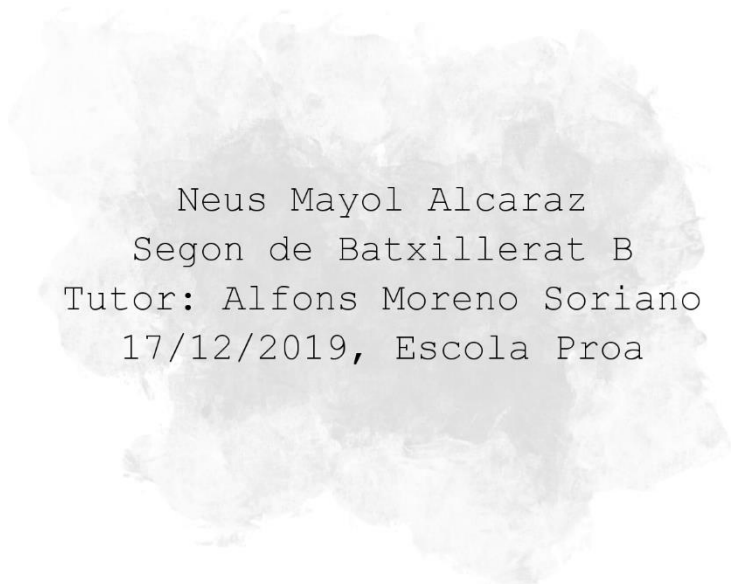


0 1 0 0
1 1 1 0
0 1 0 0
0 0 1 0 1
0 1 0 1
01 0 1 0 1
0 0 1 1

SUPERCOMPUTACIÓ I CANVI CLIMÀTIC: com explorar un futur incert



Neus Mayol Alcaraz
Segon de Batxillerat B
Tutor: Alfons Moreno Soriano
17/12/2019, Escola Proa

Sumari

Presentació.....	4
Introducció	5
Objectius.....	7
Agraïments	8
1. El clima.....	9
1.1. L'efecte hivernacle	10
1.2. Canvis forçats en el clima	11
2. Canvi climàtic.....	15
2.1. Causes	15
2.2. Conseqüències	17
2.3. Polítiques multilaterals per combatre el canvi climàtic	20
3. La supercomputació com a eina per analitzar el clima.....	26
3.1. La supercomputació.....	26
3.2. El supercomputador Mare Nostrum 4.....	27
3.3. Els models.....	28
4. Dades de reanàlisi	47
4.1. Procés utilitzat.....	47
4.2. Representació de temperatures	50
5. Anàlisi de dades històriques i d'escenaris.....	58
5.1 Procés utilitzat	58
5.2 Comparació històric-reanàlisi.....	58
5.2 Anàlisi dels escenaris SSP	59
Conclusions	71
Bibliografia i referències web.....	73
Annex	78

Presentació

Actualment sentim parlar a tot arreu del canvi climàtic i de les maneres de combatre'l. Tot i així, al món encara hi ha tres postures diferenciades davant d'aquest problema: hi ha qui el nega, hi ha qui l'admet i intenta fer canvis per minimitzar-ne les causes, i hi ha finalment qui l'admet però no fa res per combatre'l.

Veient que gran part de la població estem encara —malauradament— dins de l'últim grup, vaig decidir emprendre alguna acció al respecte. Vaig optar per fer un treball de recerca que, potser sense aportar grans innovacions científiques ni ser especialment rellevant, presentés tot i així una bona lectura de la situació i donés una visió general ben fonamentada de tot el que estem vivint i viurem.

El canvi climàtic és un tema molt obert i usual en els treballs de recerca. Tot i així, el vaig escollir perquè m'agradava i perquè volia fer un treball que no s'assemblés gens a la majoria dels que tracten aquest tema. És per això que, aprofitant els coneixements rebuts durant el curs Bojos per la Supercomputació, vaig incorporar-hi l'aspecte de la supercomputació. D'aquesta manera el treball s'ha tornat diferent, més especialitzat i molt menys genèric.

I ara que parlo de supercomputació, potser us esteu preguntat de què tracta exactament aquesta disciplina. Jo també em feia aquesta pregunta abans d'entrar al curs Bojos per la Supercomputació. Allà he après en què consisteix i moltes coses més. En aquest treball m'he posat a la pell d'un lector que no conegui el tema i he procurat parlar-ne des de la base, sense donar res per sabut.

Finalment, m'agradaria recordar com just abans de començar el treball se'm va avisar que havia de fer una bona tria del tema, perquè al final —em deien— n'acabaria cansada. I bé, ara que ja l'he acabat puc assegurar que en cap moment no he perdut l'interès. Espero que tu tampoc no el perdís mentre el llegeixes.

Introducció

En aquest treball s'explicarà com s'analitza el clima i el canvi climàtic a través de la informàtica, i concretament, de la supercomputació. Com tot Treball de Recerca, aquest també parteix d'una hipòtesi. Inicialment, la hipòtesi afirmava que hi havia una relació proporcional entre la potència d'un supercomputador i la qualitat d'una simulació. Poc després es va decidir canviar-la i es va formular la hipòtesi treballada, que afirma que la diferència de temperatures provocada per l'escalfament global afecta més l'hemisferi nord. La principal raó del canvi d'hipòtesi va ser la seva adequació al projecte de marc pràctic.

Aquesta hipòtesi es podria dividir en dues hipòtesis secundàries. La primera afirma l'existència d'un escalfament global. Per això, i abans de res, s'ha comprovat si aquesta primera afirmació és certa. Tota la informació aportada als dos primers apartats del treball resol aquesta afirmació i hi aprofundeix.

La segona hipòtesi, la més important, se centra en les pujades de temperatura a l'hemisferi nord, i s'ha resolt mitjançant la part pràctica. Tot i així, abans de dur a terme aquesta part, s'ha introduït un apartat que explica quina és exactament la relació entre la supercomputació i l'estudi del clima.

Finalment, el marc pràctic analitza i representa diferents paquets de dades de temperatura del passat, el present i el futur. En total s'ha treballat amb 492.549.120 valors de temperatura. La part pràctica no només se centra en l'hemisferi nord, sinó que procura fer representacions de tot el planeta i d'alguns dels fenòmens explicats anteriorment a la part teòrica.

Com veieu, doncs, el treball s'ha orientat a presentar dos temes molt diferents i a explicar després quina relació hi ha entre ells. Finalment, s'ha realitzat una part pràctica que pretén donar suport al treball de manera visual i entenedora. Establir aquesta relació entre tots dos temes és interessant des del punt de vista científicotecnològic, però cal recordar també que tant la supercomputació com el canvi climàtic tenen una important vessant social. Per una banda, el futur de la humanitat estarà marcat molt probablement pels avenços en el camp de la supercomputació. Alhora, és ben possible que aquest futur no existeixi, ja que la humanitat mateix podria desaparèixer a causa del canvi climàtic. S'ha volgut que

tots dos fets quedessin reflectits al títol del treball: la incertesa del futur, però també l'esperança que la supercomputació ajudi a preveure'l i a canviar-lo.

Durant tot el procés de realització del treball s'ha fet servir una gran varietat d'eines i fonts d'informació. Els dos primers apartats, els dedicats al clima i al canvi climàtic, han estat redactats a partir de les idees fonamentals de les tres principals fonts bibliogràfiques escollides per al treball i d'un curs d'Introducció al Canvi Climàtic impartit per les Nacions Unides. També s'ha comptat amb l'ajut d'especialistes en el tema, pàgines web i documents oficials.

L'apartat sobre la supercomputació i el marc pràctic no han pogut comptar amb el suport de fonts bibliogràfiques. El principal motiu d'això és la falta, en general, de llibres i articles que tractin la supercomputació de manera comprensible. Afortunadament, cal dir que la informàtica és un camp que fa un ús molt actiu d'internet, i per això gran part de la informació buscada s'ha trobat en línia. Els capítols que parlen de la supercomputació també s'han escrit a partir dels coneixements i els material rebuts durant el curs Bojos per la Supercomputació promogut per la Fundació Catalunya - La Pedrera i impartit al Centre Nacional de Supercomputació.

Per fer la part pràctica s'ha comptat amb la valuosa ajuda de la Froila Palmeiro, investigadora postdoctoral del Departament de Ciències de la Terra al Centre Nacional de Supercomputació. També s'han fet servir dades meteorològiques provinents de diferents reculls. L'eina de treball principal ha estat l'ordinador portàtil, amb el qual s'ha programat el codi de l'annex. Per fer-ho s'ha utilitzat el llenguatge *Python*, complementat amb diverses biblioteques que proporcionen funcions que agilitzen el procés de programació. El codi s'ha escrit des del programa *Jupyter Notebook*. Altres eines que s'han fet servir per visualitzar algunes dades són els compiladors *Anaconda Prompt* i *MobaXterm*.

Objectius

El primer objectiu serà clarament resoldre les hipòtesis formulades durant la introducció. Per fer-ho, es vol incorporar l'ús d'eines informàtiques.

En segon lloc, es vol fer un treball que expliqui la relació entre el canvi climàtic i la supercomputació d'una forma comprensible i en català, vista l'escassetat de fonts bibliogràfiques que compleixin totes dues condicions.

A la part teòrica es vol adoptar una visió general dels causants del clima actual i de l'estat del canvi climàtic. També es vol investigar sobre els organismes multilaterals que lluiten per combatre'l.

També es vol aprendre com intervé la supercomputació en l'anàlisi del clima i el canvi climàtic, i tot el procés que s'ha de dur a terme per fer-ho. Això implica estudiar què és i com funciona una simulació informàtica.

A la part pràctica es vol buscar una manera d'analitzar les dades meteorològiques i climàtiques mitjançant la informàtica, i arribar a resoldre la hipòtesi inicial. Per fer-ho, s'haurà d'aprendre a organitzar grans paquets de dades eficientment. També es vol aprendre a analitzar les dades de funcionament d'un programa.

Agraïments

En primer lloc vull donar les gràcies a la Froila Palmeiro, la professora de física de la UB i investigadora de postdoctorat al Centre Nacional de Supercomputació, que m'ha ajudat i guiat durant tota la part pràctica. Sense la seva paciència i el seu coneixement, aquest treball no hauria estat possible.

També vull agrair als coordinadors del programa Bojos per la Supercomputació l'oportunitat que em van donar en acceptar-me al programa. Allà he pogut saber de primera mà què era realment la supercomputació i he conegut persones amb qui comparteixo moltes coses. Aquest treball hauria estat molt diferent sense els coneixements i materials que m'han proporcionat.

Finalment, vull donar també les gràcies al tutor d'aquest treball, l'Alfons Moreno, per les seves correccions i els consells que m'ha donat.

1. El clima

Abans de parlar del clima, és important saber la diferència entre aquest terme i el terme *temps meteorològic*. El *temps meteorològic* (o *temps*) es defineix com el seguit de condicions atmosfèriques en un moment i un espai determinat. En canvi, el clima és la mitjana de les dades meteorològiques d'una regió en un període mínim de 30 anys¹.

Cada localització té les seves condicions climàtiques determinades. Aquestes són fruit de molts factors que varien segons la zona. Tot i així, hi ha regions on el clima és semblant al d'altres punts del planeta, i d'aquesta manera s'han aconseguit agrupar els climes terrestres. Aquests es poden classificar d'una manera simplificada com mostra la figura 1a, dividint-los segons la seva proximitat a l'equador. La figura 1a és un esquema de la figura 1b, on es veuen tots els subtipus de clima segons la zona.

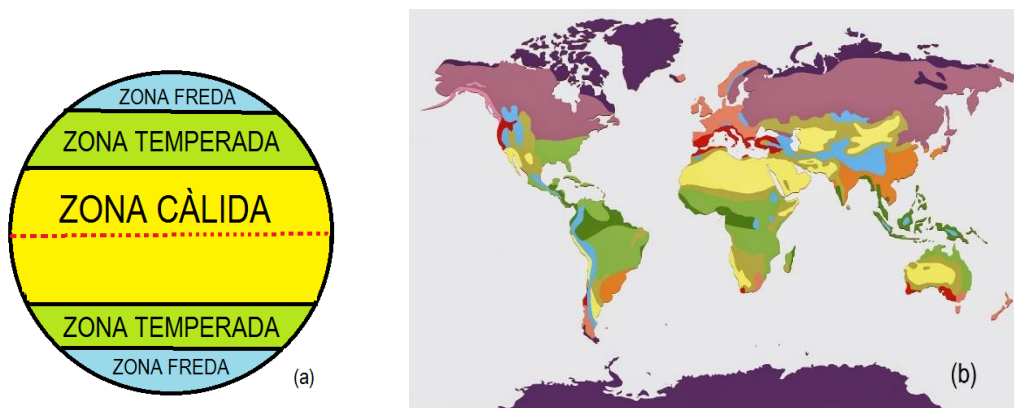


Figura 1 a) Les zones estan dividides segons la incidència del Sol. Es pren l'equador, la línia de màxima incidència del Sol, com a punt de partida. La zona càlida conté totes les latituds entre 23° i -23°. La zona freda comença als 66° i acaba als 90° (-66° i -90° en el cas de la zona freda sud). La zona temperada ocupa totes les latituds entre 23° i 66° (-23° i -66° a l'hemisferi sud).

b) Es poden dividir tots els grups de la figura 1a en diferents subgrups. Les zones càlides es divideixen en: clima equatorial ●, tropical ●, d'estepa ● i desèrtic ●. La zona temperada es divideix entre clima mediterrani ●, subtropical ●, oceànic ● i continental ●. La zona freda es divideix entre clima polar ● i clima d'alta muntanya ●. Imatge agafada de

https://www.google.com/search?q=climas+terrestres&tbm=isch&source=ju&ictx=1&fir=K-psNKQy71YNuM%253A%252CE7p9hhhWBP5zIM%252C_&vet=1&usq=A14_-KQ_EWM4RJFPNBZYMJSAUXERKAHFPA&SA=X&VED=2AHUKEWIFXOZEQZPIAHW88UAKHS_FXCKKQ9QEWAXOECAKQBA#IMGRC=7HH-KX8_VET5M:&VET=1

El seguit de característiques que defineixen els climes es produeixen gràcies a la presència del sistema climàtic. Un sistema climàtic es divideix en subsistemes

¹ Període definit per l'Organització Mundial del Clima (World Meteorological Organization, 2019)

que «interaccionen entre ells intercanviant massa, energia i quantitat de moviment»². Hi ha cinc sistemes. En primer lloc, es troba la hidrosfera, formada per tota l'aigua líquida terrestre. El segon sistema és l'atmosfera, o tots els gasos que envolten la Terra i la separen de l'espai exterior. El tercer sistema, o criosfera, es refereix a tota l'aigua en estat sòlid del planeta, és a dir: la neu i el gel. En quart lloc hi ha la litosfera, o tota l'escorça terrestre, inclosa l'escorça submergida en el fons marí. L'últim sistema és la biosfera i engloba tots els éssers vius del planeta.

1.1. L'efecte hivernacle

Per entendre el clima terrestre, cal saber en què consisteix l'efecte hivernacle. Cal remarcar que l'efecte hivernacle és un efecte natural que en principi no és nociu per al planeta, ja que és el principal causant que la Terra tingui un clima apte per a la vida. Si no existís l'efecte hivernacle, la temperatura mitjana de la Terra seria molt inferior.

Aquest efecte es deu a la presència de determinats gasos dins l'atmosfera, i per entendre com es produeix cal entendre el balanç energètic del sistema terrestre. Tal com es representa en la figura 2, quan l'energia solar arriba a l'atmosfera, la meitat de la radiació rebota cap a l'espai i l'altra meitat entra a l'atmosfera. Allà pot ser reflectida pels núvols, el gel o la sorra dels deserts³. També pot ser absorbida per la superfície o la mateixa atmosfera⁴. La quantitat de radiació reflectida s'anomena albedo. L'albedo és el percentatge de radiació que reflecteix una superfície. Cada material té un percentatge propi d'albedo. Les superfícies d'un color més clar tenen un albedo superior; per això la sorra i el gel es consideren materials amb molt albedo i capaços de reflectir l'energia.

² (Alarcón, Àvila, & Cunillera, 2011, p. 13-14)

³ (Alarcón, Àvila, & Cunillera, 2011, p. 18)

⁴ (Somerville, Le Treut, Cubasch, Ding, & Mauritzen, 2007, p. 96-97)

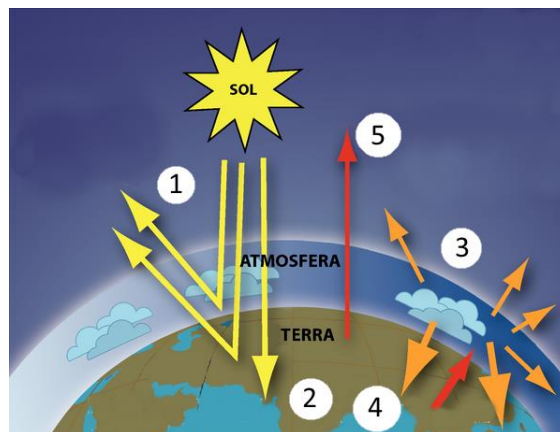


Figura 2: Recreació gràfica dels diferents escenaris que tenen lloc quan l'energia solar arriba a la Terra.
 1: L'energia és reflectida per l'atmosfera. 2: La Terra absorbeix l'energia. 3: Els núvols reflecteixen l'energia provinent de l'espai. 4: L'energia que es reflecteix a la superfície rebota amb els núvols. 5: L'energia surt a l'espai. Imatge adaptada de l'informe IPCC 2007 (Somerville, Le Treut, Cubasch, Ding, & Mauritzen, 2007).

Alguns dels gasos presents a l'atmosfera tenen la capacitat d'absorbir la calor i reemetre-la. La radiació solar absorbida per la superfície del planeta és reemesa després en forma de radiació infraroja (calor). Aquesta radiació infraroja és la que intercepten els gasos d'efecte hivernacle i que després tornen a emetre. Aquest fenomen, conegut com a efecte hivernacle, provoca l'augment de la quantitat de calor dins l'atmosfera, i per tant, l'augment de la temperatura. D'aquesta manera el planeta té una temperatura mitjana d'uns 15°C.

L'efecte hivernacle és el principal responsable del clima terrestre. Tot i així, aquest està constantment sotmès a factors que l'influeixen. Aquests factors hi provoquen canvis forçats.

1.2. Canvis forçats en el clima

Els canvis forçats del clima poden durar milers d'anys. Hi ha molts tipus d'alteracions, i aquestes es divideixen en dos grups:

1.2.1. Alternacions externes

Són aquelles alteracions que provenen de l'exterior del planeta. Les dues més importants són:

- **Canvis en l'òrbita:** poden ser variacions en la inclinació de la Terra o bé en el moviment del seu eix de rotació (moviment de precessió). Aquestes

alteracions també inclouen els canvis en la trajectòria el·líptica. Les anomalies són cícliques i acostumen a durar milers d'anys.⁵

- **Canvis en l'activitat solar:** com que és una estrella, el Sol té molta activitat interna. La Terra rep l'energia solar, importantíssima per dur a terme tots els processos que es donen lloc al planeta (vida, meteorologia...). L'energia solar condiona molt les activitats terrestres i és per això que qualsevol variació en aquesta pot causar un canvi en el clima.

1.2.2. Alteracions internes

Són les produïdes per canvis interns en la dinàmica planetària. N'hi ha moltes, i les més importants són les següents:

- **Anomalies oceàniques:** hi ha molts fenòmens puntuals als oceans, però l'anomalia més important s'anomena Oscil·lació Meridional. Tot i així, els pescadors l'han rebatejada amb el nom de *El Niño* perquè comença als voltants del dia de Nadal. Aquesta anomalia es produeix a la part de l'oceà Pacífic més pròxima a Colòmbia, Perú i Equador. *El Niño* és una pujada de la temperatura de l'oceà Pacífic en la seva part més superficial. Es deu a un canvi de la diferència de pressió entre les costes americana i asiàtica. Aquesta disminució de la diferència de pressió produeix canvis en els vents, que acaben movent les masses d'aigua més calentes a la costa americana i produeixen aquest fenomen. Quan la disminució de la diferència de pressió és molt notable, els corrents d'aire poden arribar a invertir-se i produir canvis encara més importants en la temperatura, en els fenòmens meteorològics o bé en la quantitat de peix pescat pels pescadors d'ambdues costes.
- **Erupcions volcàniques:** una erupció volcànica pot influir en el clima d'un planeta durant anys. Quan un volcà entra en erupció, els gasos emesos poden arribar a l'estratosfera. Allà els vents els escampen al llarg de tot el planeta. L'augment de la presència de gasos sulfurosos a l'atmosfera fa augmentar la quantitat d'energia solar reflectida i, en conseqüència, disminueix la quantitat d'energia absorbida per la superfície del planeta.

⁵ Aquests canvis també es coneixen com a variacions de Milankovitch. (University of Lincoln, sense data)

Quan s'absorbeix menys energia solar es produeix un descens de la temperatura.

Aquest efecte s'ha produït molts cops durant la història de la Terra. A la figura 3 es veuen les anomalies en la temperatura mitjana de les últimes dècades. Tal com es pot apreciar, la temperatura mitjana de la Terra pateix canvis forçats després de les tres erupcions volcàniques més importants de la segona meitat del segle XX.

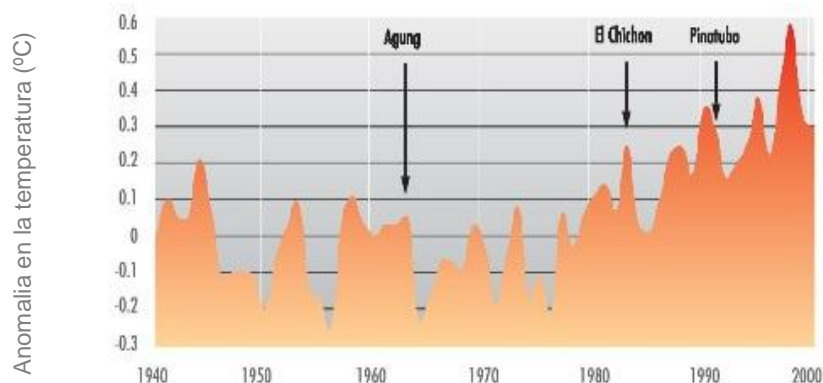


Figura 3: Aquestes són les anomalies de la temperatura en graus Celsius durant la segona meitat del segle XX. Les tres erupcions volcàniques més importants (Agung, El Chichón i Pinatubo) van produir canvis notables en la temperatura mitjana. Imatge adaptada de l'article *The Greenhouse Effect and the Climate Change* (Bureau of Meteorology, 2003, p. 13).

- **Factors antropogènics:** tal com indica el nom, aquests factors són les anomalies fruit de les accions humanes. Aquestes accions impliquen l'emissió de gasos capaços de retenir i emetre calor (gasos d'efecte hivernacle).

Com s'ha dit anteriorment, l'existència de l'efecte hivernacle no és nociva per a la Terra, però un augment de la concentració dels gasos que el provoquen té com a conseqüència la intensificació d'aquest efecte. Això produeix una retenció excessiva de calor i, conseqüentment, un ascens anormal i descontrolat de la temperatura. Aquest ascens també es pot veure a la mateixa figura 3.

La intensificació de l'efecte hivernacle per causes antropogèniques produeix un fenomen anomenat escalfament global. Si aquest escalfament prospera, els canvis en el clima s'aniran accentuant i acabaran provocant un canvi climàtic. De canvis en el clima ja n'hi havia hagut al llarg de l'existència de la Terra (per exemple durant les eres

glacials) però tot i així, mai hi havia hagut un canvi tan ràpid de la temperatura mitjana global.

La teoria que els humans som la principal causa de l'escalfament global està del tot consolidada. Malgrat això, hi ha veus que la posen en dubte. N'és un exemple l'actual president dels Estats Units d'Amèrica, Donald Trump, qui va expressar el seu desacord amb l'últim informe sobre el canvi climàtic amb la frase "No m'ho crec" (2018)⁶. Per altra banda, la figura 4 compara l'anomalia de temperatura (vermell) amb la pujada d'emissions de CO₂, el principal gas responsable de la intensificació de l'efecte hivernacle (blau).

