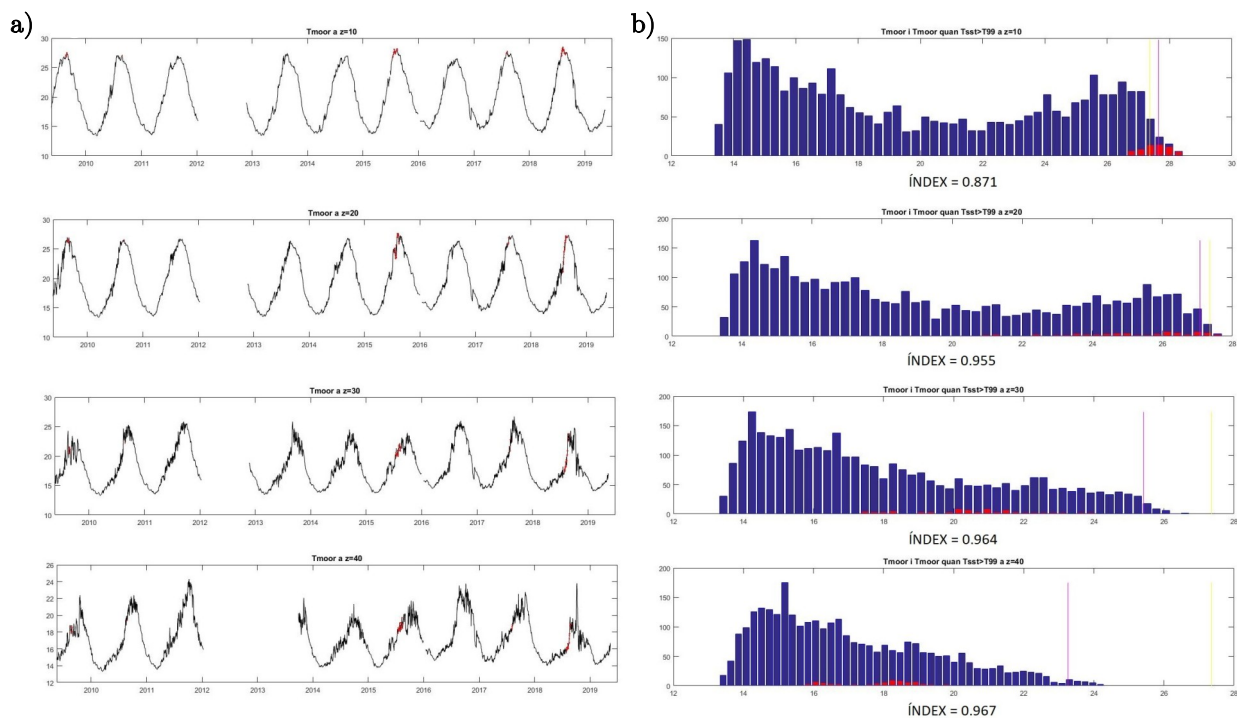


Figura 16: a) Sèries tèrmiques en fondàries de 10, 20, 30 i 40 metres, de dalt a baix. Observam ressaltats en vermell les temperatures de dies en què les dades superficials es troben per sobre del corresponent percentil 99. b) Histogrames i índex per a cada fondària, seguint el mètode explicat a l'apartat 3.3

És evident que l'excés de calor es propaga només a les primeres fondàries. Observant l'histograma, així com a 10 metres les temperatures en dies d'onades en superfície (*bins* taronges) es concentren a la part alta de l'histograma de totes les temperatures (*bins* blaus), ja a 20 metres es reparteixen molt més, i a fondàries majors es troben entre les temperatures mitjanes.

A la taula següent es recullen tots els índex obtinguts de les mateixes estacions que al subapartat anterior. Aquest índex, com ja s'ha mencionat anteriorment, pren valors entre 0 i 1, on 0 reflectiria una excel·lent transmissió de les anomalies superficials cap a la fondària en qüestió, i 1 significaria una transmissió nul·la:

Taula 4: Índex comparatiu per a diferents estacions								
Estació	Fondària (m)							
	(0, 5]	(5, 10]	(10, 15]	(15, 20]	(20, 25]	(25, 30]	(30, 40]	>40
tmn_foradada	X	0.871	X	0.955	0.959	0.964	0.967	X
T_Menorca_Aire	0.565	0.926	0.933	0.946	0.958	X	X	X
T_Menorca_Porros	0.867	0.919	0.897	0.931	0.950	0.955	0.955	X
mo_ts_mo_61277	0.979	X	X	0.992	X	X	X	0.979
mo_ts_mo_68422	0.899	X	X	0.920	X	X	X	0.959

Taula 4: Valors dels índex de comparació per a 5 estacions diferents i les corresponents fondàries.