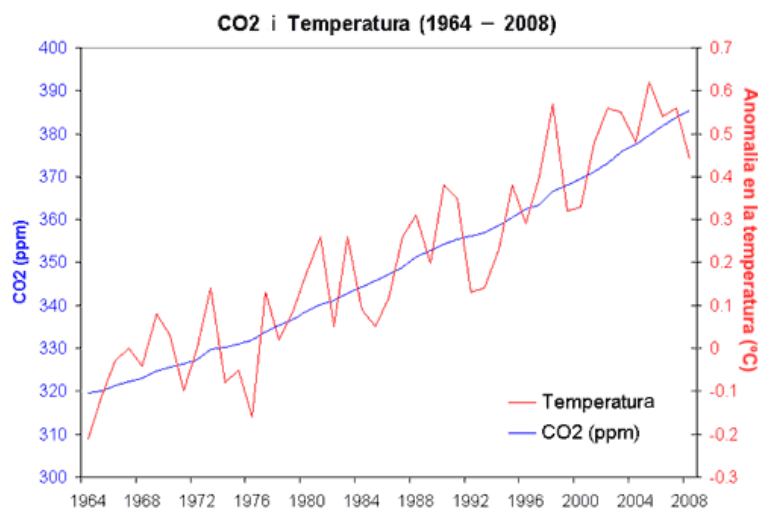


Figura 4: Comparació del nombre d'emissions de CO₂ amb l'anomalia en la temperatura mitjana de la Terra. Imatge adaptada de https://sos.noaa.gov/media/cms/sosx/climate_change_and_carbon_dioxide_lesson_teacher.pdf (p.6)

Gràfics com el de la figura 4 han fet que el canvi climàtic sigui avui un dels temes més presents en l'actualitat científica i política. Per això s'han creat un seguit d'institucions i organitzacions responsables d'avaluar la magnitud del problema i intentar posar-hi una solució. Així s'espera trobar una forma de minimitzar les causes del canvi climàtic i evitar-ne les devastadores conseqüències.

⁶ Frase textual en anglès: "I don't believe it" (Cillizza, 2018)

2. Canvi climàtic

2.1. Causes

Actualment es considera que hi ha una probabilitat extremadament alta (95%, segons l'informe IPCC 2013⁷) que el principal responsable del canvi climàtic sigui l'emissió de Gasos d'Efecte Hivernacle (GEH) d'origen antropogènic.

Un excés dels gasos que provoquen l'efecte hivernacle causa la intensificació d'aquest fenomen. La figura 5 mostra quins són els principals gasos. La seva concentració a l'atmosfera augmenta com a resultat de l'activitat humana. Cal dir que existeix un altre GEH important: el vapor d'aigua. La figura 5 no l'inclou perquè les activitats humanes no influeixen en la seva concentració a l'atmosfera.

Gas d'Efecte Hivernacle	Potencial d'Escalfament Mundial (PEM) en 100 anys ⁸	Percentatge d'emissions en el conjunt de Gasos d'Efecte Hivernacle
Diòxid de carboni (CO₂)	1	76%
Metà (CH₄)	25	16%
Òxid nitrós (N₂O)	298	6%
Hidrofluorocarbonis (HFC)	124-14.800	<2%
Perfluorocarbonis (PFC)	7.390-12.200	<2%
Hexafluorur de sofre (SF₆)	22.800	<2%
Trifluorur de nitrogen (NF₃)	17.200	<2%

Figura 5 Classificació dels principals Gasos d'Efecte Hivernacle segons la concentració a l'atmosfera. Taula adaptada del Curs d'introducció al Canvi climàtic de la UNCC⁹. Dades recollides de l'informe IPCC¹⁰ i de l'informe PNUMA del 2012¹¹

Tal i com es pot observar, els tres primers gasos de la figura 5 predominen en concentració. Aquests gasos apareixen de forma natural a l'atmosfera. En altres paraules, ja eren gasos d'efecte hivernacle abans de l'existència humana. Aquest fet els diferencia dels altres, anomenats gasos fluorats. Els gasos fluorats són d'origen completament antropogènic i tenen un potencial d'escalfament

⁷ (Stocker, et al., 2013)

⁸ El PEM (Potencial d'Escalfament Mundial) és la capacitat que té cada gas per retenir la calor, prenent com a referència el diòxid de carboni. Per això el CO₂ té un PEM equivalent a 1.

⁹ (UNFCCC, 2017)

¹⁰ (Solomon, et al., 2007, p. 33-34)

¹¹ (UNEP, 2012, p. 11)

mundial molt elevat. Això significa que petites quantitats d'aquest tipus de gasos generen un escalfament molt gran. Tot i així, els principals gasos responsables són els tres primers de la figura 5.

2.1.1. Diòxid de carboni (CO₂)

El gas d'efecte hivernacle més important, el diòxid de carboni, ha augmentat la seva concentració en un 40% des del 1750. De fet, en aquests moments l'atmosfera té la concentració de CO₂ més gran dels últims 800.000 anys. Els principals responsables de l'alliberament de CO₂ són la desforestació i la crema de combustibles fòssils. El diòxid de carboni contribueix en un 65%¹² en el forçant radiatiu produït pels Gasos d'Efecte Hivernacle¹³.

La meitat del diòxid de carboni emès és absorbit per la biosfera i els oceans, que actuen com a embornals. Malgrat l'acció d'aquests embornals, es va concentrant cada vegada més CO₂ a l'atmosfera, i aquest gas hi roman durant centenars d'anys. A més a més, l'activitat humana està malmetent alguns d'aquests embornals, provocant així una retroalimentació. Un exemple d'aquesta retroalimentació és la desforestació. Quan es tala un bosc es perd capacitat d'absorbir diòxid de carboni de l'atmosfera, i per tant, es perd capacitat de disminuir-hi la concentració de CO₂.

2.1.2. Metà (CH₄)

Segons l'Organització Mundial de Meteorologia, el 60% del metà que hi ha a l'atmosfera és d'origen antropogènic. Prové de les plantacions d'arròs, la biomassa, els abocadors i el bestiar. El metà que arriba a l'atmosfera triga una quinzena d'anys a desaparèixer. Això contraresta el fet que tingui un PEM més elevat¹⁴. Igual que el carboni del CO₂, el carboni del metà també pot ser absorbit per la biosfera i els oceans. El metà contribueix en el forçant radiatiu dels GEH en un 17%¹⁵.

¹² (World Meteorological Organization, 2019)

¹³ El forçant radiatiu és la diferència entre la radiació que entra i la que surt de l'atmosfera. Quan un gas contribueix al forçant radiatiu, s'està parlant d'un gas que influeix en aquesta diferència. (Viquipèdia, 2008)

¹⁴ (World Meteorological Organization, 2019)

¹⁵ (World Meteorological Organization, 2019)

2.1.3. Òxid nitrós (N₂O)

Aquest Gas d'Efecte Hivernacle també és conegut per ser el principal gas destructor de la capa d'ozó. El 40% de les emissions del gas són antropogèniques i provenen dels adobs i altres productes usats en l'agricultura. L'òxid nitrós triga uns 120 anys a desaparèixer de l'atmosfera i provoca un 6% del forçat radiatiu produït pels GEH. Les seves emissions s'han incrementat en un 20% des del 1750¹⁶.

La principal conseqüència de l'emissió de GEH és l'augment de la temperatura mitjana terrestre, que ha pujat 1,1 °C respecte a la de l'època preindustrial. Una altra dada que mostra l'evidència d'un canvi en la temperatura és que el període 2015-2019 ha estat el més càlid dels registrats fins ara. A més, els increments de temperatura en les tres últimes dècades han estat més grans que en qualsevol de les dècades anteriors des de l'any 1850. Aquest augment també es coneix com a escalfament global.

2.2. Conseqüències

L'escalfament global no només afecta el clima en forma de canvi climàtic. Aquest fenomen també repercuteix a la societat i al paisatge terrestre. S'han registrat canvis en la quantitat de precipitació. Actualment s'ha observat que a causa de l'escalfament global, la quantitat de precipitació ha variat segons la zona del planeta. En general també ha augmentat la intensitat de les precipitacions i la freqüència dels episodis de pluja àcida.

¹⁶ (World Meteorological Organization, 2019)

Un altre sistema climàtic que pateix les conseqüències de l'escalfament és la criosfera. A partir de les dades de la figura 6, s'ha arribat a la conclusió que hi ha una relació entre la quantitat de gel del planeta i les emissions de GEH per activitats humanes. Tal i com es mostra, les extensions de gel en els oceans han disminuït a mesura que passen els anys, i per tant, a mesura que la temperatura mitjana incrementa.

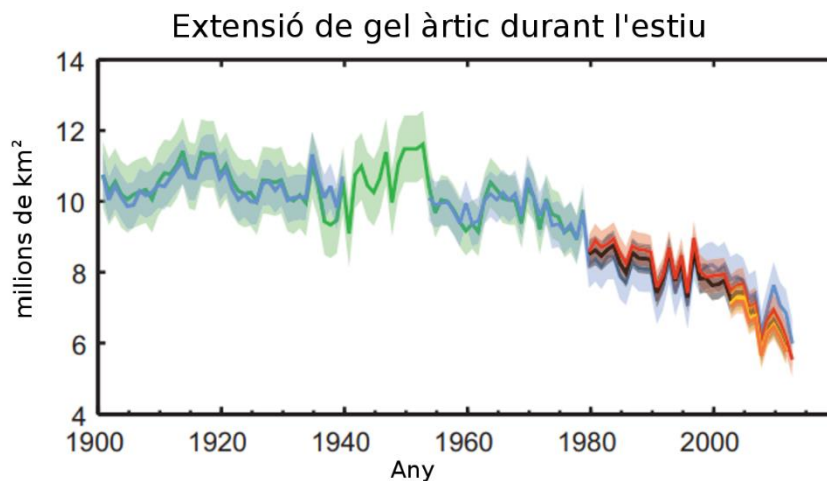


Figura 6: Disminució de la capa de gel de l'Àrtic en el transcurs del segle XX i principis del segle XXI. Imatge adaptada de l'informe IPCC 2013 (Stocker, et al., 2013, p. 10)

La disminució de la superfície coberta de gel també provoca una retroalimentació positiva. El gel té una capacitat reflectora molt gran, que fa que els rajos solars no siguin absorbits per la superfície, i per tant, que l'albedo terrestre sigui superior. Quan disminueix la quantitat de gel, l'albedo també disminueix. Això vol dir que la Terra no té tanta capacitat de reflectir l'energia que arriba del Sol, i per tant, la quantitat d'energia absorbida és superior. Per això l'augment de la temperatura de l'Àrtic és més notable que el d'altres zones del planeta¹⁷.

Una altra de les conseqüències més conegudes és l'augment del nivell del mar. El principal responsable és la gran quantitat d'energia emmagatzemada en tota la seva extensió. L'escalfament de les aigües marines comporta una dilatació tèrmica de l'aigua, fet que provoca l'augment del volum del líquid i consegüentment, l'augment del nivell del mar.

¹⁷ (Alarcón, Àvila, & Cunillera, 2011, p. 18)

L'augment del nivell del mar pot arribar a inundar les illes poc muntanyoses (Tonga, per exemple) i les ciutats costaneres o construïdes sobre l'aigua (Barcelona i Venècia, per exemple).

L'augment de la temperatura també portarà conseqüències en la biosfera, com poden ser l'extinció d'espècies que habiten medis freds i l'increment i extensió d'espècies pròpies de medis més càlids. L'espècie humana, tot i tenir més capacitat d'adaptar-se, també patirà conseqüències que van més enllà de tenir més sensació de calor. Les societats humanes hauran d'afrontar la pujada del nivell del mar, l'extensió d'espècies portadores de malalties, la intensificació de fenòmens climàtics extrems, etc. Molt probablement, en un futur proper, hi haurà emigrants climàtics i conflictes pels recursos.

Segons la revista W.Seth i N.Kimberly (2017), hi ha mesures que cada individu podria prendre per combatre el canvi climàtic. La més important és reduir el nombre de fills per família. També prescindir de vehicle personal i dels viatges en transport aeri. Una altra mesura passa per començar dietes vegetarianes o que es basin en el consum de vegetals¹⁸. Aquestes mesures podrien ser claus per aturar el canvi.

Tot i així, cal dir que aquestes mesures no causaran millores notables si no hi ha canvis en les actuacions dels països davant d'aquest problema. Aquests canvis hauran de ser fruit dels pactes entre governs de països per evitar l'existència d'agents contaminants en el planeta. Si s'arriba a un acord, s'aconseguirà que el canvi climàtic no sigui tan brusc i que per tant, les generacions futures no hagin de patir els errors comesos per les passades. Avui en dia aquest és el principal objectiu de les polítiques multilaterals per combatre el canvi climàtic.

¹⁸ (Seth & Kimberly A, 2017, p. 3-4)

2.3. Polítiques multilaterals per combatre el canvi climàtic

Durant les últimes dècades ha començat a haver-hi una preocupació social per les conseqüències del canvi climàtic. Per això s'han creat diferents organitzacions multilaterals per combatre'l. En el si d'aquestes organitzacions es produeixen negociacions entre països per tal d'arribar a acords que ajudin a redreçar el canvi climàtic.

2.3.1. La convenció marc sobre el canvi climàtic

El tret de sortida de les polítiques multilaterals més importants va ser l'any 1992 a Rio de Janeiro (Brasil), on durant el mes de juny van tenir lloc múltiples reunions entre caps d'estat, ONG, científics experts i altres personalitats. Un dels resultats de la cimera de Rio va ser la creació de la Convenció Marc de les Nacions Unides sobre el Canvi Climàtic (UNFCCC¹⁹), un tractat internacional on els països signants es comprometen a estabilitzar les concentracions de GEH a l'atmosfera a un nivell que eviti que l'acció antropogènica interfereixi perillosament amb el sistema climàtic terrestre. En aquest tractat es reconeix que els països desenvolupats són els principals responsables del canvi climàtic i que han de liderar la lluita per fer-hi front. La llista dels països que a l'any 1992 es consideraven països desenvolupats figura a l'Annex 1 de la convenció.

Avui dia també s'anomena amb el nom d'UNFCCC l'edifici central de la Convenció situat a Bonn (Alemanya). Les reunions entre els representants dels països del món, que es fan un cop l'any, s'anomenen Conferència de les Parts (COP)²⁰.

Fins ara, l'UNFCCC ha aconseguit crear dos acords molt importants. Aquests acords són també dos tractats internacionals: el protocol de Kyoto (1997) i l'acord de París (2015). Els dos van sortir de la COP dels dos anys respectius.

El Protocol de Kyoto

El principal objectiu del Protocol de Kyoto va ser concretar el compromís que s'havia pres anteriorment a Rio. Per fer-ho es va establir que els països

¹⁹ Sigles del nom anglès de la convenció (*United Nations Framework Convention on Climate Change*)

²⁰ També anomenades reunions COP (*Conference of Parties*) o Conferència de les Parts, en català.

desenvolupats (els recollits a l'Annex 1 de la UNFCCC) havien de reduir en el període 2008-2012 un 5% les emissions respecte al nivell d'emissions del 1990.

El tractat va entrar en vigor l'any 2005, i tots els països *Annex 1* que el van signar i ratificar van haver de complir aquesta reducció d'emissions. Tots els Estats de l'*Annex 1* van aconseguir aquest objectiu tret dels Estats Units, que mai va ratificar l'acord, i el Canadà, que en no poder aconseguir l'objectiu, va sortir de l'acord abans que acabés el termini.

L'acord de París

Quan el tractat de Kyoto va entrar en vigor (2005), el món ja no era igual que en el moment en què es va redactar (1997). El principal canvi durant aquest període va ser l'aparició de tres grans potències: la Xina, el Brasil i l'Índia. En molt pocs anys els tres països es van convertir en grans emissors de GEH, i com que el seu desenvolupament va ser posterior a la redacció del Protocol de Kyoto, aquest no contemplava que haguessin de reduir les seves emissions. Per tant, «el Protocol de Kyoto va quedar pràcticament obsolet ja abans de la seva implantació»²¹.

Donada la nova realitat mundial, es va decidir que s'havia de crear un nou acord que regulés les noves potències i tots els països del món. Per tant, es va acordar que a la COP 21 de l'any 2015 a París s'havien de presentar les noves mesures per combatre el canvi climàtic i redactar un nou acord. Va ser així com durant el mes de desembre del 2015 es va arribar a consensuar l'Acord de París.

El document resultant estableix un objectiu molt clar en el seu segon article: la temperatura mitjana del planeta no pot pujar més de 2°C respecte a l'època preindustrial. Si no s'assolís l'objectiu, les conseqüències podrien afectar d'una manera molt intensa tots els sistemes climàtics. L'acord també diu que d'entrada, els països hauran de fer el possible per no sobrepassar una pujada d'un grau i mig de temperatura. D'aquesta manera les conseqüències del canvi climàtic serien menys notables. Tot i així, avui en dia es considera que l'objectiu fonamental és no arribar a sobrepassar els 2°C.

²¹ Segons GGCC-STH de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) (Grup sobre el Governament del Canvi Climàtic (GGCC) del Grup d'Investigació en Sostenibilitat, Tecnologia i Humanisme (STH) de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), 2018)

Durant la cimera de París, cada estat va haver de presentar els seus compromisos per contribuir a l'aturament del canvi climàtic. Les contribucions, anomenades també NDC ²², estan relacionades amb la disminució de les emissions de Gasos d'Efecte Hivernacle. La majoria de països que participaven a la Cimera de París van presentar unes NDCs que es van analitzar posteriorment per veure si realment complien l'objectiu dels 2°C. El resultat va ser que, amb els compromisos redactats pels països, l'augment de la temperatura seria d'aproximadament 3,5°C. Per tant, l'objectiu dels dos graus escrit en el mateix Acord de París no es complia.

Assolir el principal objectiu de l'Acord de París és una tasca complicada, perquè cada país té llibertat per escriure els seus compromisos. L'UNFCCC no imposa cap mesura als països, ja que la seva normativa no permet que l'organisme pugui afectar la sobirania dels estats. Per tant, el futur del canvi climàtic i del planeta depèn únicament de la predisposició de cada país a fer front al problema. De moment, l'única manera d'aturar l'escalfament global és pactant i posant límits a les emissions de Gasos d'Efecte Hivernacle. Per aconseguir-ho, és important que els responsables d'emprendre polítiques estiguin ben assessorats pel coneixement científic.

- **Grup Intergovernamental sobre el Canvi Climàtic (IPCC)**²³

L'IPCC no és una organització política multilateral, és l'organització que publica les dades científiques que haurien de ser considerades a les negociacions. Els informes de l'IPCC es redacten compilant tot el que la comunitat científica ha anat publicant en matèria de canvi climàtic. L'IPCC, entre d'altres documents, ha redactat cinc informes molt destacats anomenats *Assessment Reports*. Aquests informes se centren en l'estat del canvi climàtic i en proposar-hi solucions.

L'últim informe de l'IPCC, anomenat *IPCC Fifth Assessment Report (AR5)*(2014), presenta un gràfic de futurs escenaris d'emissions anomenats RCP (*Representative Concentration Pathway* ²⁴). Els escenaris d'emissions representen possibles camins d'evolució de les emissions de GEH fins al final de segle. Les diferents trajectòries d'evolució de les emissions comporten pujades

²² Sigles en anglès de *National Determined Contributions*

²³ Sigles en anglès de l'*Intergovernmental Panel on Climate Change*

²⁴ En català, Trajectòries de Concentracions Representatives.

en la temperatura com les de la figura 7a, que mostra quina seria l'anomalia en els escenaris RCP 2.6 i RCP 8.5. Aquests escenaris RCP són els més coneguts perquè representen l'anomalia en la temperatura més baixa i alta respectivament. És per això que l'escenari RCP 2.6 de la figura 7a, marcat en color blau, va lligat a una reducció de les emissions representada en el mateix color a la figura 7b. En canvi, l'escenari RCP 8.5 representa una anomalia en la temperatura molt més accentuada perquè és un escenari on les emissions de CO₂ segueixen augmentant, tal i com es pot veure en la figura 7b en color vermell.

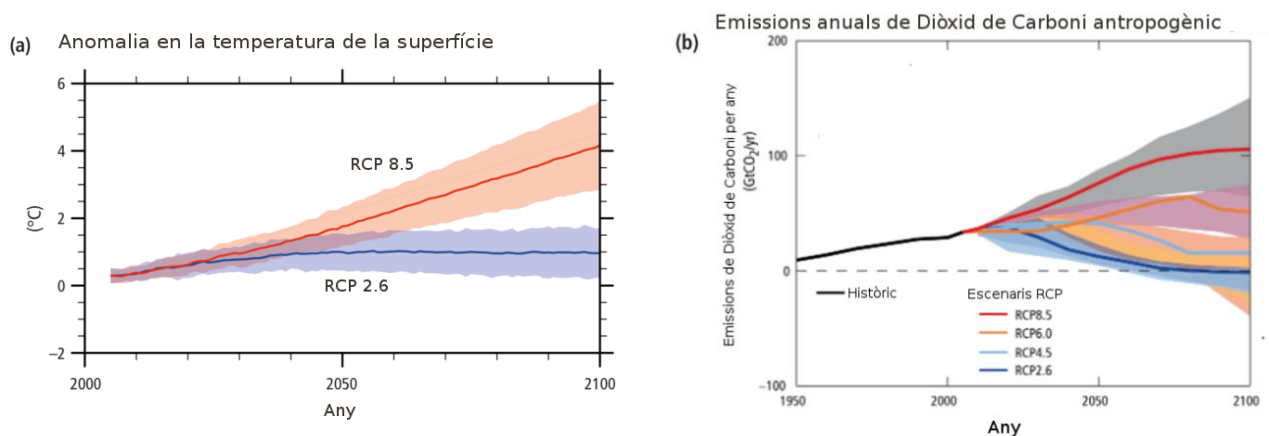


Figura 7: a) Anomalia en la temperatura mitjana causada pels escenaris RCP 2.6 i 8.5. Aquests dos escenaris són el millor i el pitjor que l'informe AR5 contemplava. L'escenari RCP 2.6 no aconsegueix l'anomalia dels 2°C, i per tant s'assoleix l'objectiu de l'Acord de París.

b) Representació de les emissions de CO₂ antropogènica anual perquè es produeixi cada escenari RCP. L'escenari 8.5 és el que representa com evolucionaran les emissions de CO₂ si no es pren cap mesura. Fonts: Correcció de l'informe IPCC 2014 (IPCC, 2015, p. 9,11)

L'escenari RCP 2.6 és l'escenari que condueix a estabilitzar la temperatura mitjana per sota dels 2 °C, i per tant, és l'escenari compatible amb l'objectiu de l'Acord de París. Tal com es pot observar a la figura 7b, aquest escenari comporta una baixada de les emissions immediata. De fet, aquesta reducció de les emissions ja s'hauria d'estar produint; és per això que els escenaris RCP cada cop es corresponen menys amb la realitat.

Els escenaris SSP (*Shared Socioeconomic Pathways*) aniran inclosos al pròxim informe de l'IPCC, l'*Assessment Report 6 (AR6)*, que es publicarà l'any 2022. Aquests escenaris ja havien estat publicats dins l'anterior *Assessment Report*, però en aquells moments no se'ls donava la importància que se'ls donarà en el següent informe. La diferència entre els escenaris SSP i RCP recau en la manera

de crear els dos tipus de recorreguts. Els escenaris RCP construeixen els recorreguts d'emissions a partir de les possibles emissions de GEH i altres anomalies en la temperatura, i per altra banda, els escenaris SSP tenen en compte les possibles evolucions que afecten la societat en molts àmbits diferents (per exemple el preu dels combustibles fòssils). Els escenaris SSP van ser creats a l'inici per saber com evolucionarien el clima, la societat i l'economia sense la necessitat de lleis que reguessin les emissions. Tot i així també s'han creat escenaris SSP on s'afegeixen algunes possibles mesures usades anteriorment per crear els escenaris RCP.

Tal com es pot observar en la figura 8, hi ha cinc famílies d'escenaris SSP. Els escenaris de cada família tenen en comú una visió del món futur concreta. Per exemple, els escenaris de la família SSP 1, marcats en color blau clar a la figura 8, corresponen al grup d'escenaris encarregats de representar un món que canviarà per ser més sostenible. Per altra banda, i marcada en vermell, hi ha l'última família, la SSP 5. Aquest grup d'escenaris mostra l'anomalia en la temperatura en un món on el creixement de l'economia té més importància que la transició cap a un planeta més sostenible. Cap grup d'escenaris SSP assoleix l'objectiu de l'Acord de París. Tot i així, si es miressin els escenaris que formen cada grup es podria comprovar com alguns dels escenaris de la família SSP 1 no arriben a l'anomalia d'1,5°C.

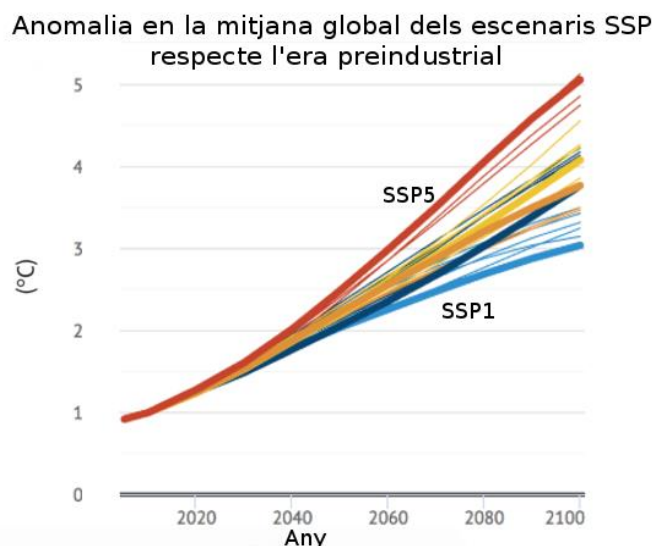


Figura 8: Anomalia en la temperatura prevista en els Escenaris SSP. Imatge adaptada de Carbon Brief (Carbon Brief, 2018)

L'augment imparable de les emissions de GEH i també l'augment de la temperatura mitjana semblen indicar que les negociacions que s'han dut a terme fins ara no han tingut l'efecte esperat, i és que en aquests moments hi ha dos grans problemes. El primer de tots és que no hi ha cap manera aprovada per repartir les emissions restants de CO₂. El segon problema ja ha estat mencionat anteriorment, i és que les NDCs dels països no assoleixen l'objectiu dels 2°C .

Per acabar, cal explicar que les figures anteriors on es mostren els diferents escenaris climàtics són producte de simulacions. En aquests moments, l'eina principal per dur-les a terme és la informàtica, i més en concret la supercomputació.

3. La supercomputació com a eina per analitzar el clima

Posar en pràctica alguns experiments en la vida real pot ser molt difícil. El preu o la dimensió del sistema són sovint factors que dificulten els experiments. Per exemple, si es volen saber els danys causats en un accident d'avió, no seria ètic fer l'experiment fent servir persones reals. Per això s'han de buscar alternatives per dur a terme aquest tipus d'experiments.

3.1. La supercomputació

La supercomputació, la branca de la informàtica que treballa amb ordinadors amb grans capacitats de càlcul, és la ciència que ha permès fer aquest tipus d'experiments d'una forma concreta i eficaç. La supercomputació també s'usa per fer experiments que es poden dur a terme en la vida real per tal d'abaratir els costos d'aquests.

L'eina principal d'aquesta ciència són els supercomputadors: ordinadors que, degut a les seves grans capacitats de càlcul, poden dur a terme les operacions en un temps menor. Això permet gestionar i treballar amb una quantitat molt gran de dades en molt poc temps i dur a terme processos que en un ordinador normal són molt més feixucs.

La principal diferència entre un supercomputador i un ordinador és la capacitat de càlcul. Aquest paràmetre es mesura en operacions de punt flotant per segon (FLOPS) o en altres paraules, les operacions que pot fer l'ordinador cada segon. Tots els supercomputadors tenen assignada una capacitat de càlcul, ja que cada any es crea una llista mostrant-ne la classificació mundial anomenada *TOP500*. Els ordinadors que figuren dins la llista són considerats supercomputadors.

La majoria de problemes i tasques que realitza un supercomputador es realitzen en paral·lel. Treballar en paral·lel significa fer servir una quantitat gran de processadors per realitzar diferents parts d'una mateixa tasca. Els dos beneficis principals de treballar d'aquesta manera són la reducció del temps d'espera i que es poden introduir més dades dins el problema degut al gran nombre de processadors treballant en aquests.

Segons el *TOP500*, el supercomputador Summit construït al Laboratori Nacional d'Oak Ridge dels Estats Units ha liderat la llista aquest 2019. Els Estats Units i

la Xina són els dos països amb més supercomputadors del món però tot i així també hi ha supercomputadors a Europa, un dels més importants es troba a Barcelona.

3.2. El supercomputador Mare Nostrum 4

Aquest supercomputador està a Barcelona i actualment es troba en la posició número 29 del *TOP500* amb un pic de 6.740,8 FLOPS i una potència de 1632 kW²⁵. Actualment, el Mare Nostrum forma part del Centre Nacional de Supercomputació format per la Universitat Politècnica de Catalunya, el Govern d'Espanya i la Generalitat de Catalunya. El Mare Nostrum també és reconegut per tenir el títol del supercomputador més bonic del món, degut a la seva localització dins una capella del recinte del carrer Jordi Girona, al districte de Sarrià-Sant Gervasi²⁶. A la figura 9 es pot observar l'estructura del supercomputador dins la capella.



Figura 9: Imatge del supercomputador Mare Nostrum. Font: <https://www.bsc.es/es/marenostrum/marenostrum>

El Centre Nacional de Supercomputació està dividit en quatre departaments diferents que s'encarreguen de treballar en els camps d'aquesta ciència: ciències de la computació, ciències de la vida, ciències de la Terra i aplicacions de la computació en la ciència i l'enginyeria (o CASE). Cada departament treballa en les aplicacions de la supercomputació en un camp concret mentre que el

²⁵ Segons la llista del TOP500 (TOP500, 2019)

²⁶ Segons DataCenter Dynamics (Barcelona Supercomputing Center-Centre Nacional de Supercomputació, 2017)

departament d'aplicacions de la computació en la ciència i l'enginyeria és un departament transversal, ja que la seva funció és trobar maneres per fer el software d'altres departaments més eficient.

En el Centre Nacional de Supercomputació s'han dut a terme projectes en molts camps diferents: la medicina, la meteorologia, l'astronomia, les ciències socials, les matemàtiques, la física quàntica etc. Un dels projectes més importants és el que el centre fa amb l'Hospital Clínic de Barcelona, on s'investiguen sobre els diferents tipus de càncer mitjançant la informàtica. El centre també fa projectes amb empreses amb l'objectiu de millorar el servei o producte ofert mitjançant la supercomputació. D'aquesta manera les empreses estalvien diners en proves i s'incrementa la probabilitat de satisfacció del client.

Des d'un punt de vista més tècnic, el supercomputador Mare Nostrum 4 conté 165.888 processadors. Aquests processadors permeten assolir una potència màxima de 11.150 bilions d'operacions per segon (11,15 Petaflops) i per funcionar necessita una potència de 1,3 milions de watts per any. La memòria central conté 384,75 Terabytes d'espai i una capacitat d'emmagatzematge en disc de 14 Petabytes²⁷. El Centre Nacional de Supercomputació també té unes infraestructures de *Big Data* que tenen una capacitat de 24,6 Petabytes²⁸.

Tal com s'ha mencionat anteriorment, dins d'aquest centre hi ha un departament de ciències de la Terra. Un dels objectius d'aquest departament és l'estudi del clima i del canvi climàtic. El departament duu a terme les anàlisis mitjançant els models climàtics i les simulacions.

3.3. Els models

Avui en dia es comet l'error de relacionar únicament un model amb la informàtica però també existeixen models reals com per exemple: les maquetes dels edificis.

²⁷ La principal diferència entre la memòria i la l'emmagatzematge en disc és que la memòria guarda coses a curt termini i l'emmagatzematge ho fa en terminis més llargs. En altres paraules, l'emmagatzematge s'utilitza per guardar arxius que s'han creat però que segurament no es necessitarà tornar a mirar. En canvi la memòria guarda arxius que es necessitarà mirar posteriorment. (Font: <https://www.kingston.com/latam/community/articledetail/articleid/29689>).

²⁸ Dades extretes de la pàgina web del BSC

(Font: <https://www.bsc.es/es/marenostrum/marenostrum/informacion-tecnica> i <https://www.bsc.es/es/marenostrum/marenostrum>)

És per això que un model es defineix com una reproducció real o bé digital, d'un sistema real. En el camp de la informàtica poden ser el producte d'una gran quantitat de dades treballades mitjançant una o més d'una equació matemàtica. Els models també inclouen unes instruccions d'ajuda per l'investigador, d'aquesta manera es poden interpretar una gran quantitat de dades de forma més organitzada. A partir del model s'acostuma a treure una conclusió o bé una predicció, en el cas de les ciències de la Terra.

Hi ha dos tipus de models climàtics. El primer de tots és el model de tipus empíric, que representa les dades del passat o en altres paraules, dades disponibles sense la necessitat d'aplicar cap expressió matemàtica. L'altre tipus de model, el model dinàmic, arriba a les dades finals mitjançant la física i les matemàtiques. Aquest tipus de model troba les dades del passat o bé les futures. És una reproducció més complicada de dur a terme.

3.3.1. Els models meteorològics i climàtics

Els models climàtics i meteorològics ja es duïen a terme abans del creixement de la ciència de la supercomputació. El primer home en parlar de les prediccions dinàmiques amb màquines va ser el físic i matemàtic anglès Lewis Fry Richardson (1881-1953) qui, a part de fer la primera predicció dinàmica, va imaginar-se un sistema per generar-les.

Richardson va fer les primeres prediccions a mà però aquestes tenien un inconvenient: es trigava sis setmanes a pronosticar el temps de les següents sis hores. Per aquesta raó va imaginar-se una màquina per realitzar la seva feina d'una manera més ràpida. La màquina s'estructurava com l'edifici de la figura 10, on les parets estan pintades amb un mapamundi. Darrere el mapamundi hi ha unes oficines amb treballadors que calculen el pronòstic de la porció de mapa que els pertoca mitjançant ordinadors. En acabat totes les dades s'envien al centre de l'edifici que a la vegada envia les dades a una estació de ràdio que les distribueix. L'estructura del central també té un focus vermell i un de blau que serveixen per indicar quina part del mapa té el pronòstic més recent i quina el més antic respectivament.

Tot i que aquest projecte va ser només un somni del científic anglès i mai es va realitzar, hi ha molts científics que ho comparen amb un supercomputador degut a la capacitat que té aquest tipus de tecnologia de realitzar prediccions ràpidament i en paral·lel, tal com ho imaginava Richardson.

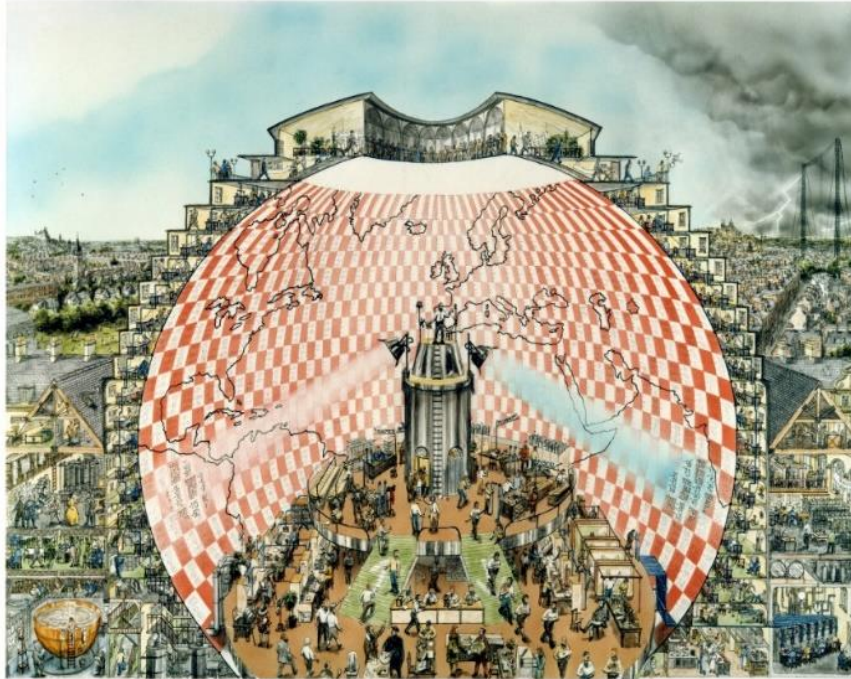


Figura 10: Weather Forecasting Factory per Stephen Conlin, 1986. Il·lustració de la idea de Richardson: la fàbrica de previsions meteorològiques mitjançant processos matemàtics. Font: Associació Europea de Meteorologia (EMM)(<https://www.emetsoc.org/resources/rff/>)

En les ciències de la Terra, els models climàtics i meteorològics serveixen per dur a terme anàlisis del clima i la meteorologia del planeta. Concretament, els models empírics es fan servir per fer prediccions meteorològiques a curt termini i en zones on el temps no varia molt. També es fan servir per saber les tendències que tenen els fronts i els canvis de pressió en zones determinades. Els models dinàmics es fan servir per recrear sistemes amb canvis de temps bruscos o per predir el clima en un futur llunyà. Els models també es fan servir per l'estudi del canvi climàtic ja que avui en dia és un fenomen que afecta les previsions a llarg termini.

Cal establir també una diferència entre els models climàtics i meteorològics. Els models climàtics serveixen per veure els canvis en l'atmosfera en el pas dels anys. D'aquesta manera es detecten les variacions que podran donar-se en un futur i preveure el tipus de clima en períodes de temps molts llargs (30 anys, un segle etc.). En canvi, els models meteorològics s'usen per la predicció de

fenòmens meteorològics en períodes de temps més curts (hores i dies). Aquest tipus de prediccions també es fa servir per saber quan i on es produirà un fenomen meteorològic d'una manera molt més concreta.

3.3.2. Construcció de models climàtics

El primer pas en la construcció de models climàtics és l'observació de totes les característiques del clima que es volen analitzar. D'aquesta manera se'n distingeixen les causes (canvis de pressió, corrents d'aire, estat del sòl, presència de fàbriques, ciutats etc.). Aquests aspectes han anat incorporant-se en els models durant els últims anys. Tal com es pot observar a la figura 11, els primers models (1970) només tenien en compte alguns pocs aspectes del planeta com la pluja i la presència de CO₂. No es va afegir un oceà fins al primer *Assessment Report* de l'IPCC (FAR) a l'any 1990. Tot i així, el mar era recreat com una superfície d'aigua poc profunda més semblant a un aiguamoll. En els següents *Assessment Report* de l'IPCC (SAR i TAR), es va tenir en compte un oceà profund i la presència de corrents marins. També es van incorporar altres elements com la presència de volcans, aerosols, superfície terrestre i rius.

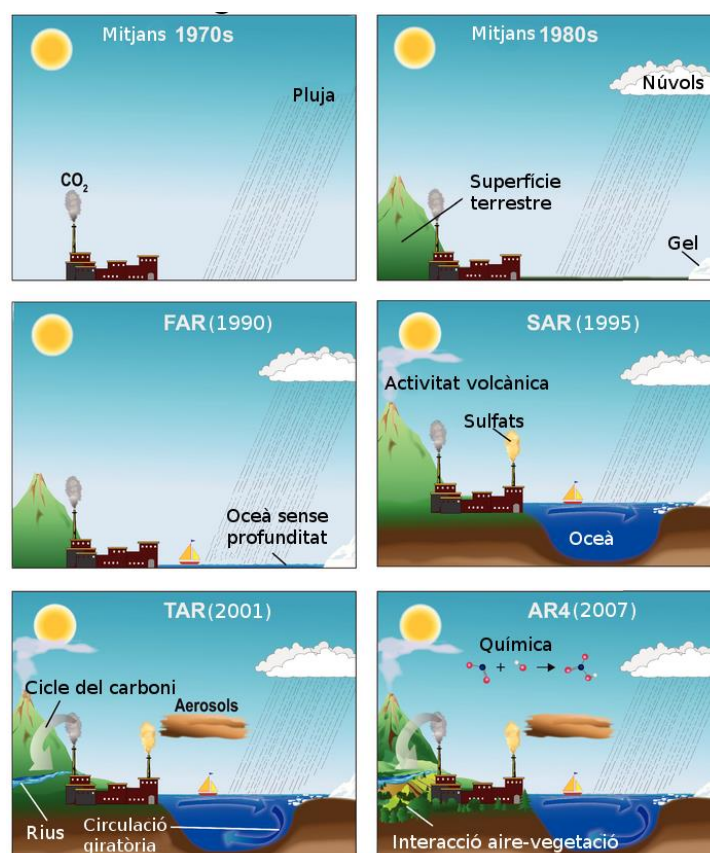


Figura 11: Evolució dels elements que es tenien en compte a l'hora de fer un model climàtic durant les dècades de 1970 i 1980 i en els quatre Assessment Report de l'IPCC. Imatge adaptada de l'informe IPCC 2007 (AR4) (Somerville, Le Treut, Cubasch, Ding, & Mauritzen, 2007, p. 99)

Actualment i tal com es pot observar a l'última vinyeta de la figura 11, el model és molt més complet. El fet de tenir en compte el màxim d'elements possibles fa que les previsions que surtin del model siguin molt més pròximes a la realitat. L'última vinyeta de la figura 11 és també una representació de tots els paràmetres que es van tenir en compte a l'hora de redactar el quart *Assessment Report* de l'IPCC (AR4) l'any 2007.

Tots aquests fenòmens inclosos a la figura 11 són "traduïts" a equacions matemàtiques. Les més usades són les lleis de la conservació de l'energia i la llei de Stefan-Boltzmann. La llei Stefan-Boltzmann, representada en l'equació 1, estableix una relació entre l'energia irradiada per un cos i la seva temperatura en Kelvins, que són proporcionals quan aquesta és elevada a la quarta i multiplicada per la Constant d'Stefan-Boltzmann²⁹.

$$E_{emesa} = \sigma \cdot T^4 \quad (1)$$

Per representar els fluids també es fan servir les equacions de Navier-Stokes. Unes altres equacions usades freqüentment són les de Clausius-Claperion, que estableixen una relació entre la pressió i els volums molars³⁰ d'una substància en dues fases diferents (líquid i vapor).

El següent pas és començar amb la construcció del model. La base de tots els models s'anomena malla. En la supercomputació i la informàtica, una malla és l'equivalent a una graella. Els càlculs necessaris per realitzar la previsió s'introdueixen dins de cada cel·la de la malla. Tot i així una cel·la mai és una entitat aïllada ja que comparteix les dades amb les veïnes perquè els fenòmens que es donen lloc dins de cada requadre repercutiran en les prediccions de les cel·les del voltant.

Les cel·les de les malles poden variar en la seva mida i d'aquesta manera, també varia la resolució del model final. Generalment, els científics prefereixen malles amb resolucions elevades, ja que s'ajusten més a la realitat. Tot i això, una

²⁹ La constant és igual a $5.670374419 \times 10^{-8}$ watts per metre quadrat i grau Kelvin.

³⁰ Volum molar és l'equivalent al volum en cada $6,022 \times 10^{23}$ partícules de la substància (un mol de la substància).

resolució més elevada comporta un augment del nombre de repeticions de càlculs.

No tots els ordinadors poden aguantar models de resolucions altes perquè la capacitat de càlcul és un element directament proporcional a la potència de cada ordinador i és per això que els models de resolucions altes només poden funcionar en els supercomputadors. Aquesta és la principal raó de l'ús de supercomputadors en aquest camp.

Les malles que es fan servir per l'estudi del clima són tridimensionals i cada cel·la correspon a una porció de mapa de la zona que es vol analitzar. Tal com es pot veure a la figura 12, les malles han augmentat en resolució en el seguit d'*Assessment Reports* de l'IPCC. El model del primer informe (FAR) tenia unes cel·les de costat equivalent a 500 km a la vida real. És per aquesta raó que gairebé no es poden distingir els països d'Europa. En canvi, les malles del tercer i quart *Assessment Report* (TAR i AR4, respectivament), tenen resolucions molt més elevades. D'aquesta manera es poden distingir els països europeus amb molta més facilitat i per tant, el model és molt més concret.

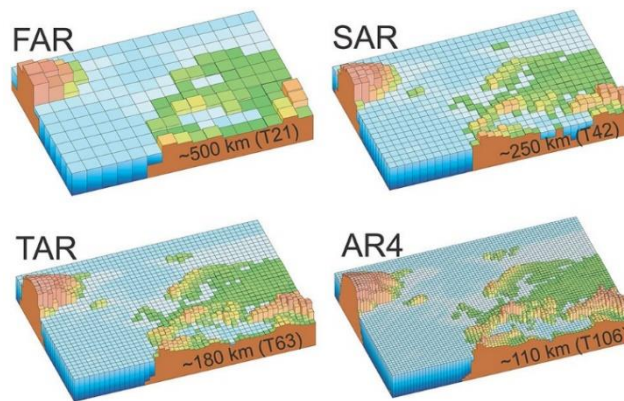


Figura 12: Evolució de les resolucions dels models en el seguit dels *Assessment Reports* de l'IPCC. Font: IPCC AR4 (Somerville, Le Treut, Cubasch, Ding, & Mauritzen, 2007, p. 113)

Tot i així, un model com el de l'*Assessment Report 4* (AR4), que és el més concret de tots els de la figura 12, encara continua sent poc precís en alguns casos. Un exemple clar és el de Catalunya, una zona amb presència de muntanyes altes (com el Pirineu o la serralada Litoral) i zones planes al nivell del mar (la depressió central, per exemple). Catalunya ocupa unes tres o quatre cel·les de la malla. Per tant, aquestes cel·les poden agrupar en un mateix espai

zones molt muntanyoses i zones que es troben a nivell del mar. D'aquesta manera, el model pot acabar donant resultats erronis.

Cal dir que aquest error no té efectes notables en els models que busquen previsions en superfícies grans (continents, oceans etc.) perquè la superfície analitzada és molt més extensa. En canvi, si es volen analitzar superfícies més petites (regions o països petits), aquesta falta de concreció és un gran problema perquè la malla només disposa d'unes poques cel·les per representar la zona. És per aquesta raó que no es fan prediccions de zones concretes amb models com el de l'AR4. Tot i així es poden seguir altres procediments per dur-les a terme. El més seguit avui en dia és el de la regionalització o *downscaling*, en anglès.

Avui en dia hi ha dues maneres de regionalitzar més fàcils i populars. El primer mètode, la regionalització estàtica, es duu a terme observant i formant equacions que defineixin el clima passat de la regió. Les equacions s'apliquen al futur i així se'n treuen noves previsions. El mètode funciona prou bé tot i la poca dificultat d'aquest però tot i així és una tècnica molt susceptible als errors, ja que aquest és un mètode basat en el clima del passat i per tant, no té en compte les variacions que aquest podria patir en un futur.³¹

El segon mètode és més exacte, s'anomena regionalització dinàmica. Per dur-lo a terme es fan servir models regionals d'alta resolució habitualment usats per les previsions meteorològiques. Aquest model s'ajusta amb una resolució més baixa i una àrea més gran a la de la regió que es vol estudiar i tot seguit s'ajusten els resultats del model segons les dades extretes d'un model global (com el de l'IPCC). Es fa funcionar el model i poc a poc, es va pujant la resolució d'aquest i baixant l'àrea estudiada.

Aquest mètode és simple i funciona molt millor que la resolució estàtica. Un inconvenient que té la regionalització dinàmica és que necessita un supercomputador per aconseguir aquest tipus de previsions perquè és una eina que treballa amb models d'alta resolució. Finalment, per comprovar si una regionalització funciona adequadament es fa funcionar demanant que creï

³¹ (Alarcón, Àvila, & Cunillera, 2011, p. 96-97)

models de dades ja passades per obtenir dades ja disponibles. La regionalització és bona si les dades coincideixen.

Tot i així, abans de començar a regionalitzar, s'ha de comprovar que els càlculs introduïts a la malla tampoc siguin erronis. Els càlculs s'han d'introduir en forma d'un codi de programació que pot tenir milions de línies degut a la seva complexitat. Aquestes línies es poden escriure en molts llenguatges diferents. Tot i així, els creadors de models acostumen a fer servir el llenguatge C i sobretot el *Fortran*.

El llenguatge *Fortran* va ser creat l'any 1957 per l'empresa IBM³². Va ser pensat per ser un llenguatge especial per a la computació científica. Avui en dia és un dels més usats en aquest camp i el més usat en la creació de models climàtics. Les equacions escrites en codi i la malla poden crear una gran varietat de models climàtics.

Tipus de models climàtics.

Tal com s'ha mencionat anteriorment en el treball, els cinc sistemes climàtics interactuen intercanviant energia i quantitat de moviment. És per això que la base de tota simulació climàtica són les equacions d'intercanvi d'energia. Tot i així els models climàtics es poden dividir segons el seu grau de dificultat a l'hora de calcular els valors.

Models de Balanç Energètic (MBE)

Aquests models calculen les variacions energètiques entre l'interior i l'exterior de l'atmosfera. La simplicitat d'aquests models es deu al baix nombre de variables calculades ja que l'únic objectiu que tenen és calcular la temperatura de la superfície terrestre.

Principalment, es basen en el fet que els canvis en l'emmagatzematge de calor són iguals a la diferència entre la radiació solar absorbida i la radiació terrestre emesa. Els altres paràmetres que es tenen en compte són el radi de la Terra, l'energia solar exterior que arriba a una superfície d'un metre quadrat d'atmosfera³³ i la constant de Stefan-Boltzmann, mencionada a l'equació 1.

³² Sigles d'*International Business Machines*.

³³ Aquest paràmetre s'anomena també Constant Solar (S). $S=1367,6 \text{ W/m}^2$.