S'observa la tendència de l'índex a augmentar a mesura que la fondària augmenta, la qual cosa dona suport a la idea que ja s'havia comentat que la transmissió només és prou bona en

els primers metres. Cal tenir en compte que, com passa a la menor profunditat de l'estació *mo_ts_mo_61277*, hi ha vegades en que, per culpa d'una sola dada de temperatura que no cau en els bins més alts de l'histograma, el resultat de l'índex augmenta notòriament i veim un valor que no reflecteix ben bé el que s'observa. A l'estació esmentada, la transmissió és prou bona i totes les dades en dies d'onada en superfície se situen als 5 bins majors, excepte aquesta dada, que fa que l'índex no indiqui una bona transmissió.

4.3 Simulació GOTM

Per a observar el funcionament del model, representam les simulacions de l'estació Sa Foradada entre els mesos de juny i novembre del 2015:

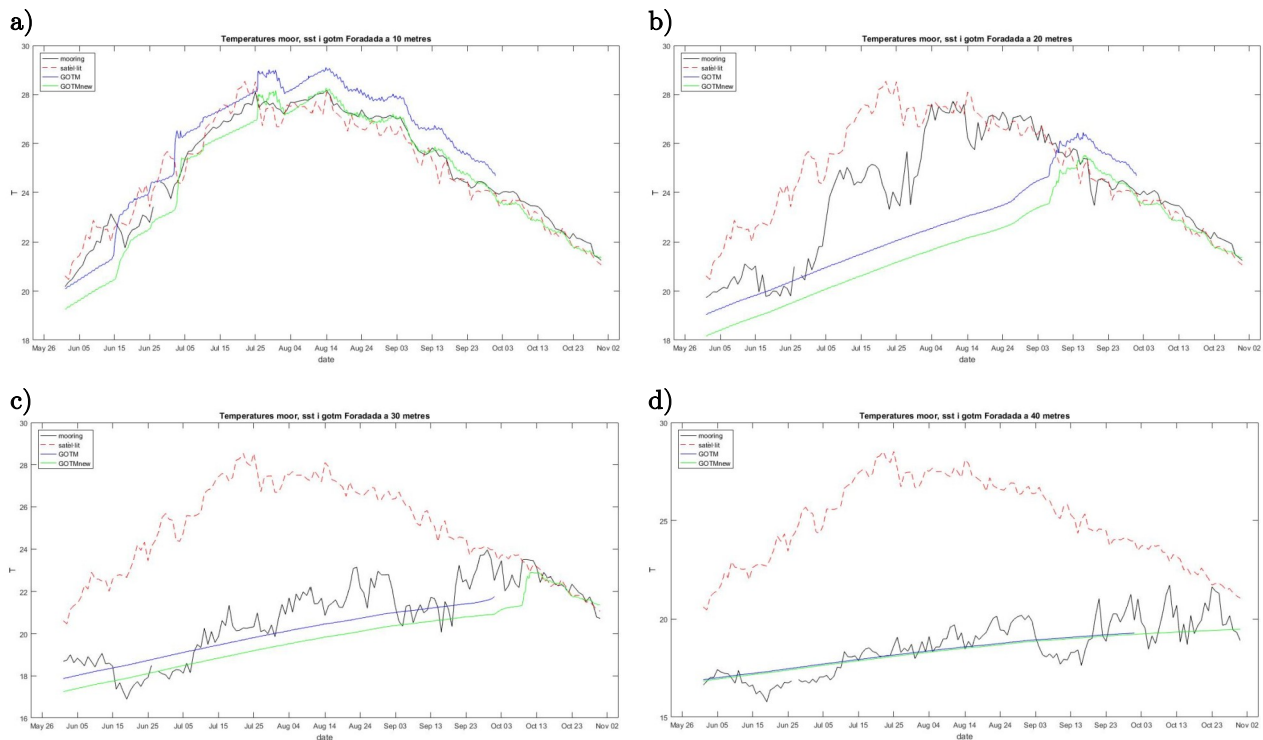


Figura 17: Simulacions GOTM juntament amb la temperatura detectada per l'estació a certa fondària (línia negra) i la *SST* detectada per satèl·lit (línia vermella puntejada) a fondàries de a) 10 m, b) 20 m, c) 30 m, i d) 40 m. S'inclouen dues simulacions GOTM realitzades a partir de dos perfils inicials de temperatura diferents (línies blava i verda).