A continuació es mostrarà un petit exemple pràctic del funcionament de dos tipus de models de balanç energètic. Els MBE més simples representen la Terra com una unitat, un cos que intercanvia energia entre el seu interior i l'exterior. Des del Sol, la Terra es veu com un disc. Per tant, l'àrea terrestre que rep la llum del Sol equival a l'àrea d'una circumferència, calculada fent servir l'equació 2 i on aquesta equival al producte del nombre pi i el radi elevat al quadrat. En aquest cas, les unitats del radi seran els metres. Per saber l'energia solar que rep tot el disc terrestre, es multiplica l'energia solar que rep un metre quadrat d'aquest (S) per l'àrea del disc calculat a l'equació 2. La fórmula correspon a l'equació 3 on l'àrea, en metres quadrats, es multiplica per la constant solar (S) en watts per metre quadrat. Les unitats del resultat són els watts.

$$A = \pi r^2 \quad (2)$$

$$E_{entrant} = A \cdot S \quad (3)$$

Tal com s'ha explicat a l'inici de treball, l'energia solar que arriba a la Terra és absorbida per la superfície o bé reflectida. Els models MBE també treballen amb l'energia absorbida del planeta. En els cossos negres, cossos que absorbeixen tota l'energia que incideix en aquests, la temperatura es pot calcular amb l'equació de Stefan-Boltzmann (equació 1). En els altres cossos, l'energia irradiada correspon al producte de l'energia irradiada per un cos negre i la superfície total de la Terra. Per tant, es pot definir l'energia irradiada com a l'equació 4.

$$E_{irradiada} = 4\pi r^2 \sigma T^4 \quad (4)$$

S'ha establert que el moment en què la energia entrant i sortint és la mateixa la temperatura es manté constant. És per això que, en aquest cas, es poden igualar les equacions 3 i 4 per treure'n l'equació 5 que, simplificada arriba a la conclusió que durant l'equilibri tèrmic, la quarta part de l'energia solar que es rep equival al producte de la constant de Stefan Boltzmann i la temperatura elevada a la quatre.

$$\pi r^2 S = 4\pi r^2 \sigma T^4 \rightarrow S = 4 \sigma T^4 \quad (5)$$

Si es fa l'experiment d'aïllar la temperatura mitjana terrestre (T) i calcular-ne el resultat, es seguirà el procediment de l'equació 6 on es pot trobar la temperatura perquè tots els altres elements són constants.

$$T = \sqrt[4]{\frac{S}{4\sigma}} = \sqrt[4]{\frac{1376,6}{4 \times 5,670374419 \times 10^{-8}}} \approx 279,1 \text{ K} = 5,97 \text{ °C} \quad (6)$$

Tal i com es pot observar la mitjana terrestre no equival a l'esperada (d'uns 15°C). La principal raó d'aquest error és l'omissió de molts factors que influeixen el model com per exemple, l'albedo.

Cal recordar que l'albedo és l'índex que mostra la quantitat d'energia solar reflectida per diversos elements de la Terra (atmosfera, núvols, neu etc.). Per tant, si s'afegeix l'albedo en els càlculs anteriors també s'estarà tenint en compte l'energia solar reflectida, un paràmetre que no es tenia en compte a l'exercici anterior. És per això que es crea una altra equació a partir de l'equació 3 afegint l'albedo. L'expressió resultant és l'equació 7.

$$E_{entrant} = \pi r^2 S(1 - a) = 4\pi r^2 \sigma T^4 \rightarrow S(1 - a) = 4\sigma T^4 \quad (7)$$

Es segueix el mateix procés que en l'equació 6 buscant l'equilibri tèrmic però afegint un albedo del 0,36³⁴. Tal com es pot comprovar a l'equació 8 que el resultat encara s'ajusta menys a l'esperat.

$$T = \sqrt[4]{\frac{S(1 - a)}{4\sigma}} = \sqrt[4]{\frac{1376,6(1 - 0,36)}{4 \times 5,670374419 \times 10^{-8}}} \approx 249,6 \text{ K} = -23,5 \text{ °C} \quad (8)$$

Tal com s'ha dit anteriorment, en aquest exemple pràctic s'han passat per alt moltíssims elements importants en el clima que complicarien les equacions però a la vegada aportarien precisió als resultats. De fet, dins el grup de models de

³⁴ 36% o en altres paraules, 0,36, és l'albedo mitjà de la Terra.

balanç energètic, n'hi ha que donen un resultat més precís ja que diferencien la transmissió d'energia de l'equador als pols. Aquests s'assemblen al següent tipus que s'explicarà, els models que poden diferenciar entre diferents tipus de capes de l'atmosfera.

Model Radiatiu-Convectoriu (MRC)

Aquest tipus de model estudia la temperatura mitjançant l'energia que circula verticalment entre les diferents capes de l'atmosfera i també la que circula horitzontalment entre les latituds. El model s'anomena Radiatiu-Convectoriu perquè mostra dos dels fenòmens que es donen lloc dins l'atmosfera. En primer lloc, la transmissió radiativa (una transformació de les molècules que té lloc quan hi ha canvis en l'energia); en segon lloc, la convecció (la transmissió d'energia en les diferents capes de l'atmosfera). Els MRC troben la temperatura però també són capaços de calcular la humitat.

Model Climàtic Global (MCG)

Aquest tipus de model, el més complet de tots, simula diferents fenòmens climàtics sense deixar de banda la transmissió d'energia usada en els models anteriors. Els fenòmens climàtics d'un Model Climàtic Global són simulats a partir de les interaccions entre l'atmosfera, la superfície terrestre, l'oceà i les extensions de gel perquè aquests són considerats els quatre elements més influents en la predicció del clima.

Cal tenir en compte que els quatre sistemes interactuen intercanviant calor, energia i quantitat de moviment. En els altres dos tipus de simulacions es treballava un sistema climàtic aïllat i les interaccions entre els altres sistemes no variaven ja que les transmissions d'energia entre els altres sistemes es representaven com a valors d'entrada fixes en tot el transcurs de la simulació. Tot i així, els models han anat evolucionant amb el temps i avui en dia es fa servir la tècnica de l'aparellament per unificar els models de diferents sistemes. L'aparellament és la unió de dos o més models que mostrin sistemes diferents mitjançant un aparellador.

Un dels models aparellats més importants d'Europa és el Model del Sistema Terrestre de la comunitat Europea (també anomenat EC-EARTH). Aquest model va néixer a partir del model meteorològic del Centre Europeu de Prediccions

Meteorològiques a Mitjà Termini i actualment es fa servir en molts supercomputadors d'arreu del món, també en el Mare Nostrum 4. EC-EARTH consta de diversos models que s'encarreguen de simular els diferents sistemes units mitjançant un aparellador anomenat OASIS. Els dos models més importants dins d'EC-EARTH són els que s'encarreguen de simular l'atmosfera i l'oceà perquè ocupen una gran part de la superfície terrestre.

L'encarregat de simular l'atmosfera dins el model EC-EARTH és el Sistema de Predicció Integrat (IFS, de les sigles del nom anglès) amb el model T1279L91. Les característiques principals d'aquest model són les seves cel·les, de costat equivalent a 16 kilòmetres en la realitat i un total 2,1 milions de cel·les en tota la malla. En segon lloc es troba el model ORCA12L75 del Centre per la Modelització Europea de l'Oceà (NEMO, de les seves sigles en anglès). Les cel·les del model ORCA12L75 tenen un costat equivalent a 9 km en la realitat i un total de 13,2 milions de cel·les. Els models del NEMO van aparellats amb altres models que treballen més específicament alguns elements de la superfície marítima. Un dels més importants és el model LIM, responsable de representar les extensions gelades sobre el mar.

Aquests models posseeixen una resolució molt gran que només un supercomputador és capaç de suportar. L'ordinador haurà de repetir els càlculs tantes vegades com punts tingui la graella per aconseguir resultats com els de la figura 13, fets amb els dos models mencionats anteriorment.

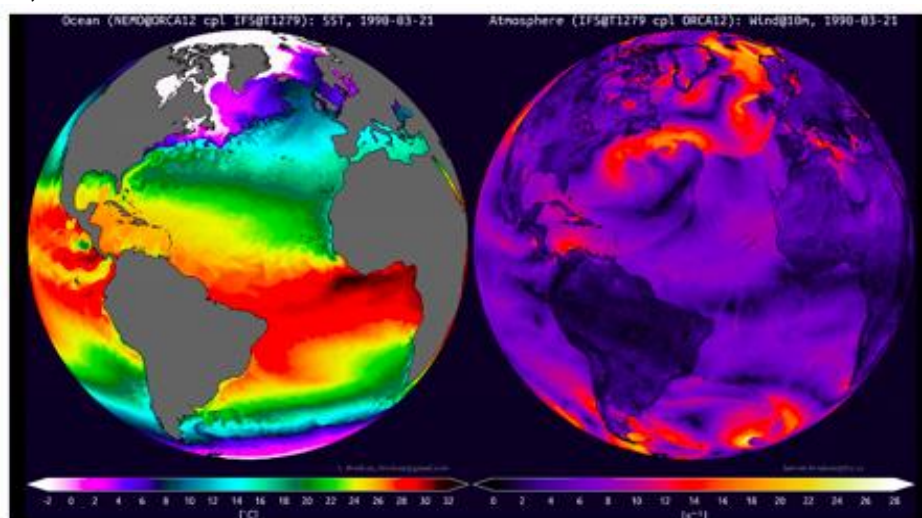


Figura 13: A l'esquerra es poden observar simulacions portades a terme amb el model ORCA12L75 amb l'objectiu de saber la temperatura de la superfície marítima. A la dreta, simulació de la rapidesa del vent a deu metres d'altura feta pel model T1279L91. (Miguel Castrillo; Thomas Arsouze; Kim Serradell; Mario Acosta, 2019)

El Model Climàtic Global és el més precís de tots els tipus de models però tot i així no és un model perfecte, ja que està sotmès a molts elements que poden acabar donant dades totalment equivocades.

La precisió en els models

Tal com ja s'ha explicat, hi ha diversos factors que fan que un model sigui més fiable. El primer de tots és la resolució d'aquest. Els models més fiables són aquells amb cel·les més petites ja que dediquen tots els càlculs a una porció més petita d'espai. Un altre factor que afecta la certesa dels models és la manca d'observacions. S'han de fer moltes observacions en el clima per identificar-ne els fenòmens que el causen.

Altres fonts d'errors són els errors interns del model. És per això que hi ha molts científics que s'encarreguen de millorar i crear-ne noves versions i així aportar precisió. Cal dir també que hi ha uns quants aspectes difícils de representar en un model com per exemple, els núvols. Un núvol pot aportar precipitacions i a la vegada impedeix que la radiació solar arribi directament a la Terra. Per aquesta raó representar un núvol va ser un repte pels científics³⁵.

Ara bé, hi ha un aspecte més difícil en els models, la presència de la incertesa. Cal dir que el clima terrestre és un sistema determinista i que per tant cap fenomen és producte de l'atzar però tot i així, les condicions inicials d'aquest (o les que s'introdueixen inicialment en un model climàtic) són molt sensibles als errors. Aquest tipus de comportament és el que estudia la teoria del Caos. En el camp de les prediccions meteorològiques, els comportaments caòtics es produeixen quan les prediccions superen un límit temporal i degut a la sensibilitat de les fórmules als errors en les condicions inicials o en el funcionament de l'ordinador. Aquests comportaments acaben donant prediccions més errònies en el transcurs del model i provoquen una variació dels resultats cada vegada que es duu a terme una mateixa simulació.

Es pot intentar millorar el funcionament i la capacitat de càlcul de l'ordinador però és impossible crear l'ordinador perfecte i per tant s'ha d'intentar millorar el procés d'una altra manera. Actualment el procés més seguit per millorar aquests errors d'incertesa s'anomena predicció per conjunts. Aquest mètode consisteix en

³⁵ (Somerville, Le Treut, Cubasch, Ding, & Mauritzen, 2007)

canviar lleugerament les condicions inicials del model segons les incerteses i dur a terme prediccions amb aquestes. D'aquesta manera s'aconsegueix un ventall més gran de prediccions i es coneixen els errors que la simulació pot patir pels errors de funcionament i en les condicions inicials. Tot i així aquest és un tema bastant difícil i per tant, no s'especificarà més al llarg del treball.

3.3.3. Fer funcionar un model climàtic

Un cop creat, el model climàtic s'envia a tots els centres que el faran servir perquè aquests l'instal·lin, el compilin i l'adaptin al supercomputador. Quan ja està instal·lat, els científics procedeixen a treballar amb aquest. Les persones que fan servir models climàtics no han de tornar escriure les equacions mencionades anteriorment perquè el model ja ha estat creat prèviament per científics i programadors experts en el tema. El que han de fer els científics és introduir les condicions inicials en el model. Les condicions inicials són les dades meteorològiques corresponents a un període ja passat. Aquestes dades poden adquirir-se de diferents maneres. Tot i així cal recordar que només disposen de dades concretes des de la segona meitat del segle XX, quan es van llençar els primers satèl·lits. Les dades anteriors són recollides des de diferents mitjans (vaixells, reculls de dades personals, diaris etc.). Anant més enrere en el temps, les dades es recullen d'escrits que parlen de la meteorologia o d'algun fenomen estrany que s'hagués donat durant l'època. A part d'aquest tipus de dades, la paleoclimatologia estudia els elements de la natura per saber quins havien estat els climes anteriors. Els mitjans més usats en aquests casos són els anells dels arbres i els testimonis de gel: blocs de gel que emmagatzemen bombolles d'aire de fa milions d'anys. Una altra font de dades és el pol·len que, sense la presència d'oxigen, es conserva durant milers d'anys i pot mostrar el tipus de vegetació passat i el clima que va associat a aquesta. Les dades agafades de la natura s'anomenen dades de reanàlisi i avui en dia són les de referència. Una altra font de dades és el producte de les simulacions del clima passat fetes amb supercomputadors, aquest tipus de dades s'anomenen dades històriques.

Deixant de banda el tipus de condicions inicials, es procedeix a realitzar el següent pas, connectar-se al supercomputador i ordenar que iniciï el model amb les condicions inicials noves. També s'han de definir uns altres elements anomenats *namelists*, que corresponen a tots aquells elements dels quals se'n

vol obtenir les dades al final. És important definir els *namelists* degut a la gran quantitat de dades resultants.

El següent pas és fer funcionar el model carregat al supercomputador. En un model aparellat com EC-EARTH, la simulació funciona d'una manera semblant a la indicada a la figura 14. La simulació de la figura 14, que en aquest cas s'aplica en un període de dos anys, comença a funcionar en el seu primer any (any 1) i es divideix en dos simulacions secundàries. La primera es dedica a simular l'atmosfera i la segona simula l'oceà.

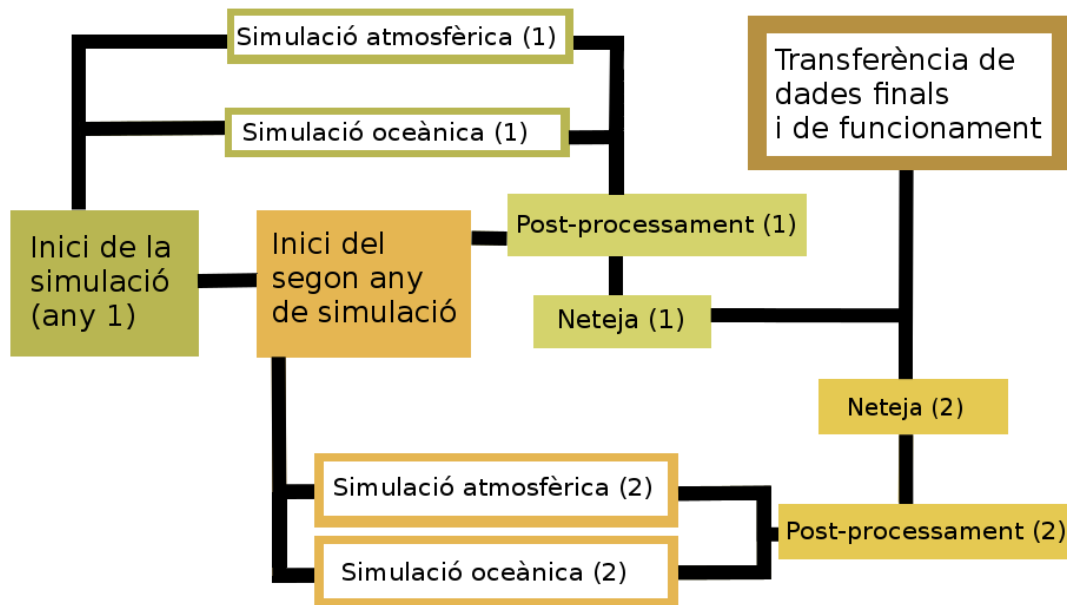


Figura 14: Esquema del funcionament d'un model climàtic.

Un cop acabada la simulació del primer any, l'ordinador ordena començar a simular el segon any, estructurat de la mateixa manera que el primer. Tot i així, abans de començar el segon any de simulació, les dades finals del primer any passen un post-processament. El post-processament guarda les dades resultants de cada any de simulació per agilitzar la feina en el cas que per exemple, es volgués simular un altre cop només el segon any. D'aquesta manera les condicions inicials no són les del principi del model sinó les dades resultants del primer any de simulació i el model només haurà de simular l'any en concret.

El següent pas és el de la neteja que, tal com indica el nom, s'encarrega d'eliminar tots els arxius i les dades innecessàries que s'han produït durant els càlculs. Un cop netejat, els resultats del model s'envien a l'usuari d'aquest. Els

que es mostraran seran els ja mencionats *namelists*. També s'enviaran les dades de funcionament del model.

3.3.4. Anàlisi del funcionament d'un model

Un cop el model ha acabat la seva tasca, es mostren dos tipus de dades resultants: les primeres són les dades climàtiques que s'analitzaran posteriorment, i el segon, les dades de rendiment, que mostren com ha funcionat el model al llarg de la seva execució. Les dades del funcionament d'un model són la base d'una de les vessants més importants de la informàtica que estudia com millorar els models augmentant-ne el rendiment.

La gran quantitat de dades de rendiment d'un model s'estructuren en forma de traces que mostren quina ha estat l'eficiència de la simulació en diferents camps. Una traça és un gràfic com el de la figura 15 que, en aquest cas, ensenya la duració de la transmissió de missatges entre processadors durant el funcionament del model EC-EARTH.

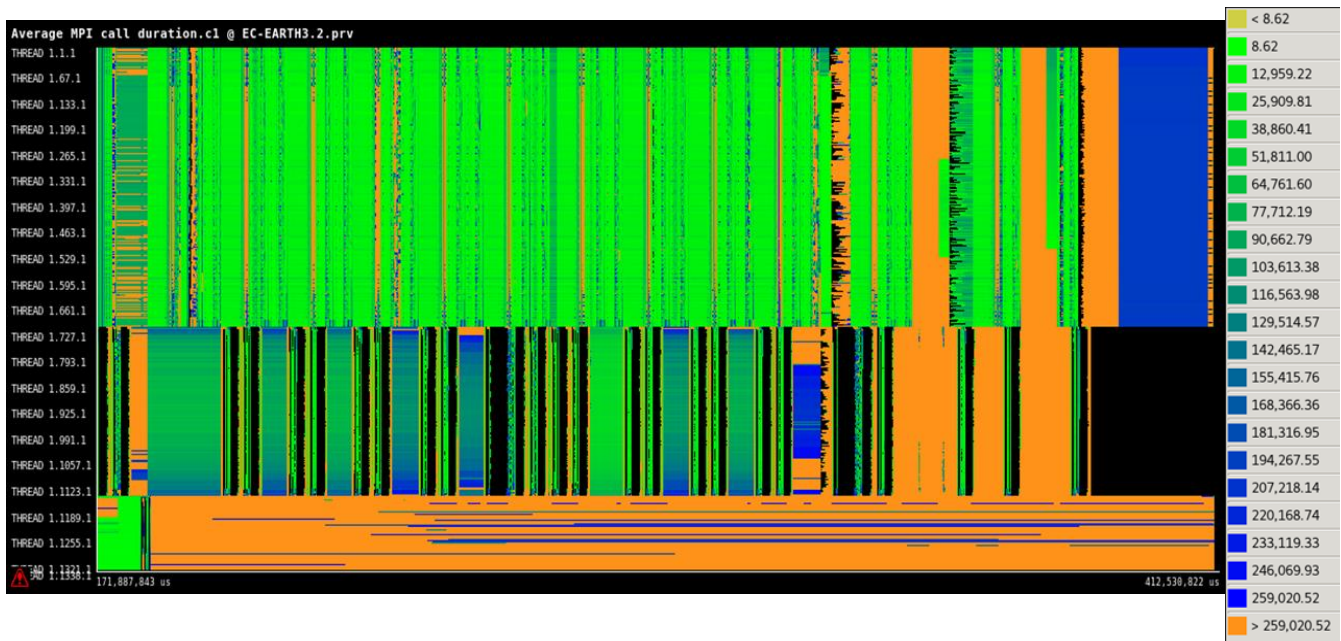


Figura 15: Traça que mostra la duració de la transmissió de dades entre processadors del supercomputador. Aquesta traça correspon al model EC EARTH de Barcelona Supercomputing Center. (Miguel Castrillo; Thomas Arsouze; Kim Serradell; Mario Acosta, 2019)

Les traces també mostren els problemes que apareixen durant l'execució del model. D'aquesta manera es sap en quin moment s'ha produït l'error i quines han estat les deficiències del programa durant el seu funcionament. Aquest

anàlisi desemboca a tot un camp de la informàtica que es dedica a millorar el rendiment dels models. Per tant, l'objectiu de millorar el rendiment serà intentar que el model realitzi la seva tasca més ràpid sense deixar d'obtenir els resultats adequats.

Velocitat de simulació

Un dels mètodes per agilitzar el rendiment d'un model és reduir el temps de simulació. Una manera de fer-ho és incrementant el nombre de processadors que treballen en aquest. La velocitat de simulació d'un model, mesurada en Anys de Simulació Per Dia (ASPD o SYPD, de l' anglès) és directament proporcional a la quantitat de processadors. Tot i així i tal com es pot observar a la figura 16, aquest paràmetre, també anomenat escalabilitat, té una asymptota en un moment determinat quan la velocitat tendeix a poc més de 0,6 SYPD. Això vol dir que hi ha un moment on l'increment del rendiment és mínim. En aquest moment ja no surt a compte elevar el nombre de processadors perquè el rendiment no millora i comporta un cost addicional, innecessari per la mínima millora.

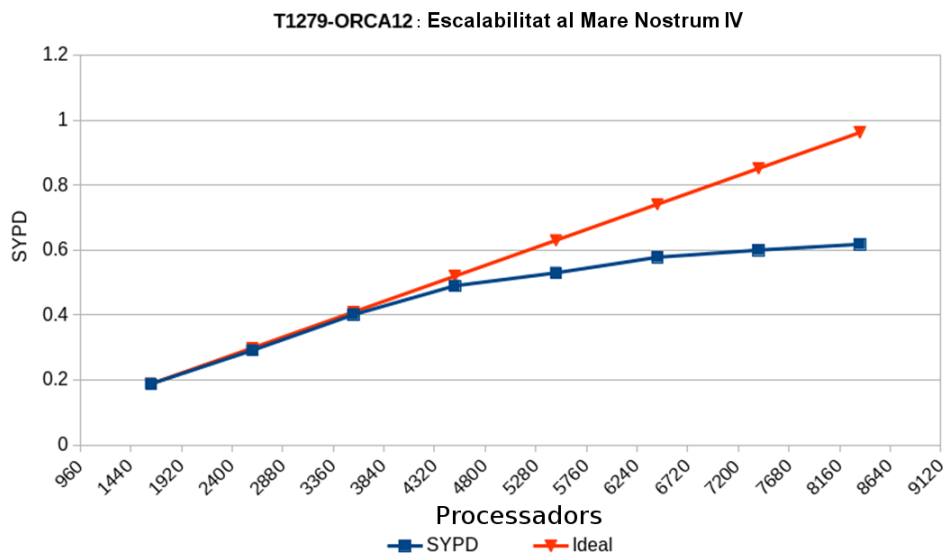


Figura 16: Escalabilitat del mode EC-EARTH en el Mare Nostrum IV. (Miguel Castrillo; Thomas Arsouze; Kim Serradell; Mario Acosta, 2019)

Quan una tasca es duu a terme en paral·lel, molts processadors calculen diferents parts del mateix problema però sempre hi ha un moment en què alguna part del problema que ja no es pot dividir més. Aquest percentatge és el que limita la velocitat d'execució en un model.

L'altre paràmetre que serveix per agilitzar una simulació és l'ajustament de la freqüència del processador. Tots els processadors tenen un rellotge intern que comença una nova instrucció (o càlcul) cada cop que aquest avança. La freqüència és el nombre d'avançaments que es produeixen en un segon. A vegades el procés s'acaba abans de l'avançament del rellotge i hi ha una petita porció de temps malgastada. En aquests casos s'augmenta la freqüència, i per tant el rellotge accelera. S'ha d'anar en compte de no augmentar massa la freqüència perquè l'avançament del rellotge no es produeixi abans de la finalització de la instrucció ja que en aquests casos, el càlcul no pot acabar.