Les temperatures simulades per GOTM són versemblants els primers 10 metres, on observam discrepàncies amb la realitat, però l'evolució de les temperatures és força anàloga, sobretot en la segona meitat de la simulació, durant el descens de les temperatures passat l'estiu. Aquest comportament acceptable, però, només es dona a 10 metres. Després perdem precisió en la transmissió tèrmica a 20 metres i les diferències s'accentuen a major profunditat.

5 Discussió

5.1 Transmissió de les onades de calor

En primer lloc, les temperatures superficials detectades per satèl·lit presenten fortes semblances entre estacions. Tot i que no s'ha mostrat a la present memòria, durant les dues últimes dècades trobam una forta anomalia tèrmica l'any 2003 en totes les estacions estudiades i, partir d'aquest any i en la majoria d'elles, un patró de repetició amb una freqüència de 3 anys (2003, 2006, 2009, 2012...). És lògic que, tractant-se d'estacions totes pertanyents al Mediterrani, les analogies tèrmiques siguin bastant notòries. De fet, en algunes estacions que no presenten onades en aquests anys, sí que s'observa un fort increment de la temperatura, però no tant prolongat en el temps.

En general, aquestes onades de calor superficials duren com a màxim 20 dies, i alguns esdeveniments molt puntuals poden arribar a poc més d'un mes de durada. El pics de temperatura oscil·len entre els 27 i 29 °C majoritàriament, i la intensitat entre 5 i 14 °C·dies. Això indica, tenint en compte les durades típiques dels esdeveniment, que durant les onades cada dia se sobrepassa gairebé un grau de temperatura.

Per altra banda, les dades d'estacions, *in situ*, resulten molt més imprevisibles. En fondàries petites (menys de 20 metres) identifiquem onades amb freqüències molt semblant a la de les dades *SST*. És per això que si comparam els resultats superficials i els d'aquestes fondàries, observam una correlació important quant als anys en que tenen lloc. Ara bé, i tal com observam a la [Figura 15](#), les característiques d'aquestes onades, fins i tot prop de la superfície no són gaire anàlogues a les superficials. La durada, per exemple, tot i que també oscil·la entre 5 i 25 dies, pot arribar en alguns casos excepcionals als 50 i fins i tot 60 dies. A més, les discrepàncies no són exclusives de fondàries altes, sinó que a poca profunditat també ocorren. No és només que la transmissió de calor només es faci palesa als primers metres (fet que es comentarà tot seguit), sinó que ja a poca fondària les característiques de les onades poden variar notòriament. Això causa el que també s'observa a la [Figura 15](#): un pic en superfície sol anar lligat a un pic en fondària però, encara que els augments de temperatura sí que es noten, no sempre conformen onades de calor, degut a la variabilitat de les durades.

Per tal d'il·lustrar com varia la transmissió a diferents fondàries, ja s'ha presentat la [Figura 14](#): a Sa Foradada a 40 metres no veim cap esdeveniment important durant els anys amb onades en superfície, però a més, a excepció d'un pic d'uns quants dies el 2018, les temperatures dels estius de 2015 i 2009 -anys en què havíem detectat onades pronunciades en superfície-, són les més baixes dels 8 anys observats. El mateix comportament el trobam a les demés estacions, on també s'identifiquen unes quantes onades en anys diferents a les de superfície, i només esporàdicament en anys en que sí n'hi ha segons les *SST*.

Una mirada més a fons a les estacions *in situ* i en les diferències de temperatura entre anys d'onades *SST* i altres anys revela també una transmissió relativament bona en els primers 20 metres. A la [Figura 16](#) inclosa a l'apartat anterior, que mostra les onades en diferents profunditats a Cabrera, podem apreciar com els valors remarcats en vermell a 10 metres de fondària coincideixen amb el màxims de temperatura d'aquesta profunditat. És a dir, els pics per a dades *SST* i *in situ* coincideixen; i a més, conformen onades de calor:

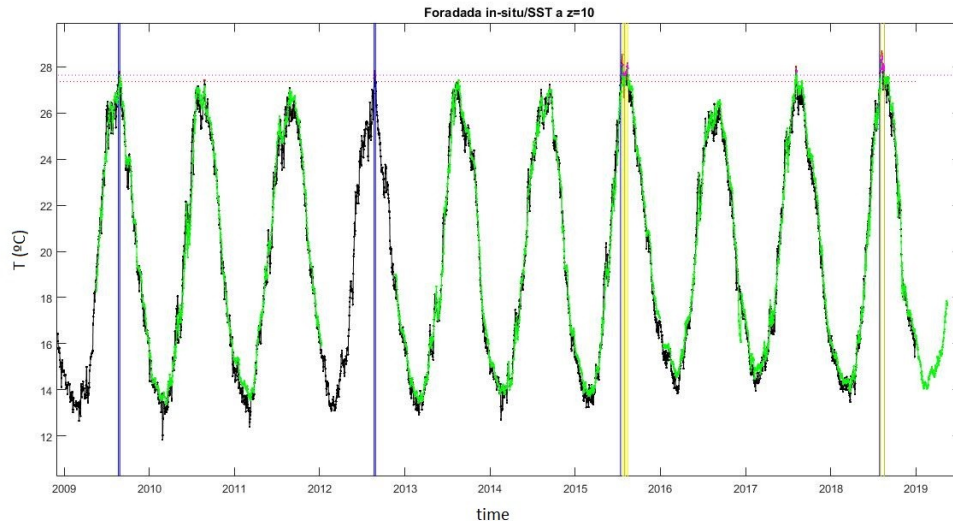


Figura 18: Els pics dels anys 2015 i 2018 (verd) conformen onades de calor que quadren amb les previsions SST (negre). El 2009 tenim una onada segons SST però no segons l'estació, tot i que sí existeix un pic de temperatura.

A 20 metres tenim un comportament anàleg, i tot i que els pics dels anys 2015 i 2018 no destaquen tant, tornam detectar onades aquests anys.

És a partir de profunditats majors que deixam de tenir aquesta transmissió clara dels augments de temperatura superficials. Tant a 30 com a 40 metres deixam de veure els pics els anys 2015 i 2018 i, precisament, aquests són els anys amb les temperatures més baixes durant l'estiu, com es comentava abans. Començam a detectar onades inesperades i a no detectar-les quan les hem observades en superfície.

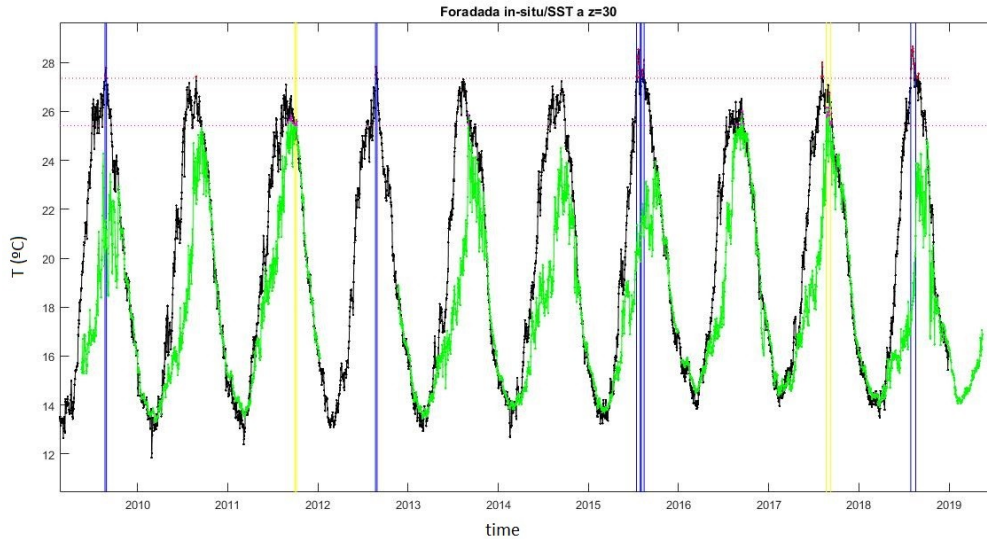


Figura 19: Les temperatures de fondàries grans no segueixen la tendència superficial, cosa que propicia l'aparició d'onades de calor aleatòries, sense relació aparent al que ens dona les SST.