Fins ara la millor manera que s'ha trobat per fer funcionar un processador eficientment és dividint les tasques en parts i fer que cada avançament del rellotge calculi una part de la tasca. D'aquesta manera la quantitat de càlculs fets en un avançament disminueix, i el processador adopta la capacitat de calcular les parts de dues instruccions diferents a la vegada, fent que en aquell moment s'estiguin portant a terme dues instruccions simultànies. Ara bé, si un dels càlculs necessita una dada que s'ha de calcular simultàniament, la instrucció corresponent s'haurà d'aturar i esperar que l'altra acabi per continuar.

La freqüència del processador no és un paràmetre ajustat pels investigadors que treballen amb el model. Hi ha gent que es dedica especialment a aquesta vessant de la informàtica amb objectiu d'augmentar el rendiment dels ordinadors. Aquest és un camp en què s'investiga constantment i on els qui hi treballen intenten millorar totes les parts de la màquina per obtenir una eficiència òptima i que a la vegada continuï treballant bé. Hi ha més maneres d'augmentar el rendiment del supercomputador, però aquestes són les dues més importants.

3.3.5. Resultats del model

Un cop vistes les dades de funcionament del model, el següent pas serà el de veure'n els resultats finals. Cal recordar que els que es mostren són aquells que s'han demanat prèviament en els *namelists*, i el número de dades pot ser molt gran si els resultats finals mostren moltes variables. La figura 17 mostra com ha evolucionat la quantitat de dades climàtiques del departament de ciències de la

Terra del Centre Nacional de Supercomputació. Tal com es pot observar, és un dels departaments que necessita més espai per emmagatzemar dades.

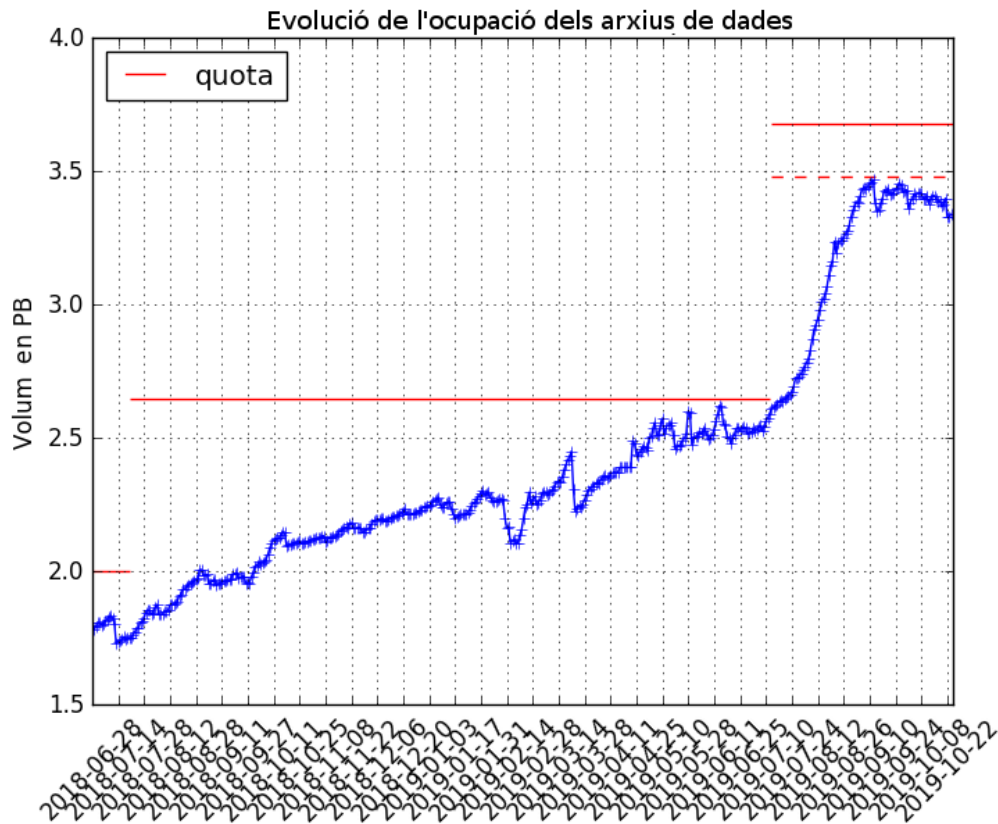


Figura 17: Evolució de l'espai ocupat per les dades climàtiques del departament de ciències de la Terra. Font: (Barcelona Supercomputing Center-Centre Nacional de Supercomputació., 2019)

Una curiositat de la figura 17 és que cada cop que el gràfic pateix una baixada molt precipitada, com per exemple la situada el dia 31 de gener del 2019, és perquè tots els membres del departament reben un avís dient que s'està assolint la quota màxima de dades i s'esborren totes les dades innecessàries alhora.

Vista la gran quantitat de dades resultants del model, els investigadors procedeixen a organitzar-les i analitzar-les. En aquest treball seguirà el mateix procediment i per tant, ara es procedirà a analitzar les dades.

4. Dades de reanàlisi

En aquest apartat es comencen a presentar els resultats del treball pràctic desenvolupat al llarg del Treball de Recerca. L'objectiu és dur a terme diferents representacions de les dades meteorològiques de reanàlisi. Cal recordar que les dades de reanàlisi són aquelles que han estat recollides de les fonts escrites i de diferents mitjans naturals (pol·len, arbres, gel etc.). Aquest paquet de dades ha estat creat per l'Agència Europea de Prediccions Meteorològiques a Mitjà Termini, i comprèn totes les temperatures entre els anys 1900 i 2010, ambdós inclosos.

L'altre objectiu principal d'aquest apartat és veure si les anomalies antropogèniques es veuen reflectides en aquests registres de temperatures. Per altra banda, aquest capítol també ha servit per aprendre a organitzar i representar dades meteorològiques mitjançant la informàtica ja que totes les figures obtingudes són el producte del codi de l'annex.

4.1. Procés utilitzat

A continuació s'ensenyarà el procés estàndard que s'ha seguit per representar les dades. Aquest procés ha variat una mica segons la finalitat de la representació que s'havia de fer però degut a la seva dificultat, tots els processos que derivin d'aquest s'inclouen només en l'annex.

Per començar, cal fer-se una idea del format de l'arxiu de dades meteorològiques prèviament descarregat. Totes les dades meteorològiques estan estructurades en matrius. Una matriu és una graella comparable a les prestatgeries d'una biblioteca perquè les dades d'aquesta també estan estructurades segons uns criteris. En aquest cas es treballarà amb la matriu "t". Aquesta matriu conté totes les dades de reanàlisi i segueix l'estructura representada en l'equació 9. La primera dimensió correspon a l'any comprès entre 1900 i 2014. Per tant, si s'emplena la primera casella de la matriu amb un 0, es mostraran les dades del primer any de tots, l'any 1900³⁶.

$$t = [any, mes, latitud, longitud] \quad (9)$$

³⁶ En el llenguatge utilitzat per realitzar el programa, el *Python*, es comença a comptar a partir del número 0, per això l'any 1900 correspon a l'any 0 i no a l'any 1.

La segona dimensió de la matriu correspon al nombre de mes, on el mes 0 equival al gener i el mes 11 és el desembre. La tercera i quarta dimensió corresponen a la latitud i a la longitud respectivament. Aquestes dimensions s'hauran d'emplenar amb els valors que es vulguin saber de la latitud i longitud. Ara bé, si es vol mostrar tot el conjunt de dades de latitud, longitud, mes o any, s'haurà d'indicar amb el signe ":" en l'espai corresponent de la matriu. D'aquesta manera es podrà visualitzar cadascun dels 51200 valors de temperatura que conté aquesta matriu.

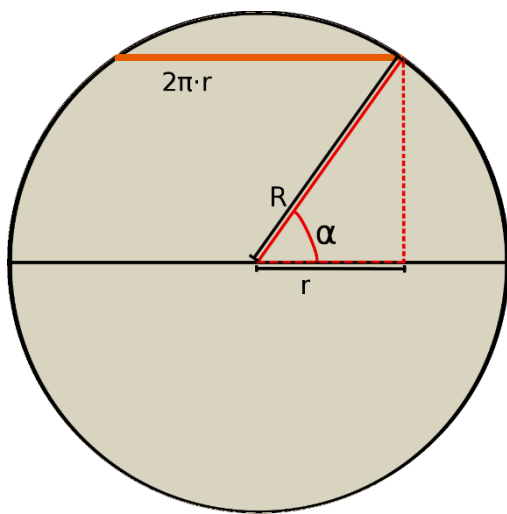
Per fer-ho més aclaridor, tot seguit es mostra un exemple pràctic on es demana que es mostrin les dades de l'any 2002 (any 102 en el programa) en tots els seus mesos, latituds i longituds, marcats amb el signe ":". Per tant, el resultat és la matriu de l'equació 10.

$$t = [102, :, :, :] \quad (10)$$

Si ara es demanés a l'ordinador que representés l'equació 10 en un gràfic, la figura no es podria realitzar perquè la matriu que s'intenta representar té més dimensions que el gràfic. Per aquesta raó el següent pas en aquest procés és el de treure dimensions en la matriu per tal que només en quedi una que correspondrà a l'eix x, mentre que a l'eix y hi haurà les temperatures. El mètode utilitzat per reduir les dimensions de la matriu és el de la mitjana aritmètica. Per tant, el següent pas és realitzar la mitjana de totes les temperatures en cadascuna de les longituds de tal manera que un cop fetes, quedi un valor de temperatura per a cada latitud.

Per eliminar la dimensió de les latituds, que és l'últim pas abans de representar les dades, s'ha de seguir un procediment una mica diferent al d'abans. En aquest moment es disposa d'un valor mitjà per cada latitud producte de les mitjanes de les longituds però cal pensar que la Terra té una forma semblant a la d'una esfera i a diferència de les longituds, les latituds no tenen la mateixa llargada. Per tant, la latitud més llarga, l'equador, no pot tenir el mateix pes en la mitjana que les latituds 40°N o 30°S. Per tenir en compte la diferència de llargada entre les latituds es segueix un mètode anomenat pes de la latitud.

Aquest mètode consisteix en donar la importància de la temperatura en la mitjana de latituds segons el perímetre de la latitud corresponent. Tal com es pot veure en l'equació 11, el perímetre de qualsevol latitud és igual al producte del nombre pi multiplicat per dos i pel radi de la circumferència en aquest punt de l'esfera (r a la figura 18). El radi en el punt determinat de l'esfera equival al producte del radi de la Terra (R a la figura 18) pel cosinus de l'angle de la latitud, tal com mostra l'equació 12. Per tant, es pot dir que el perímetre de l'esfera en una latitud determinada és igual al producte del nombre pi multiplicat per dos i pel radi de la Terra multiplicat pel cosinus de l'angle de la latitud tal com indica l'equació 13.



$$\text{Perímetre} = 2\pi r \quad (11)$$

$$r = R \times \cos \alpha \quad (12)$$

$$\text{Perímetre} = 2\pi \times R \times \cos \alpha \quad (13)$$

Figura 18: Demostració del mètode del pes de la latitud.

Tenint en compte el raonament anterior, a l'hora de fer les mitjanes es sumaran totes les temperatures multiplicades pel perímetre tal com mostra el numerador de l'equació 14. El perímetre serà el factor que determini el pes que té la latitud en la mitjana.

$$T(t) = \frac{\sum_{\text{latitud}}^f 2\pi \cdot R \cdot \cos(\text{latitud}) \cdot \text{temperatura}(\text{latitud})}{\sum_{\text{latitud}}^f 2\pi \cdot R \cdot \cos(\text{latitud})} \quad (14)$$

L'equació 14 es simplificarà i acabarà donant l'equació 14, on la temperatura (T) en cada unitat de temps equival a la suma de tots els productes del cosinus de la latitud per la temperatura corresponent a aquesta. Tot estarà dividit per la suma dels cosinus de totes les latituds.

$$T(t) = \frac{\sum_{latitud}^f \cos(latitud) \cdot temperatura(latitud)}{\sum_{latitud}^f \cos(latitud)} \quad (15)$$

4.2. Representació de temperatures

Per representar les temperatures en un període de temps es repeteix l'equació 15 tants cops com el nombre d'unitats de temps que es vol emprar. Per exemple, si el resultat es vol en mesos, l'operació es repetirà dotze vegades. En la figura 19 es representa la temperatura mitjana de l'any 2002 en cada mes de l'any mencionat. La figura 19 també equival a la representació gràfica de l'equació 10 simplificada.

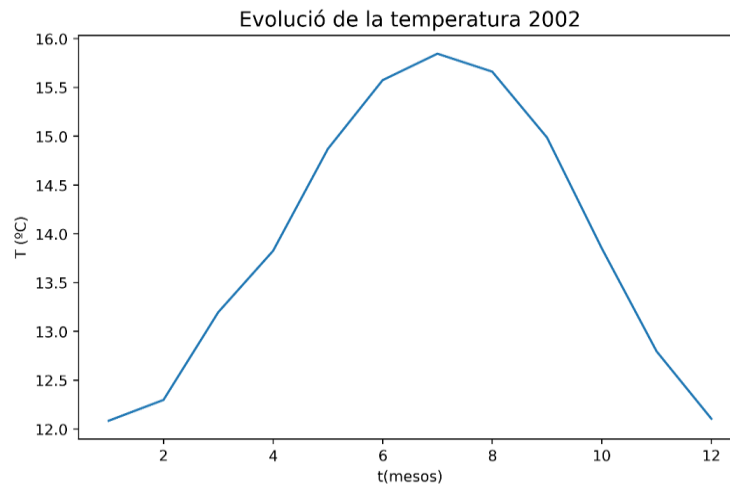


Figura 19: Evolució de la temperatura mitjana terrestre en l'any 2002.

Els factors principals pels quals es creu que s'ha seguit el mètode adequat són que la mitjana de temperatures al voltant dels 14°C s'adequa a l'esperada i que la corba de temperatura és més alta durant els mesos d'estiu a l'hemisferi nord.

En el següent exercici es procedirà a comparar l'any 2002 amb el primer any del qual es tenen dades, el 1900. El resultat és la figura 20, on es pot veure una clara diferència entre les temperatures dels dos anys.

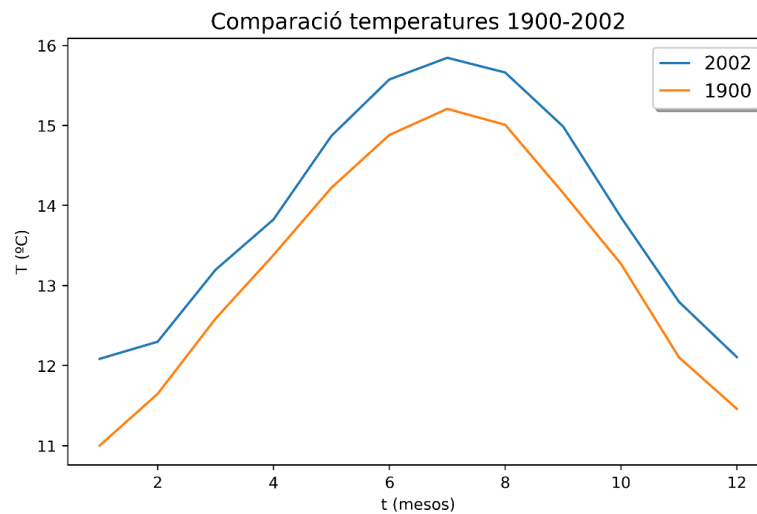


Figura 20: Comparació entre les temperatures dels anys 2002 i 1900.

Si es demana mostrar la diferència de temperatura mitjana entre els dos anys, el resultat aproximat és d'uns 0.681°C . Aquesta diferència podria ser conseqüència de les anomalies antropogèniques en la temperatura, també conegudes com a escalfament global. Tot i així, no es pot confirmar que aquesta diferència de temperatura sigui només degut a l'escalfament global perquè s'estan agafant mesures de dos anys concrets on es podrien haver donat algunes anomalies puntuals que causessin diferències més grans.

Una pujada de la mitjana terrestre equivalent a $0,6^{\circ}\text{C}$ pot semblar d'entrada un augment poc significatiu, però no és així. Actualment, un exemple de la importància d'aquest increment en els boscos és l'avançament de la crecudada de les fulles i de la floració, que té lloc entre una i quatre setmanes abans del previst. Per altra banda, la caiguda de les fulles es retarda entre una i dues setmanes³⁷.

³⁷ (Alarcón, Àvila, & Cunillera, 2011, p. 127)

Tot seguit, i deixant de banda les anomalies, es procedeix a fer la representació de la temperatura del planeta per hemisferis en el transcurs de l'any 1986. El resultat, la figura 21, concorda amb l'esperada ja que inclou un recorregut de temperatures que augmenta en els mesos de juliol i agost corresponent a l'hemisferi nord i per altra banda, un recorregut que disminueix en els mateixos mesos, corresponent a l'hemisferi sud.

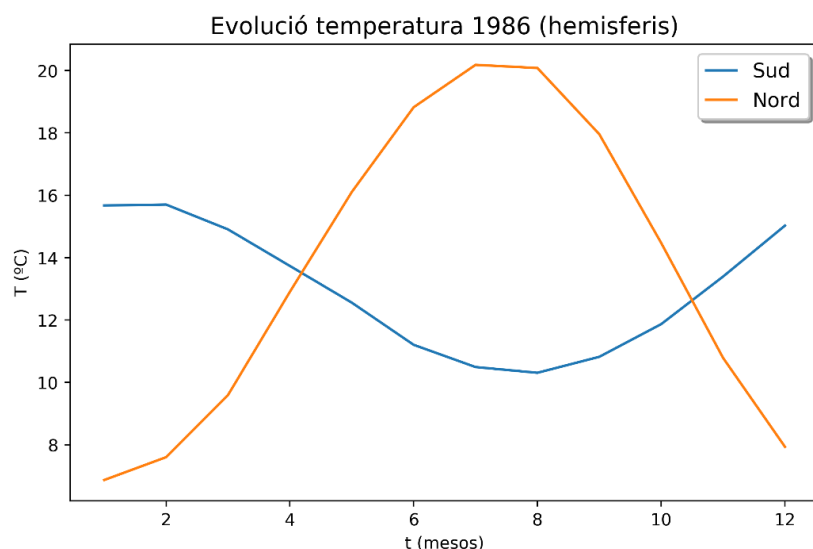


Figura 21: Evolució de la temperatura en el transcurs de l'any 1986 dividit per hemisferis.

Una altra característica a tenir en compte és que la variació de la temperatura en l'hemisferi sud és molt menys pronunciada que la de l'hemisferi nord. L'hemisferi sud pateix una variació d'uns sis graus entre la temperatura mínima i la màxima i en canvi, la mitjana de l'hemisferi nord té una variació aproximada de tretze graus, el doble. A la figura 21 també es pot apreciar que l'hemisferi nord té hiverns més freds i estius més calorosos, comparat amb l'hemisferi sud.

Tot i així cal tornar a recordar que en aquest cas s'estan agafant dades d'anys concrets i que no es pot generalitzar i dir que els hiverns i els estius han estat sempre així en els hemisferis. Qualsevol anomalia que es donés lloc durant l'any podria acabar afectant les dades del gràfic.

Continuant amb les anomalies, tot seguit es mostra un gràfic amb les anomalies que s'han donat lloc en el transcurs de tots els anys de les dades. Les anomalies són les perturbacions que ha patit la temperatura degut als factors explicats anteriorment. El procediment per aconseguir saber-les es duu a terme mitjançant l'equació 16, on la temperatura de les anomalies equival a la resta de la temperatura total, la de les dades de l'arxiu, amb la temperatura del clima, producte de la mitjana de totes les temperatures de tots els anys en cada mes. Si es calcula l'anomalia mitjana per any el resultat és la figura 22.

$$t_{anomalies} = t_{total} - t_{clima} \quad (16)$$

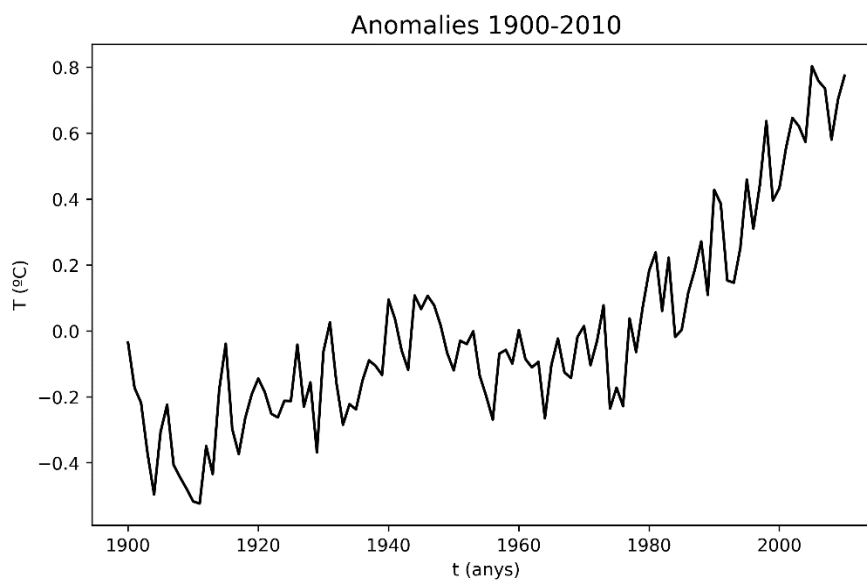


Figura 22: Anomalies en la temperatura en el en període 1900-2010.

Les anomalies puntuals en la Terra causen que la corba de la figura 22 sigui molt accidentada. Tot i així, també es pot observar com globalment, la temperatura de les anomalies ha anat pujant en el pas dels anys i s'ha accelerat en les últimes dècades. De fet, a l'any 2010 la diferència arriba a 0,8°C, una anomalia molt notable. Per tant, vol dir que hi ha zones on l'anomalia supera aquest valor.

Per fer-ho més entenedor, es demana a l'ordinador que mostri en un mapa quines són les anomalies en la temperatura a l'any 2010. D'aquesta manera es poden veure quines són les anomalies de temperatura en cada punt del planeta. El resultat és la figura 23 on es pot veure com hi ha moltes zones del planeta on l'anomalia és superior a un grau. En canvi, hi ha menys zones amb anomalies negatives.

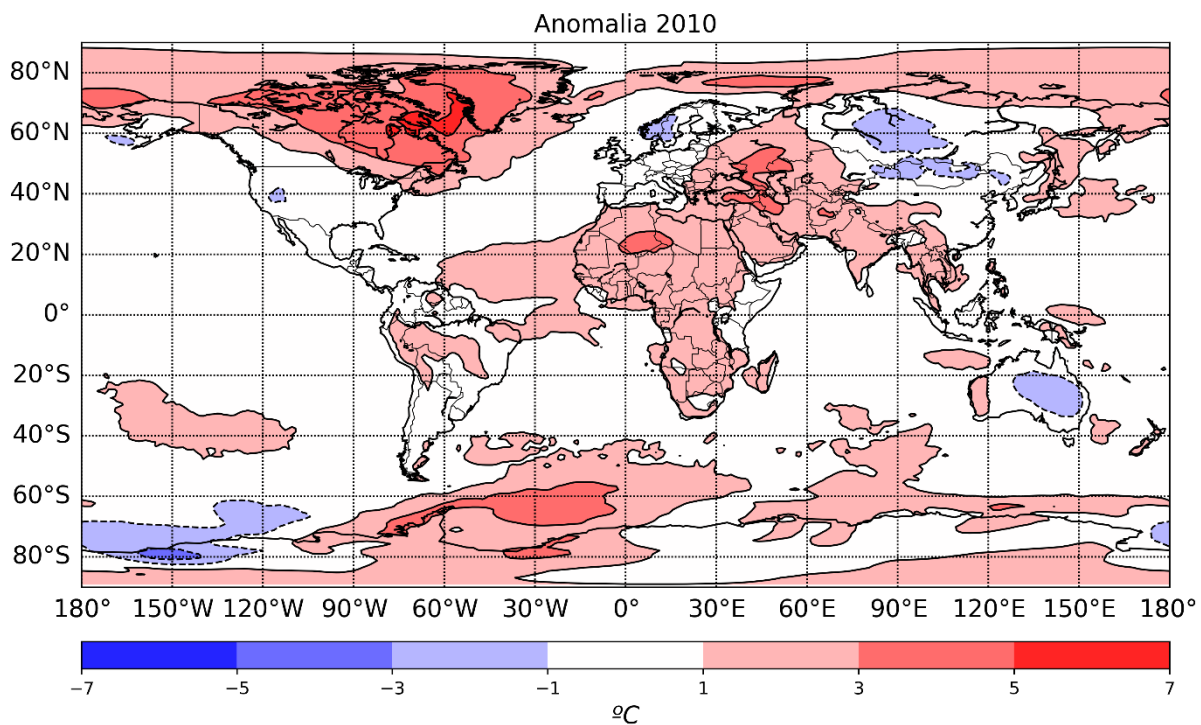


Figura 23: Anomalies en la temperatura que s'han produït durant l'any 2010.