Aquesta és la tònica habitual que podem observar a totes les estacions que tenen diverses fondàries i dades suficients a totes elles, com les que podem veure a la [Taula 3](#). Les onades de calor marines que es detecten en superfície condueixen amb total certesa a anomalies tèrmiques en els primers 20 metres de fondària, que poden manifestar-se en forma d'onades de calor o no, depenent de la durada. Ja s'ha mostrat, a la [Figura 15](#), que la variabilitat de la

durada dels esdeveniments inclús en els primers metres de profunditat és prou gran com per fer que una anomalia en superfície condueixi a una anomalia en fondària que no es manté el temps a bastament per a considerar-se una onada de calor. Ara bé, a profunditats majors, els pics tèrmics de l'estiu no semblen tenir relació alguna amb les temperatures superficials. Donada una estació i una sèrie de valors d'*SST*, amb una inspecció visual seria impossible endevinar, en cap de les sèries *in situ* de què disposam en el present estudi, la tendència de les temperatures a més de 30 metres de profunditat. Aquest resultat també es pot veure gràcies a l'índex, que tendeix a augmentar a mesura que també ho fa la profunditat de les estacions (Taula 4).

És important, per altra banda, plantejar-se fins quin punt podem refiar-nos del procediment seguit per a arribar a aquestes conclusions. Tot i els resultats, no podem descartar que els valors alts de l'índex a partir de certes fondàries siguin deguts, no a una mala transmissió de les onades de calor, sinó a un retard en dita transmissió. És a dir, a major profunditat, més tarda l'aigua a encalentir-se perquè l'energia tèrmica es va transmetent per capes des de la superfície. Amb aquest índex estam mirant la temperatura en els mateixos dies exactes d'onades de calor superficials, de manera que com més fondo ens trobam, més lluny en el temps estam d'arribar al pic de temperatura. Podria ser, doncs, que el motiu dels valors tan baixos a partir de 20 metres fos simplement el temps que li manca a l'aigua d'aquella posició per a arribar al màxim tèrmic. Cometríem un error si concloguéssim que les onades es transmeten molt poc a grans profunditats només observant la Taula 4.

Per a contrarestar la informació que obtenim de l'índex, calculam la correlació i la significància estadística entre les intensitats anuals de les temperatures en superfície (*SST*) i en certa posició i fondària (*in situ*). És a dir, donada una estació, cream una llista amb les intensitats dels anys amb onades de calor en superfície. Llavors calculam correlació i significància estadística entre aquesta llista d'intensitats i la llista d'intensitats detectades per satèl·lit en la posició corresponent.

Taula 5

C	P	Fondària (m)
0.2916	0.4662	-7
0.2869	0.5979	-7
0.7502	0.1488	-7
0.5322	0.3231	-7
0.5418	0.6592	-7
0.5686	0.3458	-7
0	1	-5
0	1	-10
0	1	-15
0	1	-20
0	1	-25
9.4864e-09	1.0000	-10
0	1	-15
0	1	-20
9.4864e-09	1.0000	-25
0	1	-30
9.4864e-09	1.0000	-40

C	P	Fondària (m)
0.3818	0.4407	-3
0.1620	0.6504	-3
0.3059	0.5059	-3
0.3977	0.4276	-3
0.0077	0.9275	-3
0.6468	0.2129	-0.5000
0.3893	0.8188	-0.5000
0.1968	0.6905	-0.5000
0.7571	0.3724	-0.5000
0.9743	0.0257	-0.5000
0.3839	0.6161	-1.5000
0.6846	0.3154	-1.6000
0.6846	0.3154	-1.7000
0.6846	0.3154	-1.8000
0.6846	0.3154	-1.9000
0.6846	0.3154	-2
0	1	0

C	P	Fondària (m)
0	1	0
0	1	-5
0	1	-6
0.0019	0.9981	0
0.8078	0.2974	0
0.6412	0.2857	0
0.2063	0.5445	-1
0.1741	0.5780	-6
0.1405	0.6164	-12
0.1390	0.6181	-20
0.2588	0.4949	-29
0.2588	0.4949	-36
0.1124	0.7893	-10
0.0991	0.8065	-20
0.0935	0.8141	-25
0.0835	0.8279	-30
0.0926	0.8154	-40

Taula 5: Correlació (C) i significància estadística (P) entre les intensitats detectades per satèl·lit i les intensitats detectades *in situ* en anys amb onades superficials.

Els resultats no ens ajuden en res. Les 5 correlacions que tenen menys probabilitat de ser fortuïtes (ressaltades en taronja) no entren -a excepció d'una d'elles- dins les que considerariem correlacions significatives, de manera que no és un mètode amb el que valgui la pena aprofundir. El motiu probablement és que les sèries de dades de què disposam són força curtes, llavors les correlacions són de llistes amb 3, 4 o màxim 5 valors.

En definitiva, observar les sèries de què disposam ens porta a concloure que no podem prendre les dades proporcionades per satèl·lits per a determinar si hi ha onades a grans fondàries. És cert que si estudiam els 20 metres menys profunds de la mar, l'error comès és relativament petit, ja que, com hem observat, els índex indiquen una transmissió prou bona fins aquestes fondàries (Taula 4). Però no podem dir el mateix per a profunditats superiors als 25 o 30 metres, on la transmissió és molt menor.

Aquest fet és rellevant quan ens interessa tenir en compte els efectes de les onades en l'ecosistema marí. La gran majoria d'espècies marines habiten a certa fondària, no en els primers metres, de manera que si volem estudiar forts augments de temperatura que afecten aquestes espècies no ens podem valer de dades *SST*; enlloc d'això, serà indispensable disposar de dades a diferents fondàries del lloc d'estudi.

5.3 Simulació GOTM

Els resultats que s'han mostrat a l'apartat anterior (Figura 17) revelen que el model només s'ajusta més o menys a la realitat en els primers metres. Per exemple, a 10 metres a Sa Foradada, les temperatures, tot i que no són idèntiques al que s'ha observat, sí que segueixen la mateixa evolució, de manera que és lògic plantejar-se l'ús del GOTM per a simulacions a aquesta fondària, aproximadament.

Durant els primers mesos de la simulació, les temperatures simulades se situen per sota de les reals perquè el perfil inicial que li hem donat al programa així li ho facilita. A mesura que arriben els mesos d'estiu, la radiació augmenta i amb ella el flux de calor aire-mar, que fa augmentar les temperatures i les situa a l'altura de les reals. Noti's que la línia blava, la qual és el resultat d'una simulació amb les mateixes característiques que la de la línia verda però amb l'única diferència de tenir un perfil inicial diferent, augmenta massa i, tot i que té la mateixa tendència que la simulació amb l'altre perfil, se situa per sobre de les temperatures reals. Per tant, és fonamental triar un perfil inicial convenient per a realitzar la simulació, ja que d'aquest fet depèn que les temperatures prenguin els valors adients (tot i que, com s'ha dit, el comportament d'aquestes no varia). També es important tenir en compte que un canvi en els paràmetres elegit per a executar el model (Figura 13) podria fer que la simulació, també en els primers metres, no resultés del tot acurada.

Per altra banda, les temperatures simulades a partir de 20 metres difereixen molt del que s'espera obtenir. La variabilitat dels valors durant els primers mesos de simulació és quasi nul·la, com si simplement la temperatura marítima anés augmentant linealment i no es veiés afectada per cicles periòdics d'augment i disminució de la temperatura, que és el que sabem que ocorre a la realitat. De fet, a la línia negra podem apreciar les pujades i baixades dels valors de temperatura reals, que poden ser degudes a canvis en l'atmosfera, com variacions en el vent, major o menor cobertura nuvolosa, augment o disminució de la radiació d'ona curta... a banda dels cicles tèrmics diaris. En canvi, a 20 metres no observam una variació realista abans del mes de setembre. A 30 metres aquestes petites variacions s'aprecien a l'octubre, i a 40 metres no s'aprecien en absolut. Això ens porta a pensar que, pot ser amb les combinacions de paràmetres que s'han provat en el present estudi, GOTM no ofereix una simulació prou bona a grans fondàries, i no és útil per a objectius com els aquí plantejats. Ara bé, atès que s'han realitzat nombroses proves amb diferents combinacions de paràmetres, és ben probable que el motiu pel qual el model no simula bé les temperatures en fondària sigui que l'evolució d'aquestes no es pot deduir a partir d'un model unidimensional, una columna d'aigua. És lògic pensar que hi ha una contribució important de l'advecció lateral, que guanya importància a mesura que la profunditat augmenta i que fa que es necessiti un model tridimensional per a simular adequadament les temperatures a més de 20 metres.

6 Conclusions

En primer lloc, les observacions realitzades permeten concloure que el mecanisme de transmissió de les onades de calor marines no és trivial. En tots els casos trobam analogies molt clares entre les temperatures superficials (*SST*) i les detectades per les estacions als primers metres. A mesura que la fondària augmenta, la relació entre les dades és cada cop menor, fins que es fa més i més difícil observar una transmissió clara. Així ho hem determinat a partir d'observacions particulars en estacions amb diverses profunditats, i ho hem quantificat amb l'índex comparatiu, que esdevé força alt (indicant mala transmissió) a partir dels 25 o 30 metres de fondària.