El valor màxim de l'anomalia representat en la figura 23, té un valor aproximat de $6,42^{\circ}\text{C}$. Per tant, hi ha zones que, a la mitjana d'anomalies de l'any 2010, han patit una pujada important. En canvi, si es demana el valor mínim representat en el mapa, aquest té un valor aproximat de $-4,01^{\circ}\text{C}$.

Una altra finalitat dels mapes d'anomalies és la d'alteracions puntuals del clima. Per exemple, a la figura 24 es pot veure un mapa d'anomalies corresponent al mes de desembre de l'any 1997, any on es va produir un fenomen de *el Niño* molt intens i apreciable a la costa oest d'Amèrica del Sud. S'ha escollit representar el fenomen de l'any 1997 per la seva intensitat ja que s'estan mostrant les dades de temperatura a dos metres d'alçada i *el Niño* es dona a la superfície marina. Si el fenomen no fos tan intens no es veuria reflectit en les dades a 2 metres d'altura.

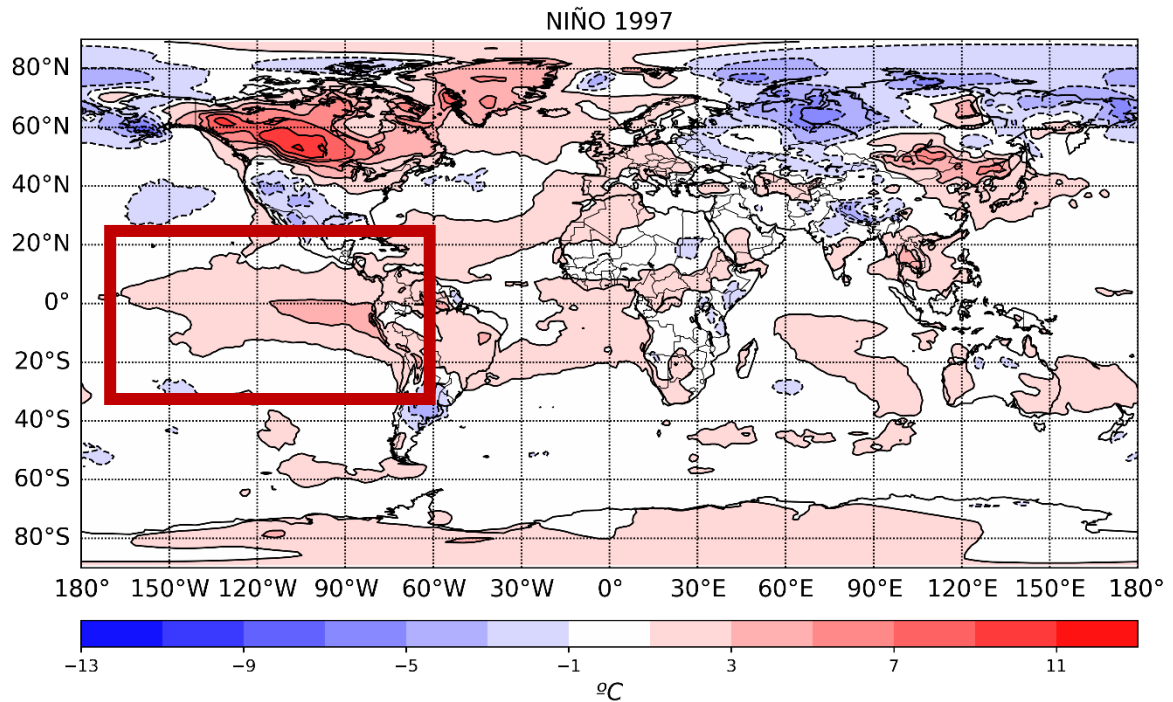


Figura 24: Dins el quadre vermell es pot veure l'anomalia de el Niño en el mapa de les anomalies del desembre de 1997.

Deixant de banda les anomalies puntuals, el següent pas consisteix en fer una representació de les anomalies respecte al principi i el final del període. Aquesta representació no s'ha de confondre amb la de la figura 23, ja que en aquest cas s'estaven ensenyant només les anomalies de l'any 2010.

Per fer-ho es seguirà un mètode molt fàcil d'entendre. El primer pas per representar aquest tipus de dades és fer la mitjana de les temperatures dels deu primers anys, seguidament es seguirà el mateix procediment amb les dades dels deu últims anys. Tot seguit es resten els valors dels deu primers anys a les temperatures dels deu últims, tal com es pot veure en l'equació 17.

$$t = \bar{t}_{(2010-2001)} - \bar{t}_{(1900-1909)} \quad (17)$$

Aquest procediment aplicat a les dades de reanàlisi resulta la figura 25. Com que les anomalies de la figura 25 estudien un conjunt d'anys, es pot dir que no són puntuals. Aquestes anomalies són una representació del ja mencionat escalfament global, la causa principal del canvi climàtic. Per això es pot afirmar que els augments representats són degut a l'escalfament global. S'ha descartat també que les anomalies siguin d'origen extern, ja que aquests tipus de canvis són molt lents i per tant, no es veuen reflectits en gràfics que representen un període d'un segle, una porció de temps molt petita en el món de l'astronomia, on s'acostuma a parlar de milers i milions d'anys

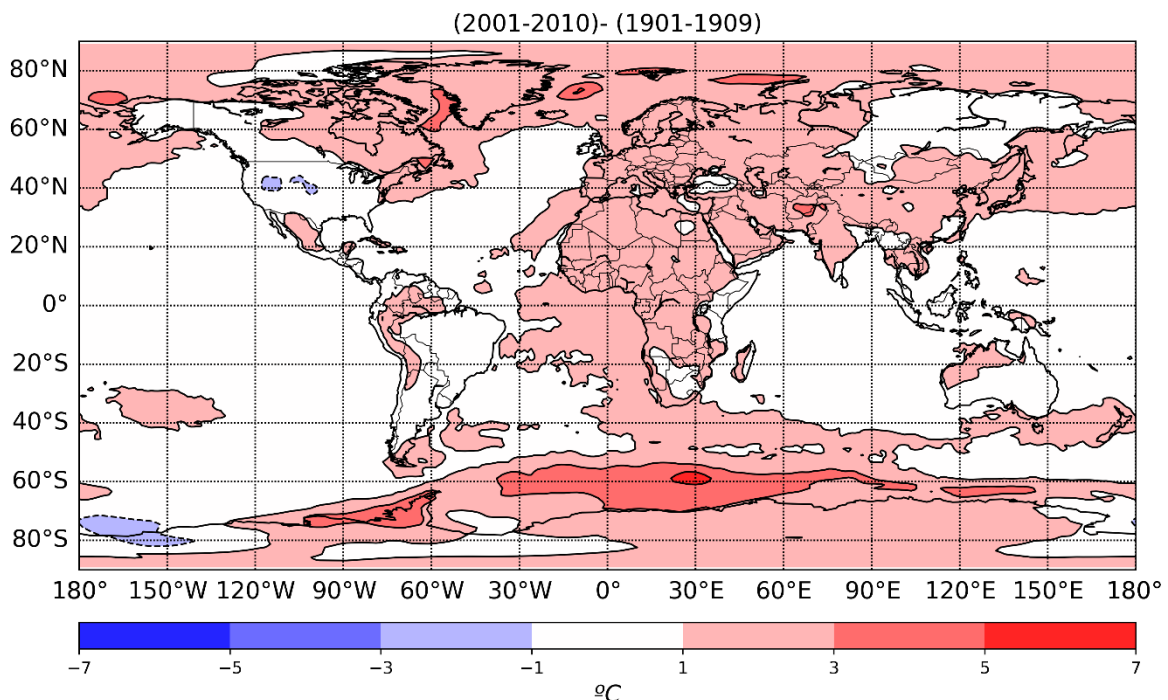


Figura 25: Canvis produïts en la temperatura en el període 2001-2010 respecte al període 1900-1909.

L'anomalia màxima de temperatura a la figura 25 és d'un valor aproximat de 5,687°C. Tot i així, hi ha pocs punts del planeta que arribin a aquest valor d'anomalia. A la figura 25 també es pot observar com l'hemisferi més afectat per la pujada de les temperatures és l'hemisferi nord, hipòtesi que es confirma amb la figura 26 que ensenya, en percentatges, el nombre de pujades compreses en períodes d'un grau en tota la Terra i en els dos hemisferis. Tal com es pot veure a la figura 26, la disminució de la temperatura només és present en el 4,4% de punts del planeta, la majoria situats en l'hemisferi sud.

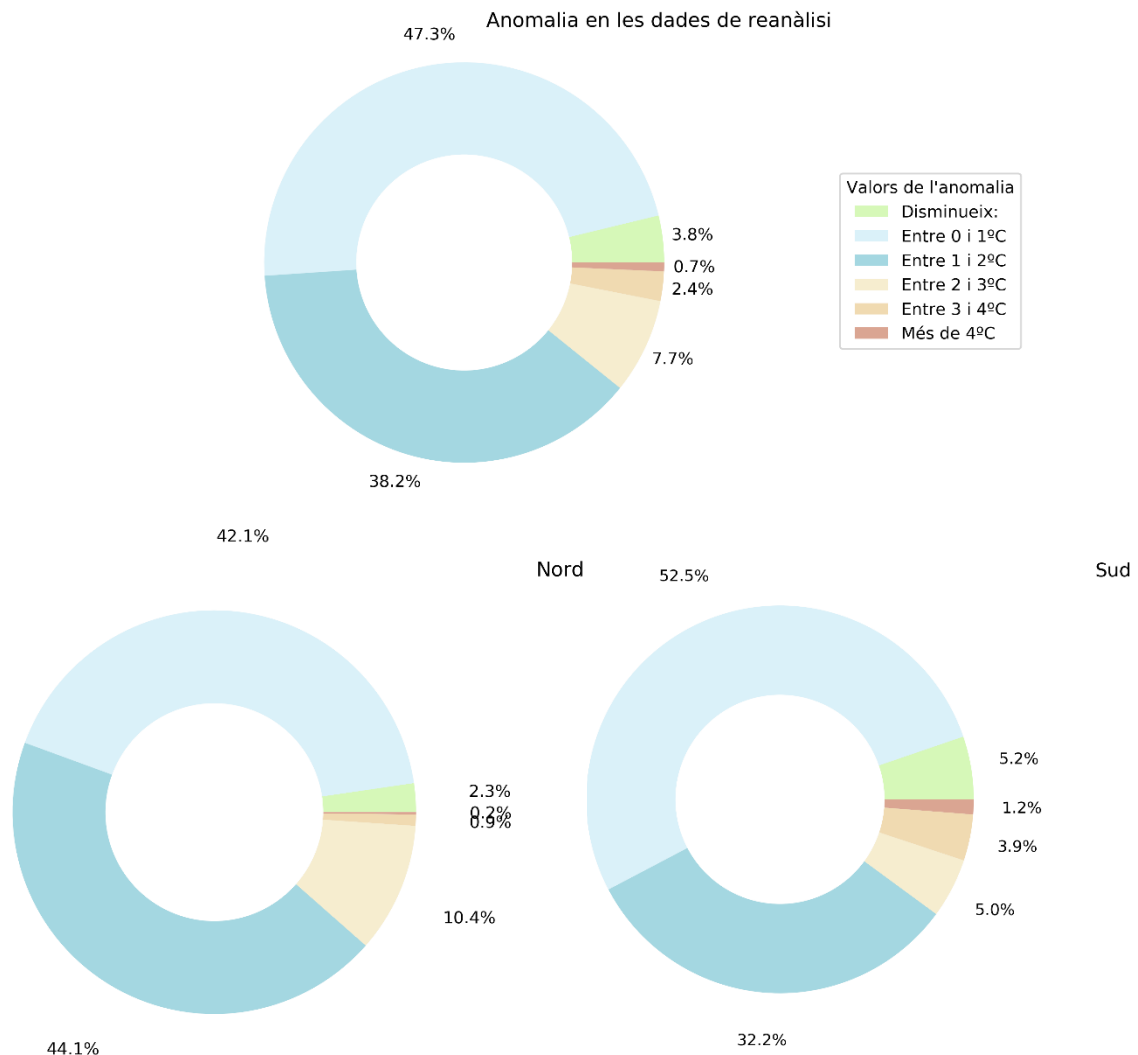


Figura 26: Anomalies de temperatura en la figura 23 representades gràficament en percentatges que contenen totes les dades en períodes d'un grau. El gràfic superior ensenya les anomalies de tot el planeta i les dels hemisferis nord i sud, respectivament.

La figura 26 també mostra com les anomalies de temperatura d'entre 0 i 1°C estan més presents en l'hemisferi sud i en canvi, aquest hemisferi no té tantes anomalies compreses entre 1 i 2°C. L'hemisferi nord té molts més punts amb anomalies d'entre 2 i 3°C però per altra banda, l'hemisferi sud és el que té més punts compresos en els dos períodes que contenen les anomalies més grans.

5. Anàlisi de dades històriques i d'escenaris

En aquest apartat s'analitzaran dos tipus de dades diferents. El primer paquet de dades a estudiar, el paquet dades històriques, és un arxiu que agrupa totes les dades del període 1850-2014. Aquestes dades són el producte d'un model climàtic aplicat al passat, aquest és el fet que les diferencia de les dades de reanàlisi estudiades a l'apartat anterior, que són construïdes a partir de fonts naturals i històriques.

La segona secció d'aquest apartat consisteix en dur a terme el mateix anàlisi amb les dades de tres escenaris SSP diferents, aquests tres escenaris ja han estat mencionats en la part teòrica d'aquest treball i durant la part pràctica es farà un anàlisi més profund d'aquests degut a la importància que tenen en el futur de la humanitat. Totes les figures d'aquest apartat han estat totalment programades mitjançant el llenguatge *Python* en el codi de l'annex.

5.1 Procés utilitzat

El mètode principal per representar les dades d'aquest apartat és igual al de l'apartat anterior, que consisteix en fer les mitjanes i aplicar el pes de la latitud. Tot i així la matriu de les dades històriques té un paràmetre més anomenat *ensemble*, tal com es pot observar a l'equació 18. Per entendre aquest paràmetre s'ha de saber abans que tots els arxius de dades històriques i d'escenaris contenen els resultats de 10 simulacions diferents amb l'objectiu de reduir al mínim el nombre d'errors en els càlculs. Per tant, el paràmetre *ensemble* deixa a l'usuari escollir quina de les deu simulacions es vol representar. En aquest cas es farà la mitjana dels valors de les deu simulacions per representar-ne sempre el valor mitjà.

$$t[any, mes, ensemble, latitud, longitud] \quad (18)$$

5.2 Comparació històric-reanàlisi

La finalitat de la primera representació, la de la figura 27, és comparar el recorregut de les dades de temperatura històriques i les de reanàlisi per trobar diferències entre els valors i poder detectar si el model té tendència a calcular temperatures amb valor més alt o baix del normal comparat amb les dades de

reanàlisi que, com que són les que s'han recollit a la vida real, es consideren més vàlides.

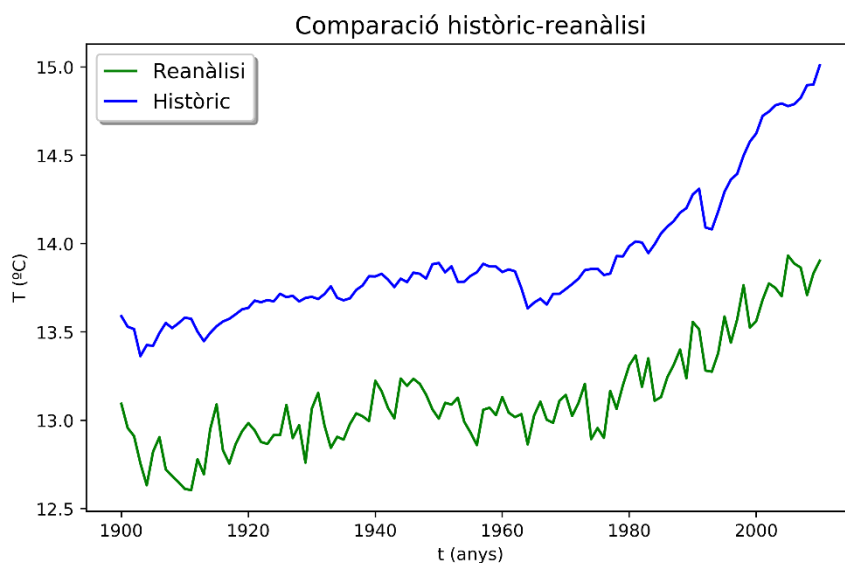


Figura 27: Comparació entre el seguit de dades de reanàlisi i les dades històriques.

La figura 27 mostra que el model té una clara tendència a augmentar el valor dels resultats. De fet, la diferència entre les temperatures mitjanes totals és de $0,776^{\circ}\text{C}$. Tot i així, la figura 27 també mostra que el model ha estat capaç de fer unes bones prediccions, ja que les dues corbes avancen paral·lelament.

5.2 Anàlisi dels escenaris SSP

L'última part d'aquest marc pràctic consisteix en analitzar els resultats de tres simulacions que ensenyen possibles escenaris futurs, tres escenaris SSP. Aquests escenaris, treballats anteriorment a la part teòrica, realitzen les prediccions tenint en compte l'impacte sobre l'economia i la societat que podrien comportar.

En aquest treball es treballen tres escenaris SSP. El primer de tots, anomenat SSP 1 o 126, és el que comporta una pujada menys dràstica de la temperatura. Per altra banda es troba l'escenari SSP 5 o 585, que és el que contempla els augments més significatius. L'escenari SSP 2 o 245 és un escenari que mostra un augment entremig. Els tres escenaris són representats a la figura 28 juntament amb el final del recorregut de dades històriques. S'han fet servir les dades històriques perquè així es treballa només amb valors resultants de simulacions fetes pels supercomputadors.

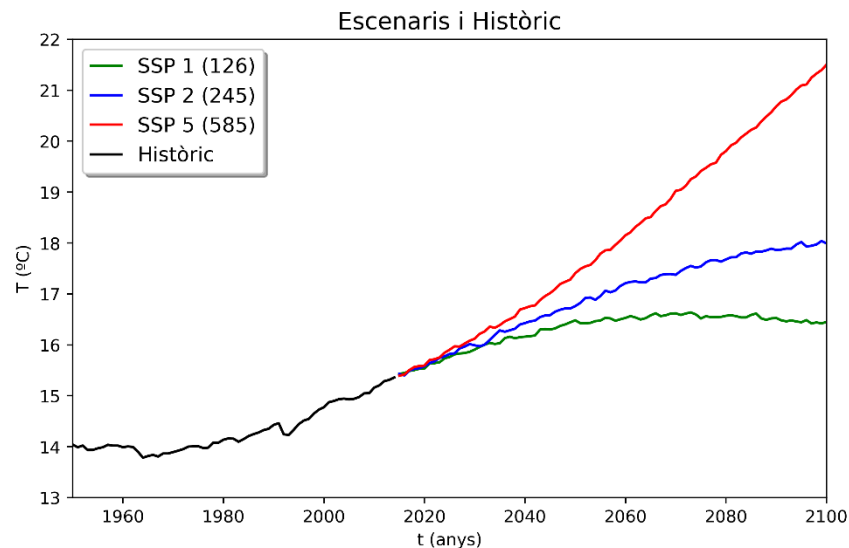


Figura 28: Representació dels tres recorreguts dels escenaris SSP.

Ara bé, si es volen analitzar les conseqüències en la temperatura de cada escenari s'haurà d'anar per passos. En aquest cas es realitzarà un anàlisi de tres maneres diferents. A part, també es faran servir els processos de les mitjanes i del pes de la latitud.

5.2.1 Anàlisi de l'escenari SSP 1

Aquest escenari és el que representa les pujades de temperatura més baixes perquè també és el que contempla que es realitzaran negociacions i acords exitosos per redreçar la problemàtica del canvi climàtic. Tot i així, si es compara l'evolució de temperatura entre el 2100 i el 2019, l'any actual, es pot apreciar una pujada de $0,914^{\circ}\text{C}$ en la mitjana. Això és el que ensenya la figura 29.

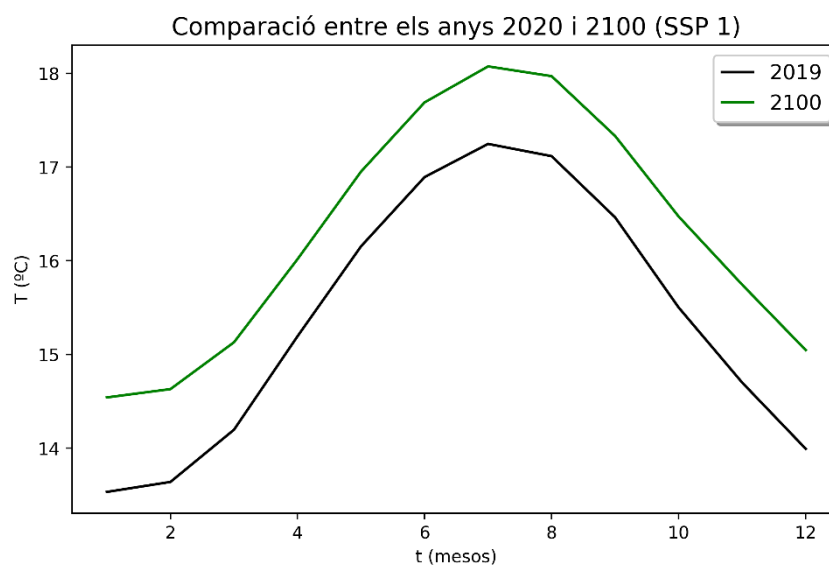


Figura 29: Comparació de les temperatures de l'any 2019 i de l'any 2100.

Per aprofundir més en l'anomalia, el següent pas és la creació d'un mapa que mostri les anomalies entre els deu primers i els deu últims anys. El procediment seguit ha estat el de l'equació 17 i el resultat és la figura 30.

Segurament un dels trets més importants de la figura 30 és l'absència del color blau que representa les disminucions inferiors a -1°C . La principal raó de la falta de color blau és que no hi ha cap anomalia negativa en el mapa. De fet, el punt amb l'anomalia més baixa ja pateix una anomalia positiva de $0,707^{\circ}\text{C}$. Per altra banda, l'anomalia màxima arriba als $17,913^{\circ}\text{C}$. Tot i així, això no vol dir que tots els valors d'anomalia siguin pròxims al valor màxim ja que l'anomalia mitjana és d'un valor aproximat de $2,807^{\circ}\text{C}$.

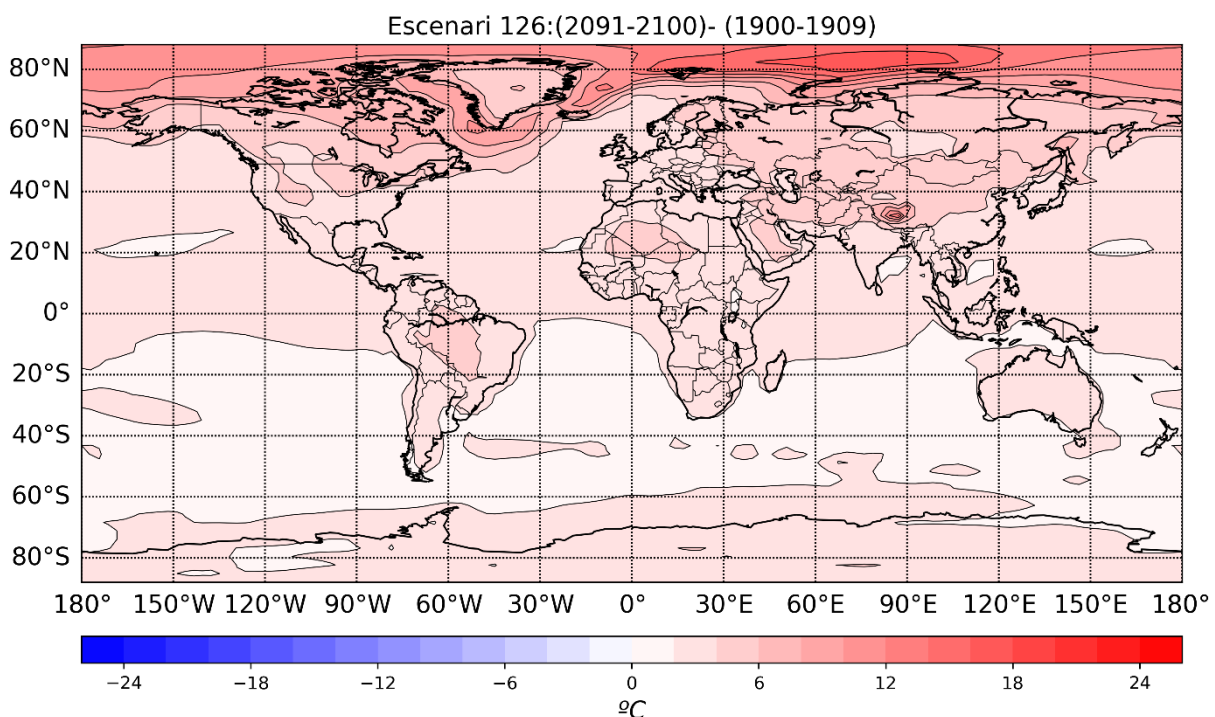


Figura 30: Anomalia en les temperatures entre el principi del segle XX i el final del segle XXI.