És evident que, efectivament, hi ha una relació de temperatures entre superfície i fondària, tal com ens indica la predicció teòrica. La calor a les capes superiors d'aigua s'ha de transmetre a zones més fondes, en major o menor mesura depenent del vent o l'estratificació, entre d'altres. En els primers 20 metres tenim una analogia molt marcada, i tot i que no hi ha una plena coincidència d'onades de calor, sí que en tots aquells anys amb onades en superfície, podem observar pics pronunciats en fondària, que poden no definir onades de calor si no tenen la durada necessària. D'aquesta manera, tot i les discrepàncies en l'aparició d'onades de calor marines en superfície i en aquests 20 primers metres, l'evolució tèrmica és molt semblant.

A partir d'uns 30 metres els resultats són molt diferents. No només hem vist com deixen de tenir lloc anomalies tèrmiques en anys en què n'esperaríem o viceversa, sinó que el comportament de les temperatures canvia per complet. Moltes estacions presenten pics en anys amb onades *SST* notòriament menors que en anys sense onades *SST*. En altres paraules, a vegades, els anys en què esperam una onada en fondària (segons les dades superficials de satèl·lit) no només no en trobam a 30 metres o més, sinó que ni tan sols observam pics de temperatura per sobre dels altres anys.

Per a entendre què passa a aquestes profunditats és convenient observar les dades extretes directament en aquesta zona, abans de determinar si hi ha hagut anomalies tèrmiques basant-nos en valors de *SST*.

A banda, el comportament general a totes les estacions és molt semblant com per a fer distincions geogràfiques, i l'únic que observam són algunes discrepàncies en la fondària en què deixam d'observar una transmissió clara.

Per altra part, les simulacions unidimensionals del model GOTM han resultat ser prou versemblants en els primers metres, però els resultats suggereixen que l'evolució de les onades en fondària (a més de 20 metres, aproximadament) depenen d'altres factors més enllà dels processos superficials.

Les onades de calor marines donen per un gran ventall d'estudis diversos, amb eines i objectius diferents. Després del present estudi, seria interessant ampliar la informació presentada, la qual cosa requeriria sèries *in situ* considerablement més llargues, i també combinar els resultats amb un model numèric diferent, amb el qual es tinguessin en compte adveccions laterals i no només processos unidimensionals, ja que, de funcionar prou bé, un model suposa un gran avanç en l'estudi de les temperatures del fons marí.

Bibliografia

- Bensoussan, N., Romano, J.-C., Harmelin, J.-G., & Garrabou, J. (2010). High resolution characterization of northwest Mediterranean coastal waters thermal regimes: To better understand responses of benthic communities to climate change. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 87(3), 431-441. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecss.2010.01.008](https://doi.org/10.1016/j.ecss.2010.01.008)
- Benthuisen, J. A., Oliver, E. C. J., Feng, M., & Marshall, A. G. (2018). Extreme Marine Warming Across Tropical Australia During Austral Summer 2015–2016. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123(2), 1301-1326. <https://doi.org/10.1002/2017JC013326>
- Bignami, F., Marullo, S., Santoleri, R., & Schiano, M. E. (1995). Longwave radiation budget in the Mediterranean Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 100(C2), 2501-2514. <https://doi.org/10.1029/94JC02496>
- Bond, N. A., Cronin, M. F., Freeland, H., & Mantua, N. (2015). Causes and impacts of the 2014 warm anomaly in the NE Pacific. *Geophysical Research Letters*, 42(9), 3414-3420. <https://doi.org/10.1002/2015GL063306>
- Burchard, H., Bolding, K., & Ruiz-Villarreal, M. (1999). *GOTM, a general ocean turbulence model. Theory, implementation and test cases.*
- Darmaraki, S. (2019). *Mediterranean Marine Heatwaves: Detection, Past Variability and Future Evolution.*
- Di Camillo, C. G., Bartolucci, I., Cerrano, C., & Bavestrello, G. (2013). Sponge disease in the Adriatic Sea. *Marine Ecology*, 34(1), 62-71. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0485.2012.00525.x>
- Fairall, C. W., Bradley, E. F., Rogers, D. P., Edson, J. B., & Young, G. S. (1996). Bulk parameterization of air-sea fluxes for Tropical Ocean-Global Atmosphere Coupled-Ocean Atmosphere Response Experiment. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 101(C2), 3747-3764. <https://doi.org/10.1029/95JC03205>
- Galli, G., Solidoro, C., & Lovato, T. (2017). Marine Heat Waves Hazard 3D Maps and the Risk for Low Motility Organisms in a Warming Mediterranean Sea . *Frontiers in Marine Science* , Vol. 4, p. 136.
- Hastenrath, S., & Lamb, P. J. (1978). *Heat budget atlas of the tropical Atlantic and eastern Pacific Oceans* (P. J. Lamb, Ed.). Madison: University of Wisconsin Press.
- Hobday, A. J., Alexander, L. V, Perkins, S. E., Smale, D. A., Straub, S. C., Oliver, E. C. J., ... Wernberg, T. (2016). A hierarchical approach to defining marine heatwaves. *Progress in Oceanography*, 141, 227-238. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pocean.2015.12.014>
- Jackson, J. M., Johnson, G. C., Dosser, H. V, & Ross, T. (2018). Warming From Recent Marine Heatwave Lingers in Deep British Columbia Fjord. *Geophysical Research Letters*, 45(18), 9757-9764. <https://doi.org/10.1029/2018GL078971>
- Kondo, J. (1975). Air-sea bulk transfer coefficients in diabatic conditions. *Boundary-Layer Meteorology*, 9(1), 91-112. <https://doi.org/10.1007/BF00232256>