Dins el mapa, la zona més afectada per la pujada de la temperatura mitjana és el Pol Nord. Una de les possibles raons de la gran anomalia que es produeix és la fusió de la neu i el gel. Aquest fet causa la desaparició de la capacitat per reflectir l'energia solar. Per tant, la superfície comença a absorbir energia, s'escalfa i augmenta la temperatura, fet que també accelerarà la desaparició de la resta de gel. Aquest fet també es pot veure clarament a la figura 30 a la frontera entre la Xina l'Índia i el Nepal degut a la presència de la neu i el gel al massís de l'Himàlaia. Tot i així no es pot afirmar que la fusió del gel sigui la principal causa

dels augments de temperatura ja que al Pol Sud hi ha superfícies cobertes de gel com l'Antàrtida i a la figura 30 aquesta zona no pateix un creixement tan pronunciat.

Per veure d'una forma una mica més concreta quines són les magnituds de les anomalies s'ha creat la figura 31, que ensenya els percentatges de cada valor d'anomalia classificats en grups de cinc graus.

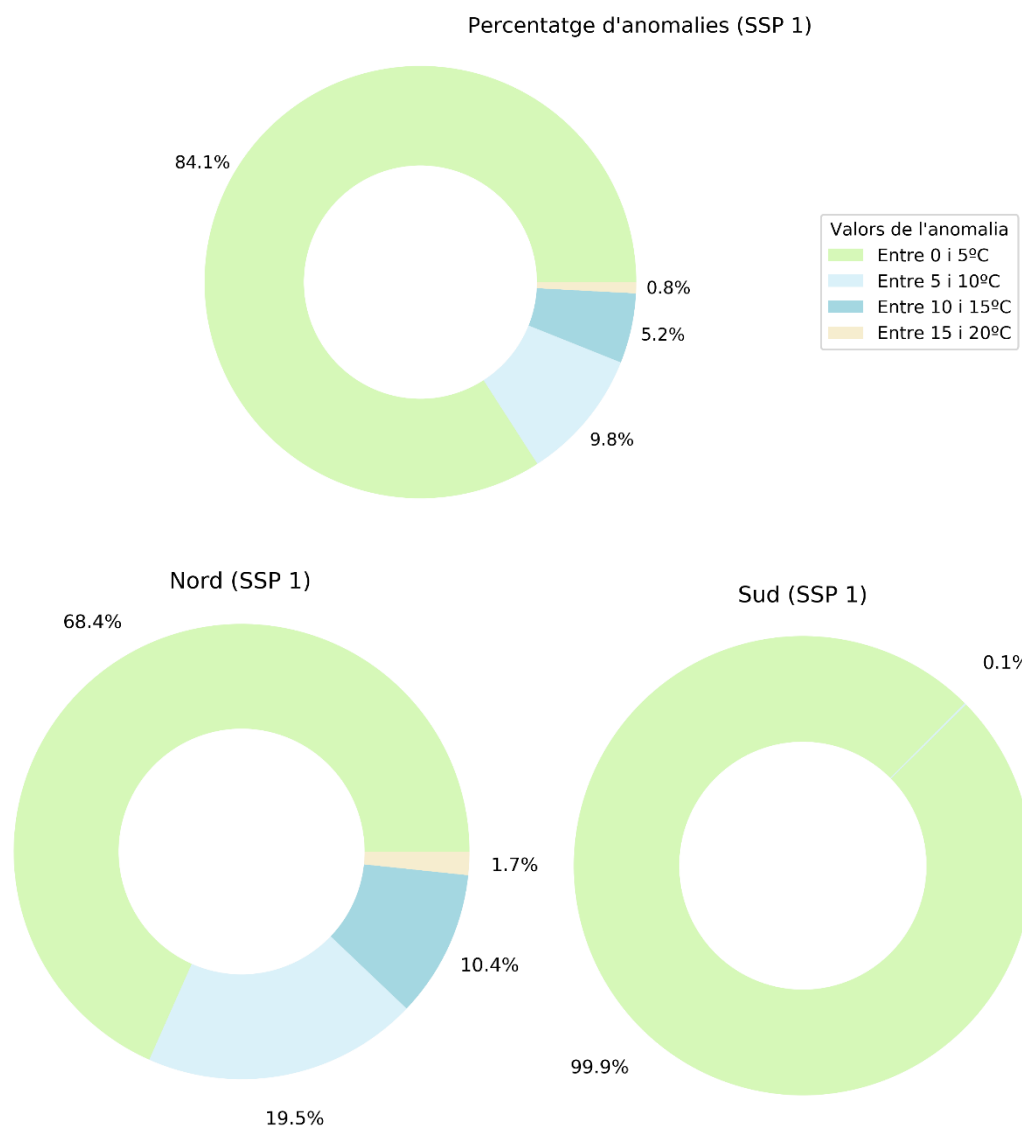


Figura 31: Percentatge d'anomalies en la temperatura mitjana del planeta i en cada hemisferi.

De la figura 31 se'n pot treure una conclusió ben clara: les anomalies superiors a cinc graus es donen principalment a l'hemisferi nord ja que només el 0,1% de les anomalies de l'hemisferi sud són superiors a aquest valor. A més, l'hemisferi nord té valors d'anomalia compresos entre els 10 i els 20°C. La diferència entre anomalies també es pot apreciar mirant les anomalies mitjanes de cada hemisferi

on l'hemisferi nord experimenta un forçament mitjà de $3,648^{\circ}\text{C}$ i en canvi el de l'hemisferi sud és de $2,045^{\circ}\text{C}$.

Segons la figura 32, el valor les anomalies també pot variar segons l'època de l'any. A la figura 32 es pot observar com les anomalies són més altes durant els mesos on transcorre l'hivern a l'hemisferi nord (els mesos d'estiu a l'hemisferi sud). Durant el mesos de maig i juny l'anomalia s'atenua encara que continua sent d'uns $2,5^{\circ}\text{C}$.

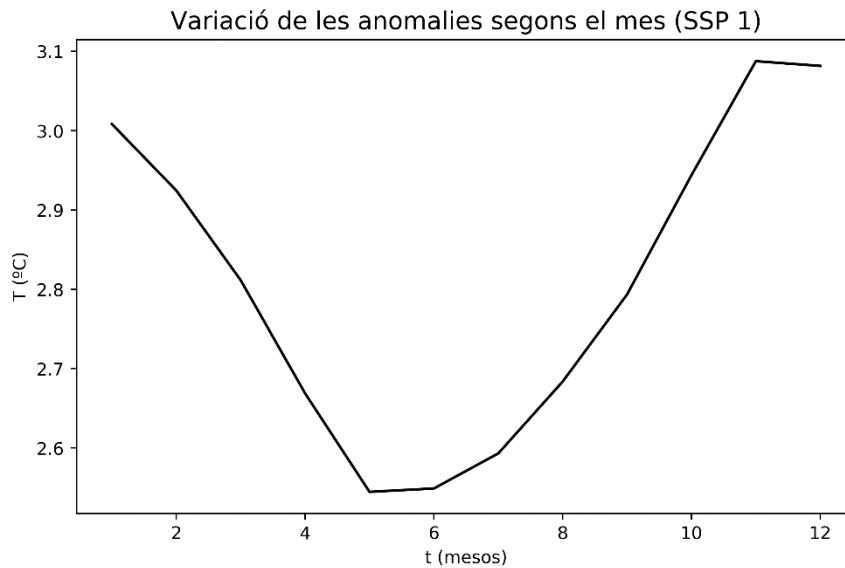


Figura 32: Anomalies en la temperatura en cada mes de l'any segons l'escenari SSP 1.

5.2.2. Anàlisi de l'escenari SSP 2

Seguint els mateixos mètodes s'ha analitzat també l'escenari SSP 2. La primera representació, la figura 32, s'ha creat només per veure quines diferències hi ha entre l'any 2020 i el 2100. L'anomalia resultant és de 2,415 °C de diferència.

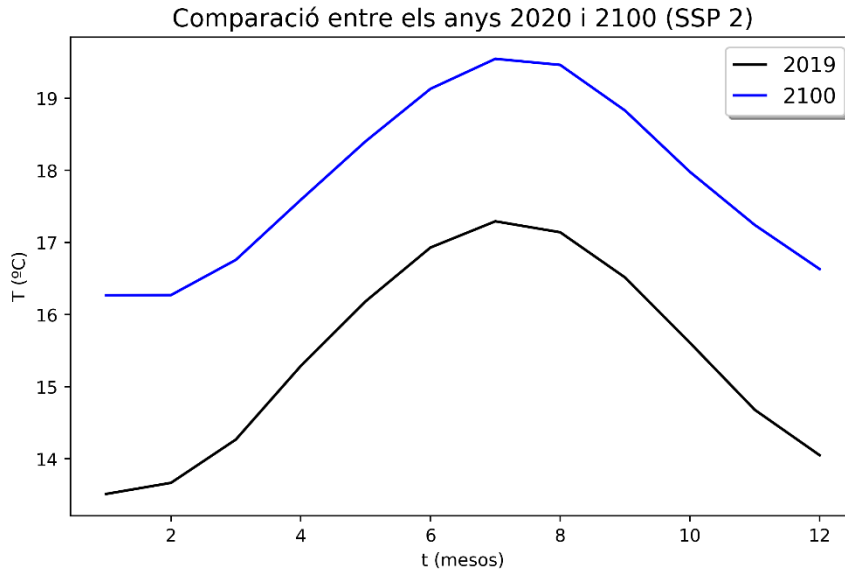


Figura 33 Comparació de les temperatures de l'any 2020 i l'any 2100 segons l'escenari SSP 2.

El valor d'aquesta anomalia augmenta quan es comparen els deu primers anys (1900-1909) amb els deu últims (2091-2100), on el forçament mitjà és de 4,305°C. Aquest forçament mitjà de 4,305 °C es pot veure dividit en totes les latituds i les longituds a la figura 34.

Les anomalies més marcades del mapa estan localitzades a les mateixes zones que a l'escenari SSP 1 però ara tot el mapa adopta un to més vermellós degut a l'increment d'aquestes. L'anomalia màxima en la figura 34 és de 20,118°C mentre que l'augment de temperatura mínim és de 1,279°C. Per tant, la temperatura no disminueix en cap dels punts del mapa.

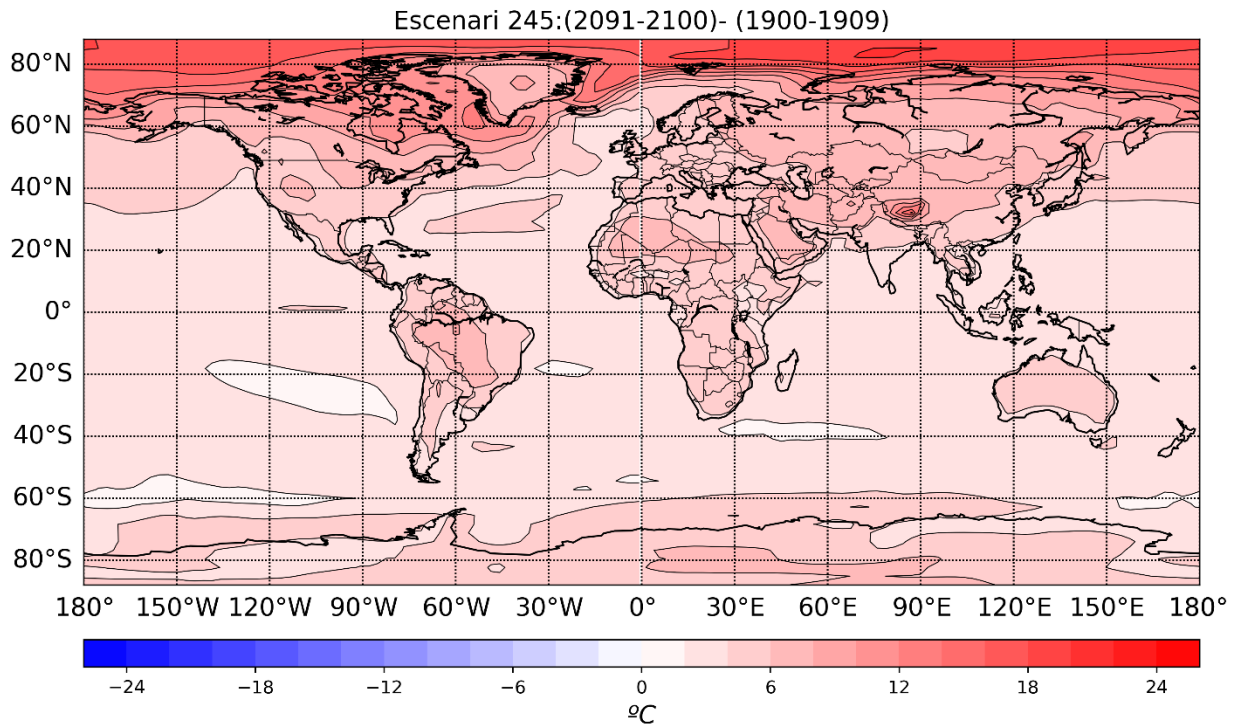


Figura 34 Diferència de temperatura entre la primera dècada del segle XX i la última del segle XXI segons l'escenari SSP 2.

L'anomalia mitjana a l'hemisferi nord, equivalent a 5,408°C, és més marcada que la de l'hemisferi sud que té un valor de 3,306°C. De fet, el total d'anomalies en percentatges classificades en grups de cinc graus de la figura 35 també reflexa un augment més marcat en l'hemisferi nord on un 0,2% de les anomalies superen els 20°C. En canvi, no hi ha cap anomalia de l'hemisferi sud que arribi als 10°C.

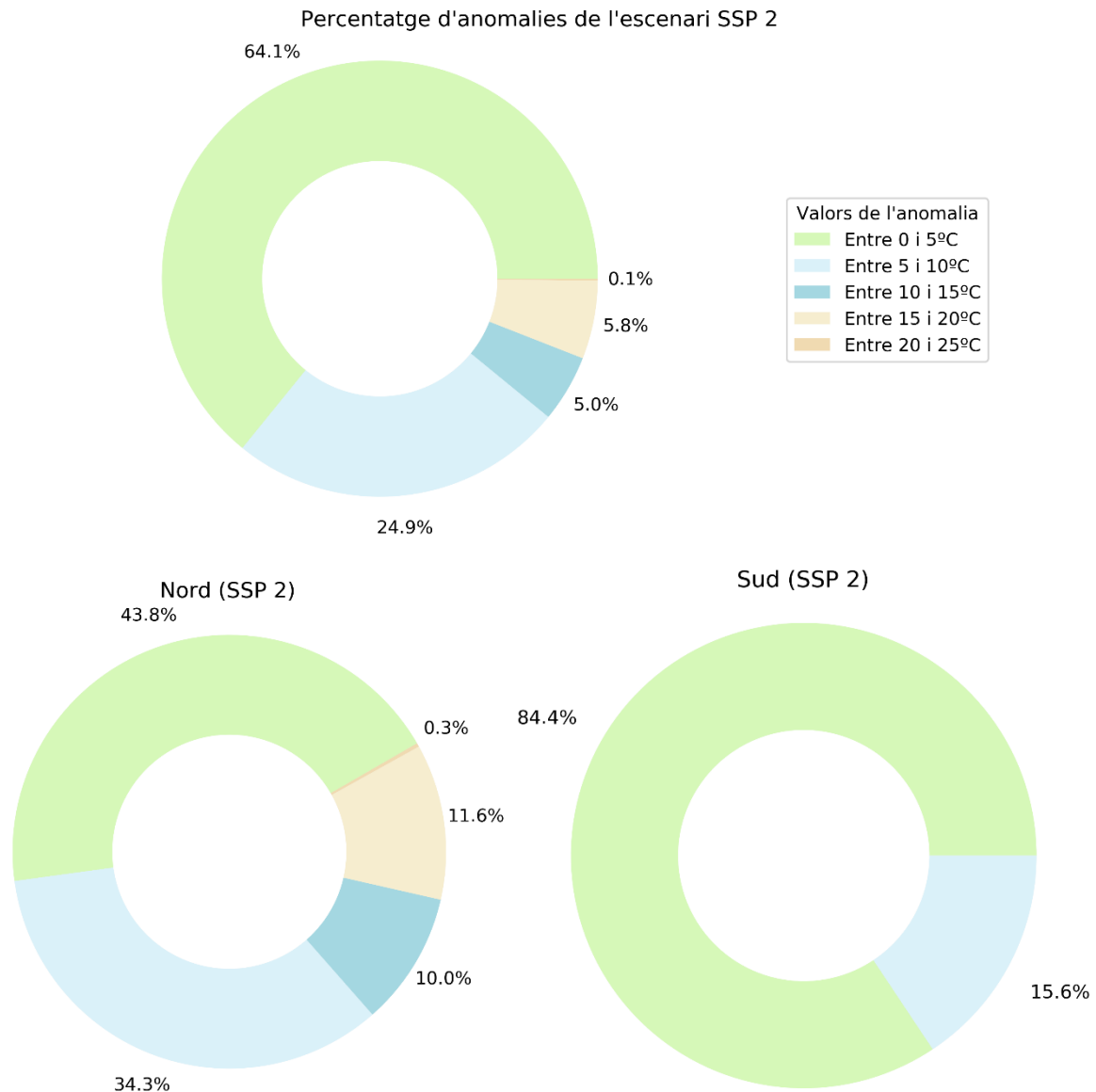


Figura 35 Percentatges de valors de les anomalies en grups de cinc graus segons l'escenari SSP 2

Si es comparen aquests gràfics amb els de la figura 31, es pot observar un augment de les anomalies compreses entre 5 i 10°C i les del període que inclou els valors d'entre 15 i 20°C. Hi ha també una disminució d'aquells valors que es trobaven entre els 0 i els 5°C i els que es trobaven entre els 10 i els 15°C. Per altra banda també apareix l'anomalia que es troba entre els 20 i 25°C, inexistent en la figura 31.

Respecte a l'anomalia segons l'època de l'any mostrada a la figura 36, té una corba bastant semblant a la de la figura 32, on les anomalies són més baixes durant el mes de juny. Tot i així, els forçaments de cada mes de l'any de la figura 36 són aproximadament un 1,5°C més altes comparades amb les de la figura 32.

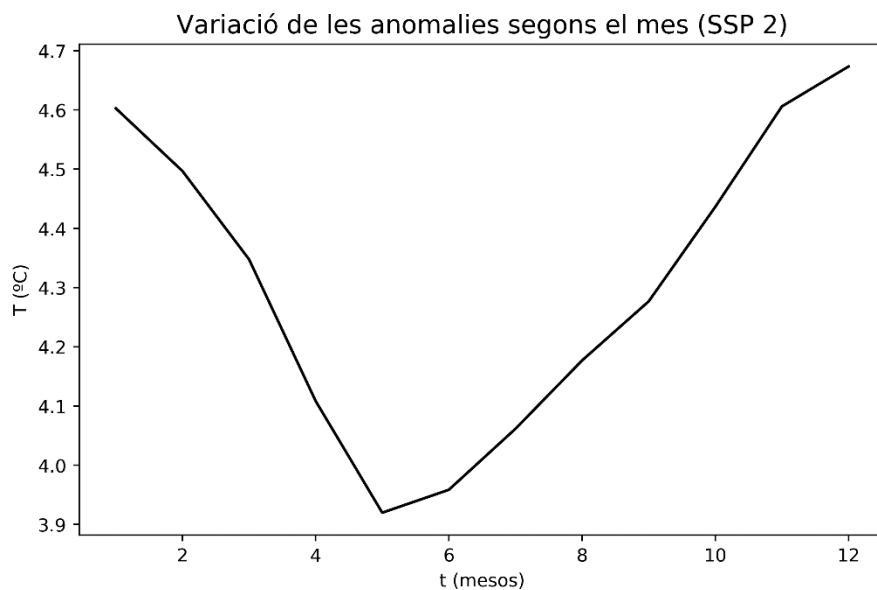


Figura 36 Anomalies segons cada mes de l'any segons l'escenari SSP 2.

5.2.3. Anàlisi de l'escenari SSP 5

Per acabar el marc pràctic es durà a terme el mateix anàlisi per l'escenari SSP 5 que, tal com es pot veure a la figura 37, és el que té l'augment més gran de temperatura l'any 2100 respecte al 2019. Entre les temperatures mitjanes dels dos anys hi ha 5,91 °C de diferència.

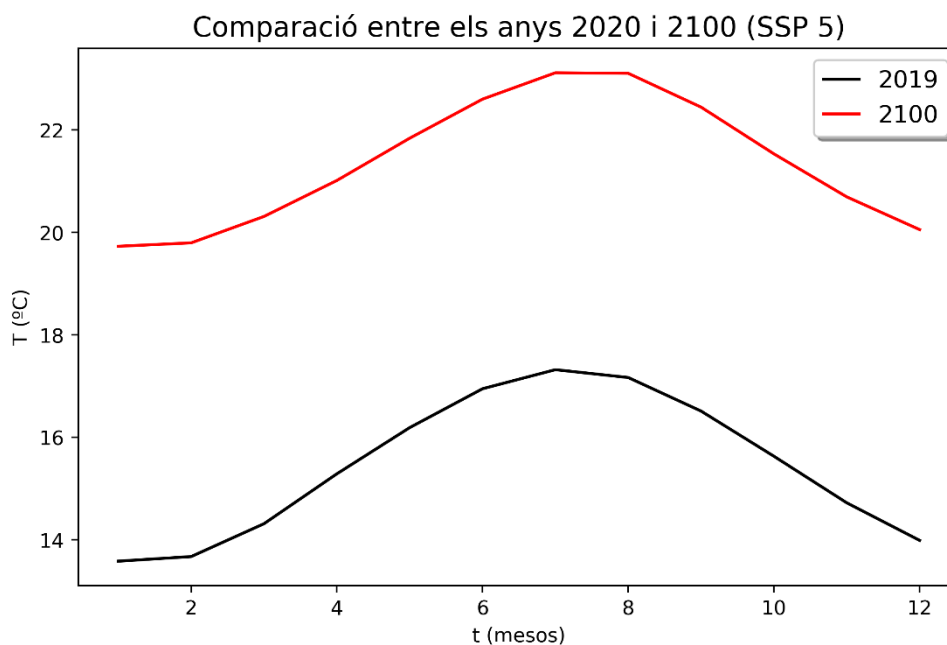


Figura 37 Comparació de temperatures entre l'any 2020 i l'any 2100 segons l'escenari SSP 5.

Si es segueix el procés de l'equació 17, l'anomalia mitjana resultant entre la primera dècada del segle XX i la última del XXI equival a 7,473°C, amb un valor

màxim equivalent $25,086^{\circ}\text{C}$ i un valor mínim de $2,459^{\circ}\text{C}$. Per tant, en aquest escenari tampoc hi ha cap anomalia negativa. Aspecte que es pot comprovar en la figura 38, on s'ensenyen els valors obtinguts a partir del procés de l'equació 17.

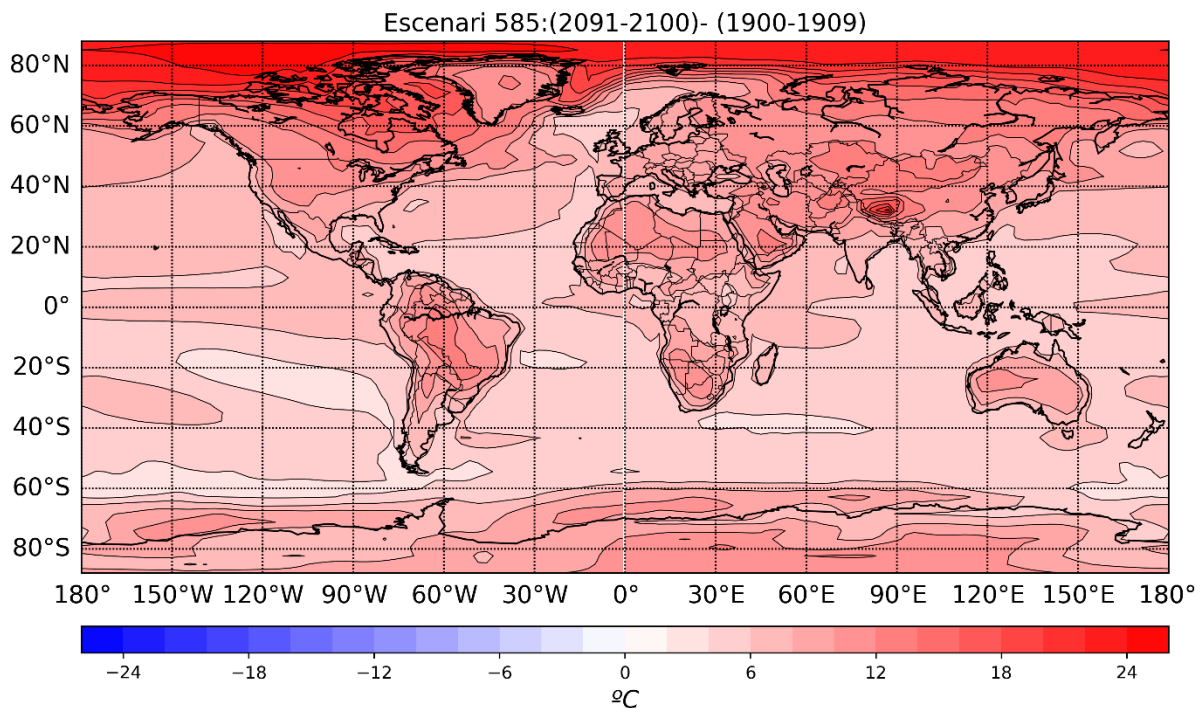


Figura 38 Forçaments en la temperatura durant l'any 2100 segons l'escenari SSP 5.

La figura 38 adopta un color molt més vermellós i ensenya un forçament més elevat respecte al de l'escenari SSP 2. És més, la diferència entre els forçaments de l'escenari SSP 1 i SSP 2 és la meitat de la diferència entre de l'anomalia entre l'escenari SSP 2 i SSP 5.

Aquest fet també és observable a la figura 39 que ensenya els percentatges de cada valor de l'anomalia agrupats en grups de cinc graus. El tret més important de la figura 39 és l'augment dels forçaments d'entre 20 i 25°C , més nombrosos que els d'entre 15 i 20°C . Als dos hemisferis s'aprecia també una clara disminució dels valors d'entre 0 i 5°C i un augment de les d'entre 5 i 10°C . De fet, les anomalies d'entre 5 i 10°C són les més nombroses en tots dos hemisferis.

Un altre patró que es repeteix respecte a les figures 30 i 34 és que el nombre d'anomalies altes és més gran a l'hemisferi nord. A l'hemisferi sud no hi ha anomalies que superin els 15°C i en canvi, l'hemisferi nord en té que de superiors

als 20°C. Per altra banda, els forçaments més intensos també es localitzen en els mateixos punts: les latituds més altes de l'hemisferi nord i l'Himàlaia.

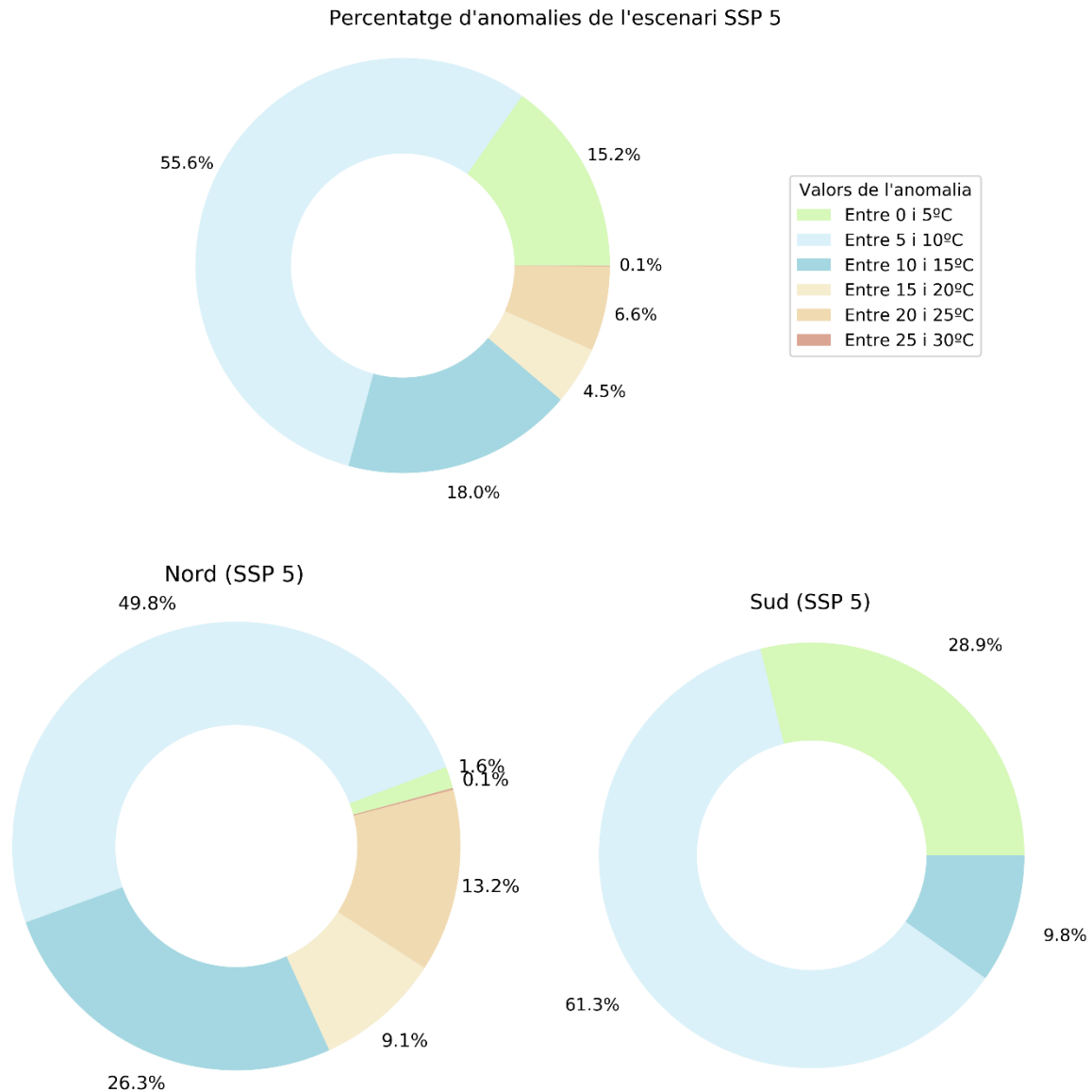


Figura 39 Percentatges dels forçaments segons l'escenari SSP 5.

Per altra banda, les anomalies segons el mes, agrupades en la figura 40, també tenen un patró semblant a les dels altres escenaris: anomalies més baixes entre l'abril i el juny i més altes durant l'hivern. Tot així, la corba de l'escenari SSP 5 de la figura 40 té una mitjana de 3,168 °C més respecte a l'escenari SSP 2 i de 4,666°C superiors respecte al SSP 1. Una altra diferència que es pot apreciar en la figura 40 és que, comparada amb la figura 32 i la 36, l'anomalia es va accentuant durant el mes de juny, deixant el mínim del gràfic únicament en el mes de maig.

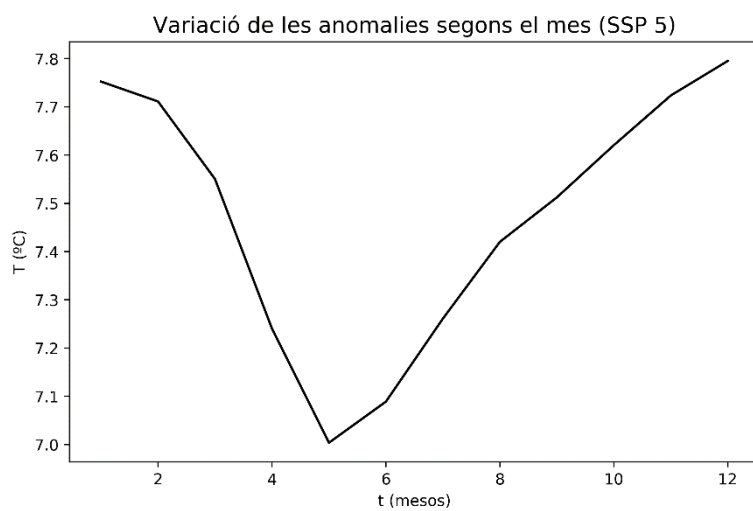


Figura 40 Evolució mensual de les anomalies en la temperatura.

Conclusions

La recerca portada a terme permet afirmar que existeix un escalfament global que provoca un canvi climàtic.

La part pràctica d'aquest treball demostra que l'augment de la temperatura mitjana és més accentuat a l'hemisferi nord. Una de les raons que podrien causar un augment més pronunciat a l'hemisferi nord és la fusió del gel, que reflecteix la radiació solar, i el consegüent escalfament de la superfície que aquest gel cobreix. Tot i així, no es pot afirmar que aquesta sigui la principal ni l'única causa de l'augment més pronunciat al pol nord, ja que l'hemisferi sud també té superfície coberta de gel i no pateix el mateix escalfament.

A part de respondre les hipòtesis, durant tot el procés d'escriptura del treball s'han adquirit altres coneixements addicionals, alguns dels quals compleixen els objectius marcats al principi del treball.

En primer lloc, s'ha complert amb l'objectiu de crear un treball que relacioni el clima i la supercomputació. El treball, a més, s'ha escrit en català i s'ha intentat fer-ho de forma entenedora.

També s'ha après com funcionen els organismes multilaterals que tenen per objectiu redreçar i informar la problemàtica global del canvi climàtic. Entre aquests organismes n'hi ha de caràcter polític —com la UNFCCC, que té per objectiu promoure polítiques i arribar a acords internacionals per tal de redreçar el problema— i de caràcter científic —com l'IPCC, que compila tota la informació científica per tal que pugui ser tinguda en consideració pels responsables de polítiques—. A part, també s'han identificat les principals característiques dels escenaris que el planeta podria afrontar en un futur.

A la part de supercomputació s'ha aconseguit fer una introducció a aquesta ciència de manera clara i donant-ne una visió general. S'ha parlat també específicament del supercomputador de Barcelona.

Seguidament, també s'ha aconseguit saber què és exactament un model climàtic, la seva evolució històrica i els tres tipus més importants de models climàtics existents. Gràcies a això també s'han vist algunes de les fórmules que descriuen les lleis físiques que intervenen en un model.

Durant tot l'apartat de supercomputació també s'han pogut conèixer els factors que agilitzen o alenteixen el funcionament d'un model, i s'han après alguns dels factors que intervenen en la precisió dels resultats.

Un dels objectius pendents ha estat aprendre a analitzar les traces resultants d'un model. Com que no era un tema gaire lligat a la hipòtesi del treball, finalment no s'ha aprofundit en aquesta qüestió.

Finalment, també s'ha après a programar i a fer representacions gràfiques mitjançant el llenguatge *Python*. De fet, totes les figures de la part pràctica han estat creades a partir de les dades de temperatura i fent ús únicament de la programació.

Bibliografia i referències web

4.4.2. *Radiative-Convective Models*. (25 / Agost / 2018). Consultat el 07 / Setembre / 2019, a Global Climate Change: <https://www.global-climate-change.org.uk/4-4-2.php>

Alarcón, M., Àvila, A., & Cunillera, J. (2011). *Canvi climàtic: evidències científiques i impactes*. Barcelona.

American Meteorological Society. (sense data). *Clausius-clapeyron equation*. Consultat el 17 / Agost / 2019, a AMS Glossary: http://glossary.ametsoc.org/wiki/Clausius-clapeyron_equation

Barcelona Supercomputing Center - Centre Nacional de Supercomputació. (11 / Desembre / 2017). *MareNostrum 4, chosen as the most beautiful data centre in the world*. Consultat el 15 / Agost / 2018, a BSC: <https://www.bsc.es/news/bsc-news/marenostrum-4-chosen-the-most-beautiful-data-centre-the-world>

Barcelona Supercomputing Center - Centre Nacional de Supercomputació. (sense data). *MareNostrum*. Consultat el 05 / Setembre / 2019, a BSC-CNS: <https://www.bsc.es/es/marenostrum/marenostrum>

Barcelona Supercomputing Center. (22 / Setembre / 2019). *Performance Tools*. Recollit de BSC: <https://www.bsc.es/discover-bsc/organisation/scientific-structure/performance-tools>

Barcelona Supercomputing Center- Centre Nacional de Supercomputació. (sense data). *Información Técnica*. Consultat el 06 / Setembre / 2019, a BSC-CNS: <https://www.bsc.es/es/marenostrum/marenostrum/informacion-tecnica>

Barcelona Supercomputing Center-Centre Nacional de Supercomputació. (11 / Desembre / 2017). *MareNostrum 4, chosen as the most beautiful data centre in the world*. Consultat el 15 / Agost / 2019, a Barcelona Supercomputing Center-Centre Nacional de Supercomputació.: <https://www.bsc.es/news/bsc-news/marenostrum-4-chosen-the-most-beautiful-data-centre-the-world>

Barcelona Supercomputing Center-Centre Nacional de Supercomputació. (sense data). *Barcelona Supercomputing Center - Test of supercomputers*. Consultat el 05 / 09 / 2019, a Barcelona Supercomputing Center - Test of supercomputers: <https://quiz.bsc.es/en/>

Barcelona Supercomputing Center-Centre Nacional de Supercomputació. (22 / Octubre / 2019). *esarchive growth*. Consultat el 25 / Octubre / 2019, a bsc.es: <http://www.bsc.es/projects/earthscience/esarchive/plot.html>

Barcelona Supercomputing Centre - Centre Nacional de Supercomputació. (sense data). *Research Departments*. Consultat el 15 / Agost / 2019, a BSC-CNS: <https://www.bsc.es/discover-bsc/organisation/scientific-structure>

- Bureau of Meteorology. (2003). *The Greenhouse Effect and Climate Change*. Bureau of Meteorology.
- Carbon Brief. (19 / Abril / 2018). *Explainer: How 'Shared Socioeconomic Pathways' explore future climate change*. Consultat el 13 / Agost / 2019, a Carbon Brief: <https://www.carbonbrief.org/explainer-how-shared-socioeconomic-pathways-explore-future-climate-change>
- Carbon Brief. (16 / Gener / 2018). *Timeline: The history of climate modelling*. Consultat el 15 / Agost / 2019, a Carbon Brief: <https://www.carbonbrief.org/timeline-history-climate-modelling>
- Cillizza, C. (27 / Novembre / 2018). Donald Trump buried a climate change report because 'I don't believe it'. Estats Units d'Amèr.
- Columbia University. (2007). *Solar Radiation and the Earth's Energy Balance*. Consultat el 19 / Abril / 2019, a Earth and Environmental Sciences: <https://eesc.columbia.edu/courses/eesc/climate/lectures/radiation/index.html>
- EC-Earth. (sense data). *About - EC-Earth*. Consultat el 08 / Setembre / 2019, a EC-Earth: <http://www.ec-earth.org/about/>
- Enciclopèdia Catalana. (04 / Juliol / 2018). *Protocol de Kyoto*. Consultat el 12 / Agost / 2019, a Enciclopèdia Catalana: <https://www.enciclopedia.cat/EC-GEC-0262822.xml>
- Enciclopèdia Catalana. (7 / Abril / 2018). *Protocol de Kyoto*. Recollit de Enciclopèdia Catalana: <https://www.enciclopedia.cat/EC-GEC-0262822.xml>
- Encyclopaedia Britannica. (2019). *Lewis Fry Richardson*. Consultat el 16 / Agost / 2019, a British physicist: <https://www.britannica.com/biography/Lewis-Fry-Richardson>
- European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. (2010). *ERA-20C*. Consultat el 23 / Setembre / 2019, a ECMWF: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era-20c>
- European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. (sense data). *Modelling and Prediction*. Consultat el 08 / Setembre / 2019, a ECMWF: <https://www.ecmwf.int/en/research/modelling-and-prediction>
- Flath, D., Kaper, H. G., Wattenberg, F., & Widiasih, E. (24 / Març / 2012). *Energy Balance Models*.
- Georgia State University. (sense data). *Blackbody Radiation*. Consultat el 04 / Setembre / 2019, a HyperPhysics Concepts: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/mod6.html#c1>
- Georgia State University. (sense data). *Stefan-Boltzmann Law*. Consultat el 04 / Setembre / 2019, a HyperPhysics Concepts: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/thermo/stefan.html>

GreenHouse Gas Online. (sense data). *The Kyoto Protocol*. Consultat el 12 / Agost / 2019, a GreenHouse Gas Online: <http://www.ghgonline.org/kyoto.htm>

Grup sobre el Governament del Canvi Climàtic (GGCC) del Grup d'Investigació en Sostenibilitat, Tecnologia i Humanisme (STH) de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). (Abril / 2018). *Acuerdo de París*. Recollit de Dos Grados Celsius: <https://2c.ggcc.upc.edu/>

Hausfather, Z. (19 / Abril / 2018). *Explainer: How 'Shared Socioeconomic Pathways' explore future climate change*. Consultat el 13 / Agost / 2019, a Carbon Brief: <https://www.carbonbrief.org/explainer-how-shared-socioeconomic-pathways-explore-future-climate-change>

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2019). *IPCC — Intergovernmental Panel on Climate Change*. Consultat el 08 / Agost / 2019, a IPCC — Intergovernmental Panel on Climate Change: <https://www.ipcc.ch/>

International Union of Pure and Applied Chemistry. (sense data). *IUPAC - radiative transition (R05065)*. Consultat el 08 / Setembre / 2019, a IUPAC Gold Book: <http://goldbook.iupac.org/terms/view/R05065>

IPCC. (2015). *Climate Change 2014: Synthesis Report*. IPCC. Ginebra: IPCC.

Leo Hickman. (16 / Gener / 2018). *Timeline: The history of climate modelling*. Consultat el 15 / Agost / 2019, a Carbon Brief: <https://www.carbonbrief.org/timeline-history-climate-modelling>

Marcos, R., & Badal, M. (6 / Abril / 2019). De la predicció meteorològica a la predicció climàtica. Barcelona, Barcelona, Catalunya.

McSweeney, R., & Hausfather, Z. (15 / Gener / 2018). *Q&A: How do climate models work?*. Consultat el 15 / Agost / 2019, a Carbon Brief: <https://www.carbonbrief.org/qa-how-do-climate-models-work>

Miguel Castrillo; Thomas Arsouze; Kim Serradell; Mario Acosta; Raffaele Bernardello; Froila Palmeiro. (19 / Abril / 2019). *Documents TR*. Consultat el 19 / Abril / 2019, a Google Drive: <https://drive.google.com/drive/folders/1tJHAzneQ5BejF81jF9zQEfU1uATX4lbn?usp=sharing>

National Oceanic and Atmospheric Administration . (sense data). *Climate Model Downscaling - Geophysical Fluid Dynamics Laboratory*. Consultat el 27 / Agost / 2019, a Geophysical Fluid Dynamics Laboratory: <https://www.gfdl.noaa.gov/climate-model-downscaling/>

National Oceanic and Atmospheric Administration. (sense data). *Climate Models*. Consultat el 08 / Setembre / 2019, a NOAA Climate.gov: <https://www.climate.gov/maps-data/primer/climate-models>

Neus Mayol Alcaraz. (15 / Desembre / 2019). *Arxius de Dades*. Recollit de Google Drive:

<https://drive.google.com/drive/folders/1lcyGR61DNrteKdjsADuHNdTgmqWwhgP?usp=sharing>

- Seth, W., & Kimberly A, N. (2017). The climate mitigation gap: education and government recommendations miss the most effective individual actions. *Environmental Research Letters*, Volum 12, Número 7.
- Solomon Islands Meteorological Services. (sense data). *Who is a Annex I country?* Consultat el 12 / Agost / 2019, a Solomon Islands Meteorological Services: <https://www.met.gov.sb/who-is-a-annex-i-country>
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Alley, R., Berntsen, T., Bindoff, N., . . . Hegerl, G. (2007). Technical Summary. A S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, & M. Marquis, *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth*. Cambridge; New York;: Cambridge University Press.
- Somerville, R., Le Treut, H., Cubasch, U., Ding, Y., & Mauritzen, C. (2007). Historical Overview of Climate Change. Cambridge; New York, NY, United Kingdom; USA: Cambridge University Press.
- Stocker, T., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S., Boschung, J., . . . Xia, Y. (2013). IPCC, 2013: Summary for Policymakers. A T. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. Allen, J. Boschung, . . . Y. Xia, *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of*. Cambridge; New York: Cambridge University Press.
- Supercomputació, B. S.-C. (sense data). *Research Departments*. Consultat el 15 / Agost / 2019, a Barcelona Supercomputing Center-Centre Nacional de Supercomputació: <https://www.bsc.es/discover-bsc/organisation/scientific-structure>
- Team, C. W., Pachauri, R., & Meyer, L. (2015). *AR5 Synthesis Report*. Consultat el 13 / Agost / 2019, a Climate Change 2014: https://ar5-syr.ipcc.ch/ipcc/ipcc/resources/pdf/IPCC_SynthesisReport.pdf
- The Intergovernmental Panel on Climate Change. (sense data). *AR5 Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Consultat el 04 / Juliol / 2019, a IPCC: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>
- TOP500. (2019). *June 2019*. Consultat el 14 / Agost / 2019, a TOP500 Supercomputer Sites: <https://www.top500.org/lists/2019/06/>
- UNEP. (2012). *The Emissions Gap Report 2012*. Nairobi: United Nations Environment Programme (UNEP).
- UNFCCC. (2015). *The Paris Agreement*. Consultat el 13 / Agost / 2019, a UNFCCC: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>

UNFCCC. (2017). *Introducción al cambio climático*. Consultat el 13 / Abril / 2019, a UN CC:e-Learn: <https://unccelearn.org/course/view.php?id=13&page=overview>

United Nations. (2015). Paris Agreement. Paris.

United Nations Framework Convention on Climate Change. (2015). *The Paris Agreement*. Consultat el 13 / Agost / 2019, a UNFCCC: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>

United Nations Framework Convention on Climate Change. (sense data). *Parties*. Consultat el 12 / 08 / 2019, a UNFCCC: https://unfccc.int/process/parties-non-party-stakeholders/parties-convention-and-observer-states?field_national_communications_target_id%5B515%5D=515

Universidad de Granada. (sense data). *FORTTRAN: Una breve introducción*. Consultat el 17 / Agost / 2019, a <http://ergodic.ugr.es/cphys/LECCIONES/Fortran/fortran-NEW.pdf>

University College Dublin. (15 / Desembre / 2006). *UCD News*. Consultat el 16 / Agost / 2019, a https://www.ucd.ie/news/dec06/121506_weather_forecast.htm

University of Lincoln. (sense data). *Astrophysics Group*. Recollit de Projects: <https://astrophysics-lincoln.org/projects/>

Viquipèdia. (2008). *Forçant radiatiu*. Consultat el 4 / Abril / 2019, a Viquipèdia: https://ca.wikipedia.org/wiki/For%C3%A7ant_radiatiu

Wikipedia. (sense data). *Cuerpo Negro*. Consultat el 04 / Setembre / 2019, a Wikipedia: https://es.wikipedia.org/wiki/Cuerpo_negro

Wikipedia. (sense data). *Intergovernmental Panel on Climate Change*. Consultat el 08 / Agost / 2019, a Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Intergovernmental_Panel_on_Climate_Change

Wikipedia. (sense data). *Protocol de Kyoto*. Consultat el 12 / Agost / 2019, a Wikipedia.

Wikipedia. (sense data). *Supercomputador*. Consultat el 14 / Agost / 2019, a Wikipedia: <https://ca.wikipedia.org/wiki/Supercomputador>

World Meteorological Organization. (2019). *Climate*. Consultat el 23 / Març / 2019, a World Meteorological Organization: <https://public.wmo.int/en/our-mandate/climate>

World Meteorological Organization. (2019). *The Global Climate in 2015-2019*. Geneva: World Meteorological Organization. Consultat el 11 / Maig / 2019

Annex

L'annex d'aquest treball consisteix en tot el codi creat durant el marc pràctic. S'hi pot accedir escanejant el codi QR o bé entrant al següent enllaç.

Enllaç: <https://snow14.github.io/Annex/>



Figura 41 Codi QR que duu a tot el codi utilitzat. Codi creat amb: <https://www.codigos-qr.com/en/qr-code-generator/>.