- Ludwig, W., Dumont, E., Meybeck, M., & Heussner, S. (2009). River discharges of water and nutrients to the Mediterranean and Black Sea: Major drivers for ecosystem changes during past and future decades? *Progress in Oceanography*, *80*(3), 199-217. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pocean.2009.02.001>
- Marbà, N., & Duarte, C. M. (2010). Mediterranean warming triggers seagrass (*Posidonia oceanica*) shoot mortality. *Global Change Biology*, *16*(8), 2366-2375. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02130.x>
- Marbà, N., Jorda, G., Agusti, S., Girard, C., & Duarte, C. M. (2015). Footprints of climate change on Mediterranean Sea biota . *Frontiers in Marine Science* , Vol. 2, p. 56.
- Myers, T. A., Mechoso, C. R., Cesana, G. V, DeFlorio, M. J., & Waliser, D. E. (2018). Cloud Feedback Key to Marine Heatwave off Baja California. *Geophysical Research Letters*, *45*(9), 4345-4352. <https://doi.org/10.1029/2018GL078242>
- Olita, A., Sorgente, R., Natale, S., Gaberseck, S., Ribotti, A., Bonanno, A., & Patti, B. (2007, gener 1). *Effects of the 2003 European heatwave on the Central Mediterranean Sea: surface fluxes and the dynamical response.*
- Oliver, E. C. J., Benthuisen, J. A., Bindoff, N. L., Hobday, A. J., Holbrook, N. J., Mundy, C. N., & Perkins-Kirkpatrick, S. E. (2017). The unprecedented 2015/16 Tasman Sea marine heatwave. *Nature Communications*, *8*(1), 16101. <https://doi.org/10.1038/ncomms16101>
- Oliver, E. C. J., Lago, V., Hobday, A. J., Holbrook, N. J., Ling, S. D., & Mundy, C. N. (2018). Marine heatwaves off eastern Tasmania: Trends, interannual variability, and predictability. *Progress in Oceanography*, *161*, 116-130. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pocean.2018.02.007>
- Rivetti, I., Frascchetti, S., Lionello, P., Zambianchi, E., & Boero, F. (2014). Global Warming and Mass Mortalities of Benthic Invertebrates in the Mediterranean Sea. *PLOS ONE*, *9*(12), e115655.
- Schaeffer, A., & Roughan, M. (2017). Subsurface intensification of marine heatwaves off southeastern Australia: The role of stratification and local winds. *Geophysical Research Letters*, *44*(10), 5025-5033. <https://doi.org/10.1002/2017GL073714>
- Schumann, U., & Gerz, T. (1995). Turbulent Mixing in Stably Stratified Shear Flows. *Journal of Applied Meteorology*, *34*(1), 33-48. <https://doi.org/10.1175/1520-0450-34.1.33>
- Wernberg, T., Smale, D. A., Tuya, F., Thomsen, M. S., Langlois, T. J., de Bettignies, T., ... Rousseaux, C. S. (2013). An extreme climatic event alters marine ecosystem structure in a global biodiversity hotspot. *Nature Climate Change*, *3*(1), 78-82. <https://doi.org/10.1038/nclimate1627>